

УДК 551.511.31

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПУЛЬСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

© 2024 г. Д. В. Зайцева<sup>a,\*</sup> М. А. Каллистратова<sup>a</sup>, В. С. Люлюкин<sup>a, b</sup>, Р. Д. Кузнецов<sup>c</sup>, Д. Д. Кузнецов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., д. 3, 119017, Москва, Россия

<sup>b</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,  
ул. 2-я Бауманская, д. 5, к. 1, 105005, Москва, Россия

<sup>c</sup>Финский метеорологический институт, Динамикум, площадь Эрик Пальмен, 1, FI-00101 Хельсинки, Финляндия

\*e-mail: zaycevad@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.11.2023 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

В работе представлены результаты анализа влияния регистрируемых содаром в атмосферном пограничном слое субмезомасштабных внутренних гравитационных волн (ВГВ) на измеряемые в приземном слое характеристики турбулентности. Для этого были использованы данные измерений, проводимых в сельской местности в Подмосковье. Посредством визуального анализа содарных эхограмм идентифицировались ВГВ двух классов: внутренние гравитационно-сдвиговые волны (ВГСВ) типа волн Кельвина-Гельмгольца и волны плавучести (ВП). Для 28 эпизодов ВГСВ и 10 эпизодов ВП по данным пульсационных измерений ультразвуковым термометром-анемометром, расположенным на мачте высотой 56 м, были рассчитаны турбулентная кинетическая энергия, а также потоки тепла и импульса. Были исследованы изменения указанных характеристик, сопутствующие прохождению цугов ВГВ, сделаны количественные оценки этих изменений, а также проведено сопоставление степени влияния ВГСВ и ВП.

**Ключевые слова:** содар, устойчиво-стратифицированный атмосферный пограничный слой, внутренние гравитационные волны, волны Кельвина-Гельмгольца, волны плавучести, турбулентность, поток тепла, поток импульса, турбулентная кинетическая энергия

DOI: 10.31857/S0002351524040029 EDN: JHJSGY

### ВВЕДЕНИЕ

В устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое (УАПС) при помощи дистанционных методов (радары, содары, лидары) регулярно наблюдаются субмезомасштабные волнообразные структуры с периодами от десятка секунд до нескольких десятков минут (например, [Камардин и др., 2014; Люлюкин и др., 2015; Banakh and Smalikho, 2023; Petenko et al., 2023; Зайцева и др., 2023]). Такие волнообразные структуры обычно атрибутируют как проявление внутренних гравитационных волн (ВГВ). ВГВ могут сопровождаться изменением турбулентного режима УАПС вследствие различных процессов: обрушения волн, нелинейного взаимодействия с фоновым течением, модулирования профилей ветра и температуры и т.п. (см., например, обзор [Sun et al., 2015a] и ссылки в нём).

Анализ членов, входящих в уравнение Тейлора-Гольдштейна, описывающего волны в линейном приближении, позволяет выделить некоторые механизмы, ответственные за возникновение волновых движений. По терминологии обзора [Carpenter, 2012] можно выделить волны плавучести (ВП) и вихревые волны. В отсутствие завихренности или сдвига ветра основной механизм генерации волн в устойчиво стратифицированном потоке — наличие плавучести, приводящей к возникновению возвращающей силы в случае отклонения воздушных частиц от статического равновесия. Вихревые волны могут возникать из-за волновой неустойчивости при ненулевой завихренности течения. К вихревым волнам, возникающим в устойчиво стратифицированном сдвиговом потоке также относят так называемые валы Кельвина-Гельмгольца (ВКГ), часто наблюдаемые в УАПС. В настоящей работе такой класс волновых движе-

ний мы будем обозначать как внутренние гравитационно-сдвиговые волны (ВГСВ).

Отметим, что наблюдаемые в УАПС периодические движения, как правило, являются нелинейными, хотя условия их возникновения и некоторые параметры удовлетворительно описываются линейной теорией. Зачастую регистрируемые цуги волн содержат небольшое количество колебаний с меняющимися амплитудой и/или частотой. На содарных и лидарных эхограммах регулярно наблюдаются периодические структуры различной вертикальной формы, из которых можно выделить случаи, предположительно относящиеся к вышеупомянутым классам ВП и ВГСВ [Люлюкин и др., 2015; Petenko et al., 2023; Зайцева и др., 2023; Banakh and Smalikho, 2023].

В последние два десятилетия, в связи с проблемами краткосрочного локального прогноза погоды высокого разрешения, усилился интерес к исследованиям взаимодействия волн и турбулентности в УАПС [Sun et al., 2004; Nappo et al., 2008; Viana et al., 2009; Durden et al., 2013; Sun et al., 2015b; Cava et al., 2015; Зайцева и др., 2018; Zaitseva et al., 2022; Banakh and Smalikho, 2023 и др.]. В работе [Sun et al., 2015b] показано, что прохождение ВП может приводить к модулированию профилей ветра и температуры и таким образом влиять на силу и знак потоков тепла и импульса. Кроме того, из-за волновых колебаний скорость ветра может превысить критическое значение, соответствующее переключению между режимами слабой и сильной турбулентности. Наиболее известный механизм передачи энергии от волновых движений к турбулентным в УАПС – обрушение волн вследствие развития конвективной или сдвиговой неустойчивости, но также возможны нелинейные взаимодействия между совпадающими волновыми и наибольшими турбулентными масштабами (см., например, обзор [Sun et al., 2015a] и ссылки в нём). Прохождение волны может сопровождаться процессами, приводящими к подавлению части спектра потоков тепла и импульса [Viana et al., 2009], увеличению спектра вертикальной компоненты скорости ветра и изменению его наклона [Banakh and Smalikho, 2023]. В экспериментальных [Vercauteren and Klein, 2015; Durden et al., 2013] и модельных [Rogai et al., 2014] исследованиях было показано, что периодические структуры, регистрируемые в сильно устойчивом АПС, оказывают большее влияние, чем в слабо устойчи-

вом АПС. Численное моделирование [Jiang, 2021] показало, что интенсивность турбулентности увеличивается по мере роста валов ВКГ, ещё до начала их обрушения, причём рост кинетической энергии возмущений (в несколько раз) и потоков происходит не только внутри волнового слоя, но и под ним. Стандартные пульсационные методы расчёта характеристик турбулентности, применённые к временным рядам с волновыми колебаниями, могут привести к изменениям в оценках дисперсий компонент скорости ветра (до 60%) и турбулентных потоков, что было подтверждено измерениями вблизи земной поверхности [Nappo et al., 2008; Cava et al., 2015] и на высотах до 300 метров [Durden et al., 2013].

Цель представляемой работы – количественная оценка степени влияния цугов ВГСВ и ВП в УАПС на измеряемые традиционным пульсационным методом характеристики турбулентности в приземном слое. Для этого были использованы измерения, проводимые в Московской области на Звенигородской научной станции (ЗНС) Института физики атмосферы (ИФА РАН).

В разделе 2 описаны использованные в работе измерения и методы обработки данных. В разделе 3 представлены примеры анализа двух эпизодов волновой активности. Раздел 4 посвящён результатам статистического анализа результатов, полученных для 38 эпизодов ВГВ.

## ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Параметры ВГВ определялись по высотно-временным развёрткам эхо-сигнала содара (эхограммам). Средние профили скорости ветра и температуры измерялись с помощью содара и микроволнового температурного профилемера соответственно. Характеристики турбулентности в приземном слое рассчитывались по данным локальных измерений ультразвуковым термометром-анемометром.

Трёхантенный доплеровский содар серии ЛА-ТАН-3, разработанный в ИФА [Кузнецов, 2007], 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 с разрешением 20 с по времени (цикл зондирования) и 20 м по высоте. Невысокое разрешение этих данных связано

с тем, что они получены с помощью многофункционального стационарного содара, который несколько лет использовался для климатологических исследований в режиме непрерывного круглосуточного мониторинга АПС. Точность измерения горизонтальных компонент скорости ветра составляла  $\pm 0.5$  м/с, а вертикальной компоненты —  $\pm 0.1$  м/с.

Для измерений температуры воздуха в УАПС использовался микроволновый температурный профилемер МТР-5, данные которого обрабатывались по методике, разработанной в ФГБУ «ЦАО» и ФГБУ «Гидрометцентр РФ» [Кадыгров и др., 2015]. Профилемер измерял профили температуры в диапазоне высот от 0 до 600 м с разрешением 5 мин по времени и 50 м по высоте.

Для расчёта характеристик турбулентности были использованы микрометеорологические измерения компонент скорости ветра и акустической температуры, производимые при помощи ультразвукового термометра-анемометра марки USA-1 (так называемого соника). Соник был расположен на верхушке мачты высотой 56 м и производил измерения с частотой 10 Гц. Для каждого рассматриваемого эпизода временные ряды были предварительно вручную проверены на наличие ошибок и пробелов в измерениях. Для фрагментов записей длиной от 1.5 до 4 ч (в зависимости от длительности эпизода) была произведена корректировка направления осей методом двойного поворота (см., например, [Kaimal and Finnigan, 1994]).

Для аккуратного вычисления характеристик турбулентности необходимо выбрать время осреднения  $t_{cp}$  так, чтобы оно соответствовало положению минимума в спектре движений (спектральному провалу), который отделяет турбулентные флуктуации от крупномасштабных. В устойчиво стратифицированном течении выбор  $t_{cp}$  осложняется изменениями положения спектрального провала (связанными с нестационарностью), или же его отсутствием (в случае одновременного существования волн и турбулентности с одинаковыми масштабами). В настоящее время для построения спектральных разложений часто используется метод кратномасштабного разложения потоков (MultiResolucional Flux Decomposition, MRFD). Подробное описание метода расчётов спектров можно найти в работах [Howell and Mahrt, 1997; Vickers and Mahrt, 2003].

Были рассчитаны широко употребляемые характеристики турбулентности — турбулентная кинетическая энергия (ткэ), поток тепла ( $q$ ) и поток импульса ( $\tau$ ) (см., например, [Kaimal and Finnigan, 1994]):

$$\text{ткэ} = 0.5 \langle u'^2 + v'^2 + w'^2 \rangle \quad (1)$$

$$q = c_p \rho \langle w't' \rangle \quad (2)$$

$$\tau = \rho \langle u'w' \rangle \quad (3)$$

где  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ ,  $t'$  — отклонения от среднего компонент скорости ветра и температуры, угловые скобки обозначают осреднение по времени,  $c_p = 1007$  Дж/кг·К,  $\rho = 1.23$  кг/м<sup>3</sup>.

Время осреднения было выбрано равным 1 мин (см. напр., [Sun et al., 2015b; Vercauteren and Klein, 2015]). Для разных эпизодов волновой активности масштаб времени  $z/u_*$  мог сильно отличаться — от 70 с до 900 с. Здесь  $z=56$  м — высота расположения термометра-анемометра;  $u_* = \sqrt{-\langle u'w' \rangle}$  с осреднением 30 минут.

В качестве количественной оценки степени изменения характеристик турбулентности, сопутствующего прохождению волн, рассматривались отношения  $r$  средних значений ткэ,  $q$  и  $\tau$  во время наблюдения цуга волн к средним значениям этих параметров непосредственно перед волновым эпизодом:

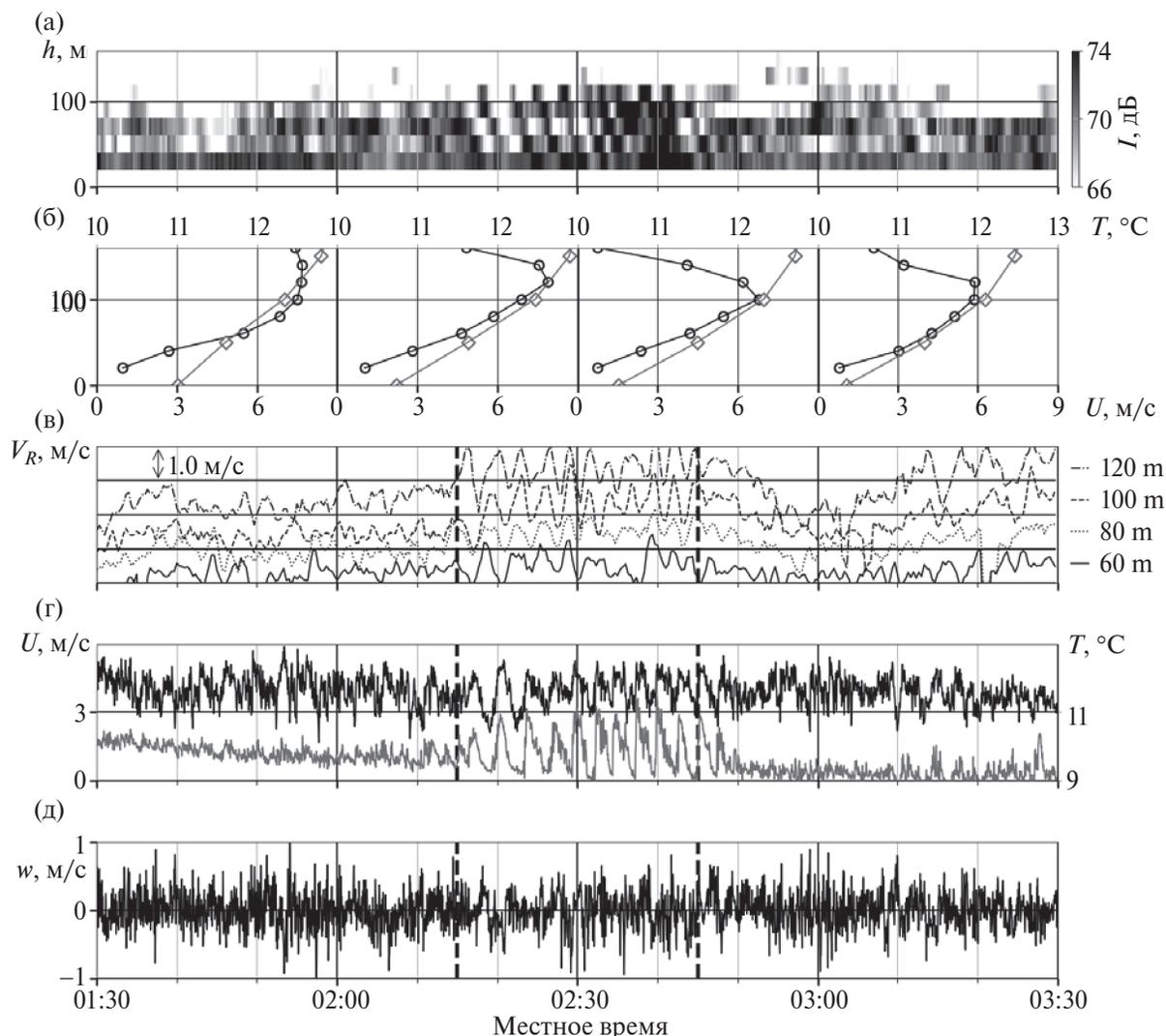
$$r = \frac{\langle X \rangle_2}{\langle X \rangle_1} \quad (4)$$

где  $X$  — поток тепла, импульса или кинетическая энергия, угловые скобки обозначают среднее значение по промежутку времени до (индекс 1) и во время (индекс 2) наблюдения эпизода.

Вместе с отношением  $r$  по содарным данным и данным МТР-5 анализировались изменения вертикальных профилей ветра и температуры, осреднённых по 30 минутам, а также рассчитываемое на их основе градиентное число Ричардсона в нижних 100 м:

$$R_i = \frac{g}{\langle T \rangle} = \frac{\langle \Delta T / \Delta z \rangle + \gamma_a}{(\langle \Delta U / \Delta z \rangle)^2} \quad (5)$$

где  $\langle T \rangle$ ,  $\langle \Delta T / \Delta z \rangle$  — средние значения температуры и её вертикального градиента в нижних 100 м,  $\langle \Delta U / \Delta z \rangle$  — среднее значение вертикального сдвига горизонтального ветра или в нижних 100 м, или ниже ядра низкоуровневого струйного течения,  $g = 9.81$  м с<sup>-2</sup>,  $\gamma_a = 9.8 \cdot 10^{-3}$  К/м.



**Рис. 1.** Эпизод ВГСВ 24.04.2012. (а) Содарная эхограмма. (б) профили средней скорости ветра (чёрные линии, нижняя ось абсцисс) и температуры (серые линии, верхняя ось абсцисс). Время осреднения 30 минут. (в) радиальная скорость ветра по измерениям наклонной антенны на высотах 60, 80, 100 и 120 м. Временные ряды были сдвинуты относительно друг друга для наглядности. (г) горизонтальная скорость ветра (черная линия) и акустическая температура (серая линия). (д) вертикальная скорость ветра. По оси абсцисс везде кроме (б) отложено местное время. Панели (г) и (д) построены по данным измерений соника (высота 56 м). Ко временным рядам эхо-сигнала и радиальной скорости (панели (а) и (в)) для наглядности было применено скользящее осреднение по 1 минуте. Верти-

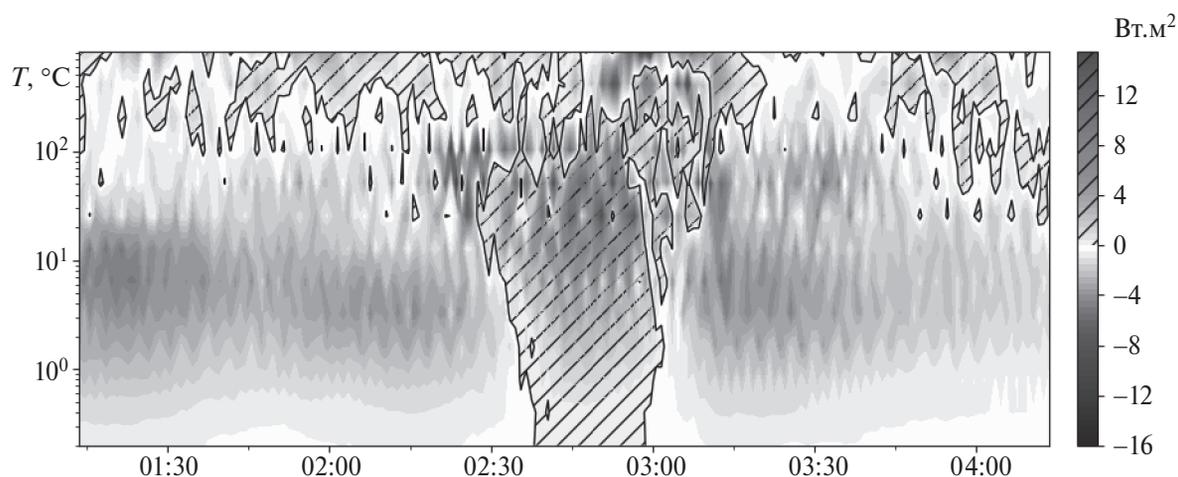
Исследованные в работе эпизоды волновой активности были отобраны из каталога волновых движений, наблюдавшихся на ЗНС в 2008–2015 гг. [Зайцева и др., 2023]. Выбирались эпизоды, соответствующие следующим критериям:

1. эпизод наблюдался с апреля по сентябрь (более 90% ВП были зарегистрированы именно в эти месяцы);
2. время начала и окончания эпизода на эхограмме чётко определяемы;
3. высота нижней границы слоя волновой активности не превышала 100 м;
4. длительность эпизода составляла от 20 до 120 мин.

Применение перечисленных критериев существенно сократило число рассматриваемых случаев. В первую очередь это связано с ограничением положения нижней границы волнового слоя: настройки содара не позволяли достоверно регистрировать периодические структуры с малыми масштабами и низко расположенным слоем волновой активности.

#### ПРИМЕРЫ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПРИСУТСТВИИ ВОЛН

На рис. 1 представлены синхронные измерения содара и соника, произведённые во время прохождения цуга ВГСВ (24.04.2012). Эпизод ре-



**Рис. 2.** Эпизод ВГСВ 24.04.2012. Кратномасштабные разложения потока тепла. По оси абсцисс отложено местное время, по оси ординат — масштаб времени (обратный частоте). Шкала представлена справа. Спектры рассчитаны

гистрировался на эхограмме с 02:15 до 02:50. Колебания с периодом около 3 мин наблюдались на содарной эхограмме, в содарных измерениях радиальной скорости (по измерениям наклонных антенн), а также в измерениях горизонтальной скорости и акустической температуры соником на высоте 56 м. Во временных рядах вертикальной скорости ветра (и по данным содара, и по данным соника) наблюдалось несколько колебаний в начале и конце эпизода. Среднее число Ричардсона до эпизода составляло  $\sim 0.16$ , во время —  $\sim 0.17$ , а после увеличилось до  $\sim 0.22$ . Частота Брента-Вяйсяля составляла  $\sim 3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , частота колебаний —  $1/180 \sim 6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Масштаб времени  $z/u^*$  составлял  $\sim 300 \text{ с}$  до начала эпизода и  $\sim 600 \text{ с}$  во время.

В подавляющем большинстве исследованных случаев ВГСВ во временных рядах ветра и температуры, измеренных на мачте, не регистрировались колебания, соответствующие наблюдаемым на эхограмме. В представленном на рис. 1 эпизоде нижняя граница слоя волновой активности составляла около 40 м, что, по-видимому, и позволило регистрировать колебания в измерениях на мачте.

На рис. 2 представлено спектральное разложение потока тепла для рассматриваемого случая. Для наглядного представления изменений спектров со временем, представлены расчёты через каждую минуту (так же, как в работе [Viana et al., 2009]). Каждый спектр рассчитывался по ряду длиной  $\sim 27$  минут ( $2^{14}$  точек). До прохождения цуга ВГСВ (до 02:15) поток тепла был отрицателен на всех частотах выше  $\sim 0.04 \text{ Гц}$  (с масштаб-

ми менее  $\sim 25 \text{ с}$ ). В начале эпизода наблюдался всплеск отрицательных значений потока тепла, с наибольшей интенсивностью на частотах  $\sim 0.02\text{--}0.01 \text{ Гц}$  ( $50\text{--}100 \text{ с}$ ). Вскоре на всех частотах выше  $\sim 0.01 \text{ Гц}$  (менее  $100 \text{ с}$ ) знак потока сменился на положительный. После прохождения цуга ВГСВ поток тепла вновь стал отрицательным, однако, приближался к нулю уже на меньших частотах ( $\sim 0.01 \text{ Гц}$ ), чем до начала эпизода ( $\sim 0.04 \text{ Гц}$ ).

На рис. 3 представлены временные ряды потоков тепла и импульса, а также турбулентной кинетической энергии. Отношения  $r$  оказались равны: для ткэ  $r = 0.7$ , для вертикального потока тепла ( $q$ )  $r = 0.8$ , для потока импульса ( $\tau$ )  $r = 0.4$ .

На рис. 4 представлены синхронные измерения, произведённые содаром и соником во время прохождения цуга ВП (11.06.2009). Колебания с периодом 5–6 минут наблюдались с 21:30 до 22:00 на содарной эхограмме, а также во временных рядах горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра, и в измерениях акустической температуры. Началу регистрируемого на эхограмме эпизода предшествовало резкое снижение температуры и усиление ветра (в 20:45–21:15), а также несколько колебаний ветра и температуры (в 21:15–21:30). Число Ричардсона до, во время и после эпизода составляло соответственно  $\sim 0.22$ ,  $0.84$ ,  $0.28$ . Частота Брента-Вяйсяля составляла  $\sim 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , частота колебаний составляла  $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Масштаб времени  $z/u^*$  составил  $\sim 130 \text{ с}$  до начала эпизода и  $\sim 500 \text{ с}$  во время.

На рис. 5 представлено спектральное разложение потока тепла для рассматриваемого случая. До начала эпизода поток тепла принимал отри-

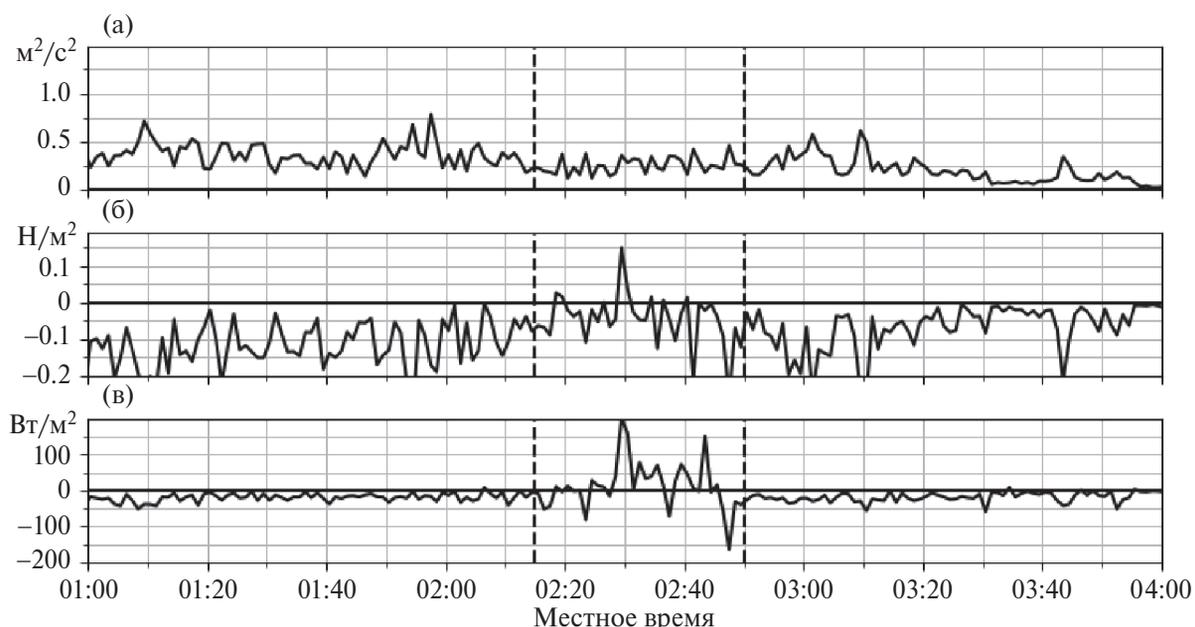


Рис. 3. Эпизод ВГСВ 24.04.2012. Временные ряды (а) ткэ, (б) потока импульса и (в) потока тепла, рассчитанные по данным измерений соника с осреднением в 1 минуту. Вертикальные линии указывают на время начала и окончания

цательные значения почти на всех частотах, наибольший вклад вносили структуры с частотами менее  $\sim 0.005$  Гц (масштабы более 200 с). После прихода цуга на частотах менее  $\sim 0.04$  Гц (масштабы более  $\sim 25$  с) знак потока сменился на положительный. В это же время вклад структур с более высокими частотами, сохранив отрицательные значения, снизился по абсолютным значениям. После окончания эпизода на всех частотах поток тепла постепенно снизился.

На рис. 6 представлены временные ряды ткэ, а также потоков тепла и импульса для цуга волн плавучести. Прохождению цуга сопутствовал резкий, но кратковременный всплеск турбулентности. Отношения  $r$  оказались равны: для ткэ  $r = 6.1$ , для вертикального потока тепла ( $q$ )  $r = 0.7$ , для потока импульса ( $\tau$ )  $r = 23$ . Низкое отношение  $r$  для потока тепла обусловлено тем, что в первую половину эпизода наблюдался положительный вертикальный поток, а во вторую – отрицательный,

из-за чего среднее значение потока тепла во время регистрации цуга оказалось мало.

#### СТАТИСТИКА ВЛИЯНИЯ ВОЛН НА ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Было исследовано 38 эпизодов волновой активности: 28 цугов ВГСВ и 10 цугов ВП. Для всех случаев были рассчитаны ткэ и потоки импульса, для 23 цугов также были рассчитаны потоки тепла.

После анализа метеорологических условий, поведения характеристик турбулентности и степени их изменения исследованные случаи были разделены на две группы. К первой группе были отнесены эпизоды, в которых изменения ткэ не превышали 20% (т.е.  $|r| < 1.2$ ), а также цуги, для которых невозможно сделать однозначного вывода о степени их влияния из-за меняющихся условий. Все остальные случаи были отнесены ко второй группе: в общей сложности 10 эпизодов ВГСВ и 10 эпизодов ВП.

Таблица 1. Средние характеристики турбулентности и степень их усиления  $\gamma$  для 19 эпизодов ВГВ

Диапазон значений						
	ткэ, $M^2 c^{-2}$	$r$	$\tau$ , $H M^{-2}$	$ r $	$q$ , $Вт M^{-2}$	$ r $
ВГСВ	0.09 ÷ 0.63	1.4 ÷ 2.9	-0.19 ÷ -0.01	2.3 ÷ 13.4	-21 ÷ -8	1.5 ÷ 3.2
ВП	0.13 ÷ 0.66	1.4 ÷ 16.8	-0.13 ÷ 0.01	1.3 ÷ 895	-28 ÷ 35	0.7 ÷ 33
Средние значения ( в скобках медианные значения)						
ВГСВ	$0.23 \pm 0.16$	$2.4 \pm 0.6$ (2.4)	$-0.07 \pm 0.05$	$5.6 \pm 3.8$ (3.6)	$-12 \pm 5$	$2.3 \pm 0.7$ (2.2)
ВП	$0.33 \pm 0.17$	$6.8 \pm 4.8$ (5.7)	$-0.06 \pm 0.05$	$108.5 \pm 295.4$ (4.6)	$-14 \pm 15$	$4.0 \pm 2.4$ (4.5)

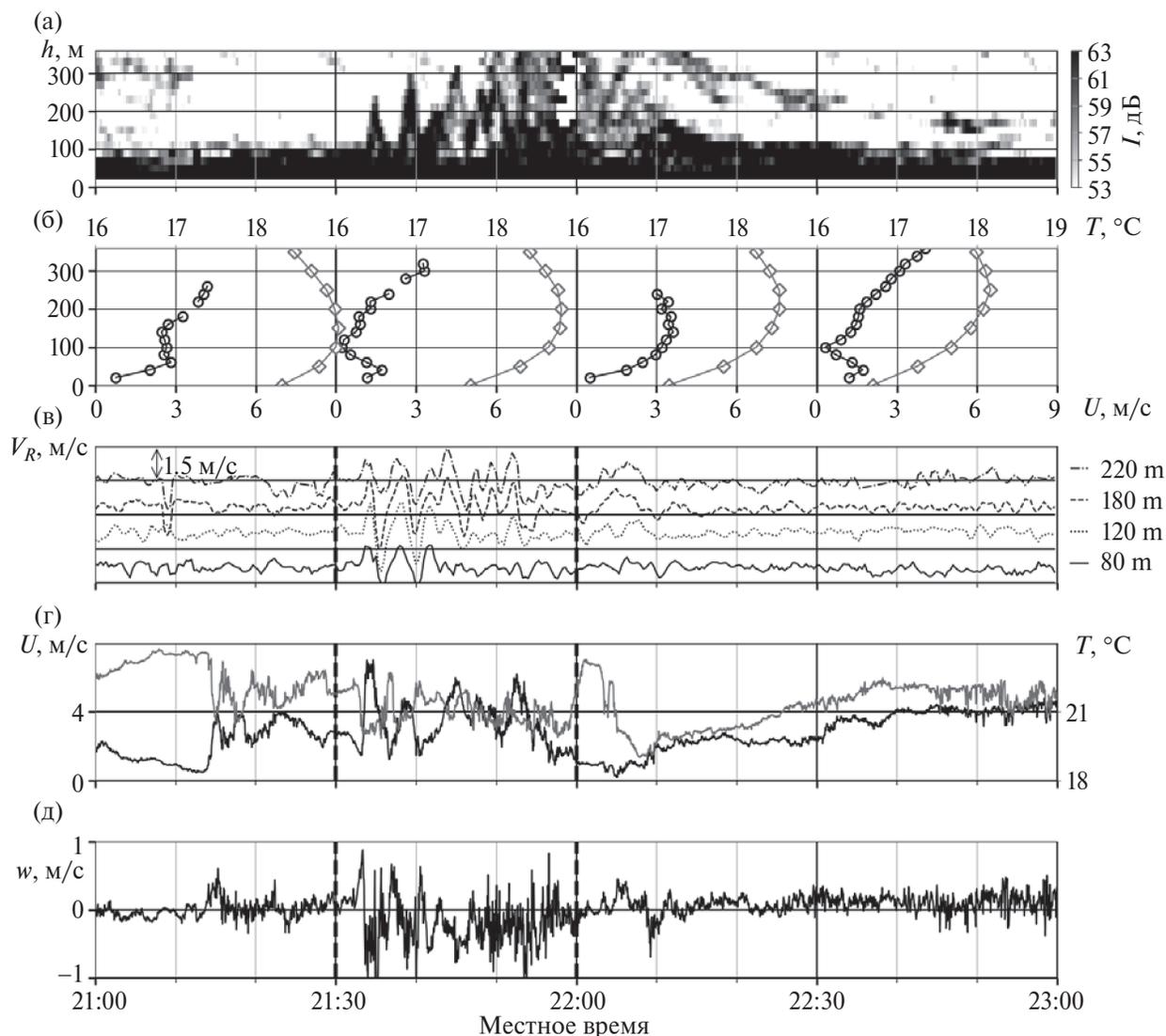


Рис. 4. То же что на рис. 1, но для эпизода ВП 11.06.2009.

Диапазон значений характеристик турбулентности во время наблюдения эпизодов из второй группы и степени их усиления представлены в табл. 1. Разброс значений ткэ и потока импульса  $\tau$  схожи для обоих классов волн. Четырём цугам ВП сопутствовали положительные потоки тепла. Диапазоны значений отношений  $r$  для цугов ВП шире, чем для цугов ВГСВ. Значения характеристик турбулентности при наблюдении цугов ВГСВ и ВП оказались, в среднем, близки, а степени усиления  $r$ , сопутствующие прохождению цугов ВП, заметно выше, чем для цугов ВГСВ.

На рис. 7 представлена диаграмма рассеяния степени усиления  $|r|$  рассмотренных характеристик турбулентности и числа Ричардсона  $Ri$ . Для эпизодов ВП коэффициент линейной корреляции  $R$  степени усиления ткэ и  $Ri$  составил 0.78, для эпи-

зодов ВГСВ — 0.49. Коэффициент линейной корреляции усиления потока импульса  $|r|$  и  $Ri$  для ВП (при исключении одного эпизода с очень высоким  $r$ ) составил 0.53, а для пары  $\tau - Ri$  составило 0.77 (без исключения эпизодов). При этом корреляция значений  $\tau$  до эпизода с числом Ричардсона (ВП) составила 0.44. Для эпизодов ВГСВ степени усиления  $|r|$  и  $Ri$  показывают слабую связь (с коэффициентами корреляции  $\sim 0.3-0.4$ ). Также прослеживается тенденция к увеличению степени усиления ткэ с уменьшением значения ткэ до эпизода (коэффициенты корреляции для ВГСВ и ВП составили соответственно  $-0.53$  и  $-0.66$ ), в то время как связь значения ткэ во время наблюдения эпизода со степенью усиления не наблюдается.

Измеряемые в УАПС характеристики турбулентности варьируются в широком интервале

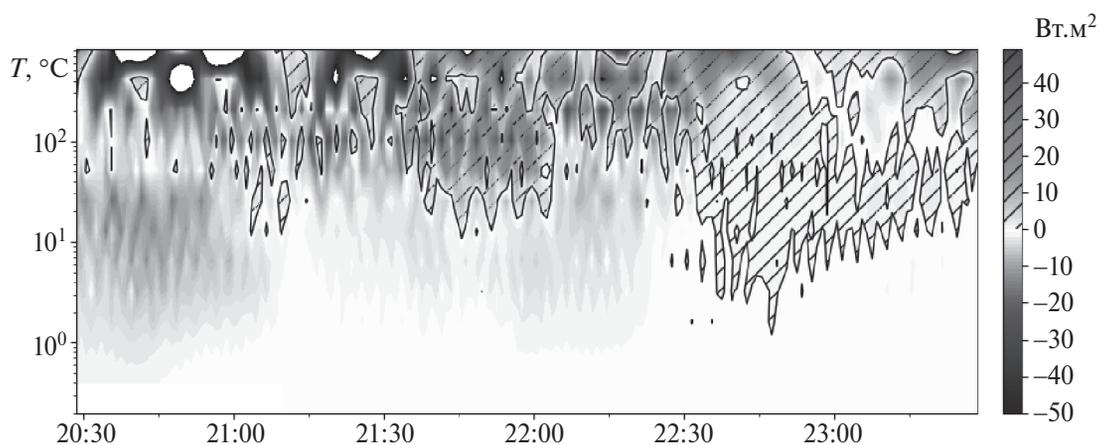


Рис. 5. То же, что на рис. 2, но для эпизода ВП 11.06.2009.

и могут отличаться на несколько порядков. Например, в работах [Mahrt and Vickers, 2006; Vanta et al., 2007] для случаев от экстремально слабой до сильной турбулентности в УАПС были рассчитаны значения потока импульса  $\tau \sim 10^{-3} \div 10^0 \text{ Н м}^{-2}$  и потока тепла  $q \sim 0.1 \text{ Вт м}^{-2} \div 100 \text{ Вт м}^{-2}$ . В работе [Sun et al., 2012] слабо турбулизованному УАПС соответствовали ткэ не превышающие нескольких десятых  $\text{м}^2\text{с}^{-2}$ , а сильно турбулизованному — от десятых долей до нескольких единиц  $\text{м}^2\text{с}^{-2}$ . Большие значения ткэ также регистрируются, например, в работах [Potekaev et al., 2021; Shamanaeva et al., 2018] показано, что в нижних 50 м в ночное время ткэ может возрастать до  $50 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$ .

Представленные в разных работах оценки рассчитанных во время прохождения волн характеристик турбулентности на высотах 10–50 м разнятся как по значению, так и по знаку потоков. Например, в работе [Durden et al., 2013] отмечено, что на высоте 34 м потоки тепла для двух эпизодов волновой активности, отличавшихся степенью устойчивости УАПС, составляют  $+2 \text{ Вт м}^{-2}$  и  $-39 \text{ Вт м}^{-2}$ , потоки импульса по модулю равны  $5 \cdot 10^{-3}$  и  $0.3 \text{ Н м}^{-2}$ , а ткэ равны  $5 \cdot 10^{-2}$  и  $1.2 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$ . В экспериментальных работах [Sun et al., 2004; Nappo et al., 2008; Cava et al., 2015] и при моделировании [Jiang, 2021] разброс получаемых значений не превышает вышеуказанного.

В работе [Cava et al., 2015] обнаружено, что отфильтровывание вклада волны в рассчитываемые турбулентные потоки в среднем снижает их на 20–50%, а снижение ткэ может достигать 60%. С другой стороны, в работе [Durden et al., 2013] на примере двух волновых эпизодов было показано, что при сильной устойчивости волновой вклад в по-

токи и ткэ составлял  $\sim 20\text{--}50\%$ , а при слабой  $\sim 5\%$ . Эти результаты указывают на то, что степень воздействия волн зависит от того, насколько интенсивна фоновая турбулентность.

При численном моделировании цуга ВКГ в устойчиво стратифицированном пограничном слое при положительном сдвиге ветра [Jiang, 2021] увеличение кинетической энергии возмущений составило 2.1 раза, что согласуется с нашими оценками. Кроме того, в работе [Jiang, 2021] показано, что высота расположения слоя волновой активности может повлиять на степень воздействия цуга на пограничный слой, что может объяснить большой разброс полученных нами оценок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным измерений в пригородной местности был проведён анализ влияния 28 цугов внутренних гравитационно-сдвиговых волн и 10 цугов волн плавучести в УАПС на характеристики турбулентности, измеряемые в приземном слое. Эпизоды волновой активности регистрировались и классифицировались путём визуального анализа содарных эхограмм [Зайцева и др., 2023]. Значения турбулентной кинетической энергии, а также потоков тепла и импульса рассчитывались по данным пульсационных измерений на мачте. В качестве количественной меры степени изменения указанных характеристик во время прохождения волн рассматривались отношения среднего значения величин во время наблюдения волновой активности к значению, осреднённое по 30 или 60 минутному промежутку времени до начала эпизода.

Рассмотренные эпизоды были разделены на две группы: 1) случаи, в которых изменение ткэ

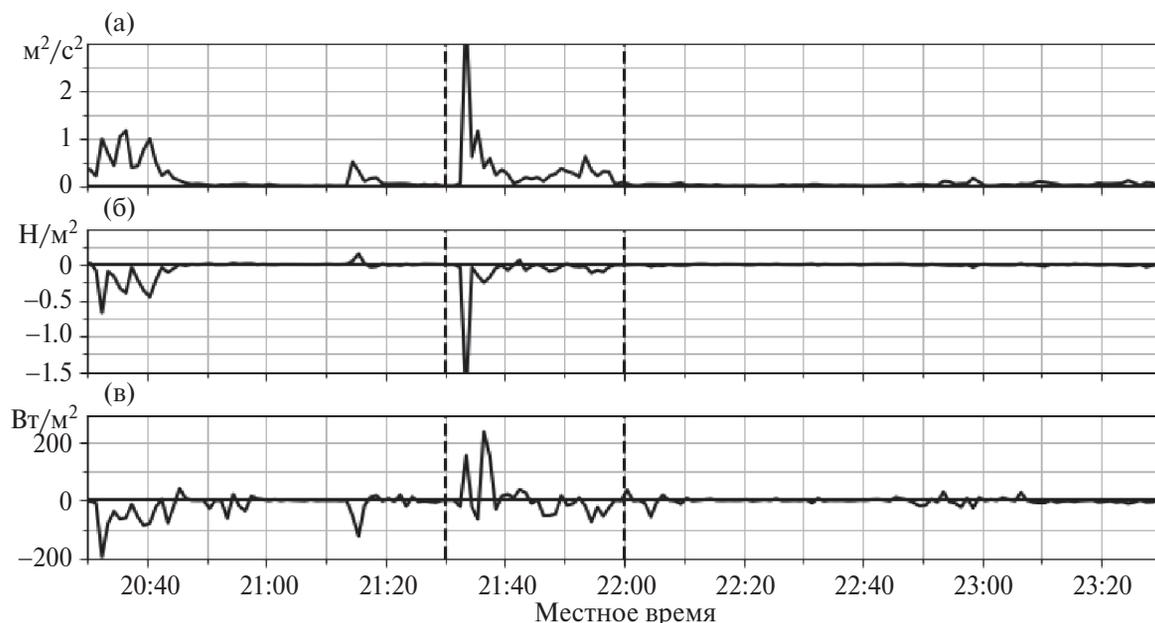


Рис. 6. То же, что на рис. 3, но для эпизода ВП 11.06.2009.

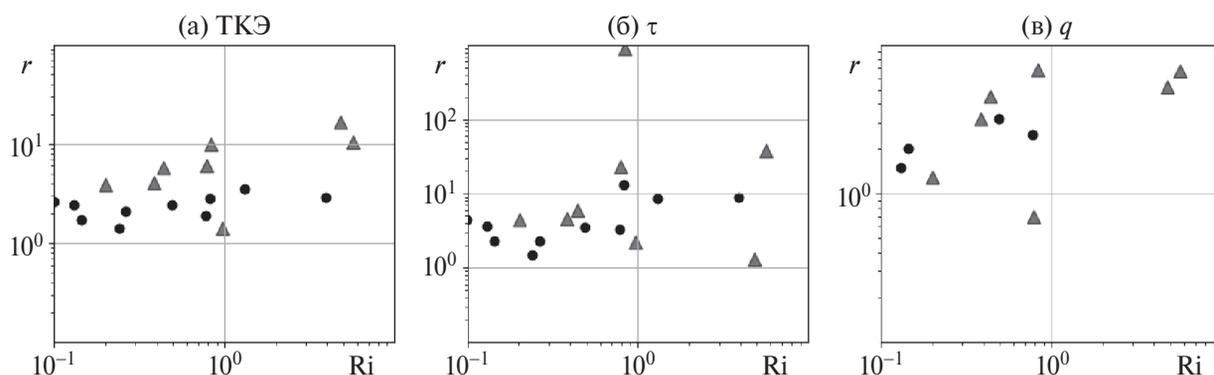


Рис. 7. Диаграмма рассеяния  $Ri$  и  $r$  для ТКЭ (а),  $q$  (б) и  $\tau$  (в). Кружками отмечены значения для ВГСВ, треугольниками — для ВП.

составило менее 20%, а также эпизоды, для которых невозможно сделать однозначного вывода о степени влияния; 2) остальные случаи, в которых ТКЭ увеличилось более, чем на 20%. Только 10 из 28 цугов ВГСВ и 9 из 10 цугов ВП были отнесены ко 2 группе. Для этих 19 эпизодов были сделаны количественные оценки значений характеристик турбулентности и их изменений. Диапазоны исследованных величин оказались широкими. В среднем значения характеристик турбулентности близки для цугов обоих классов. Однако, степени усиления, связанные с прохождением цугов ВП, в среднем выше.

Было замечено, что для цугов ВП повышение числа Ричардсона происходит одновременно с повышением потока импульса и степени усиления турбулентной кинетической энергии. Для

цугов ВГСВ наблюдается более слабая корреляция характеристик турбулентности и степени их изменения с числом Ричардсона. Для цугов обоих классов большее увеличение турбулентной кинетической энергии наблюдалось в случаях с более низким значением ТКЭ до прохождения цугов. В то же время связи между степенью усиления и значением ТКЭ во время наблюдения эпизода не обнаружено.

Увеличение измеряемых характеристик турбулентности, с одной стороны, может быть связано с реальным усилением турбулентного обмена, вызываемым воздействием волновых цугов. С другой стороны, при наличии нестационарных колебаний во временных рядах ветра и температуры возникают трудности с определением «истинно турбулентных» флуктуаций и их отделением от

нетурбулентных вариаций. Даже выбор времени осреднения, заведомо меньшего периода колебаний [Nappo et al., 2008] не обязательно избавляет от ошибок, например, при расчёте турбулентной кинетической энергии, а также потоков импульса и скаляров [Cava et al., 2015].

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН № FMWR-2022–0017.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С. и др. Субмезомасштабные волнообразные структуры в атмосферном пограничном слое и их параметры по данным содарных измерений в Подмоскowie // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 3. С. 275–285.
- 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.
- 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. 218–218.
- Banakh, V. A., Smalikho, I. N. The impact of internal gravity waves on the spectra of turbulent fluctuations of vertical wind velocity in the stable atmospheric boundary layer // Remote Sensing. 2023. V.15. № 11. 2894.
- Banta R.M., Mahrt L., Vickers D. et al. The very stable boundary layer on nights with weak low-level jets // J. Atmos. Sci. 2007. V. 64. № 9. P. 3068–3090.
- Carpenter J.R., Tedford E.W., Heifetz E. et al. Instability in stratified shear flow: Review of a physical interpretation based on interacting waves // Appl. Mech. Rev. 2012. V. 64. № 6. 060801
- Cava D., Giostra U., Katul G. Characteristics of gravity waves over an Antarctic Ice sheet during austral summer // Atmosphere. 2015. V. 6. № 9. P. 1271–1289.
- 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. V. 10. № 12. P. 8433–8443.
- Jiang Q. Impact of Elevated Kelvin–Helmholtz Billows on the Atmospheric Boundary Layer // J. Atmos. Sci. 2021. V. 78. № 12. P. 3983–3999.
- Howell J.F., Mahrt L. Multiresolution flux decomposition // Boundary-Layer Meteorol. 1997. V. 83. № 1. P. 117–137.
- Kaimal J.C., Finnigan J.J. Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement. New York: Oxford University Press, 1994. 289 P.
- Mahrt L., Vickers D. Extremely weak mixing in stable conditions // Boundary-Layer Meteorol. 2006. V. 119. P. 19–39.
- Nappo C.J., Miller D.R., Hiscox A.L. Wave-modified flux and plume dispersion in the stable boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 2008. V. 129. № 2. P. 211–223.
- Petenko I., Casasanta G., Kallistratova M. et al. Kelvin–Helmholtz billows in the rising turbulent layer during morning evolution of the abl at Dome C, Antarctica // Boundary-Layer Meteorol. 2023. V. 187. P. 163–192.
- Potekaev A., Shamaneva L., Kulagina V. Spatiotemporal dynamics of the kinetic energy in the atmospheric boundary layer from minisodar measurements // Atmosphere. 2021. V. 12. № 4. 421.
- Rorai C., Mininni P.D., Pouquet A. Turbulence comes in bursts in stably stratified flows // Physical Review E. 2014. V. 89. № 4. P. 043002.
- Shamanaeva L.G., Potekaev A. I., Krasnenko N. P. et al. Dynamics of the kinetic energy in the atmospheric boundary layer from the results of minisodar measurements // Russ. Phys. J. 2018. V. 61. P. 2282–2287.
- Sun J., Lenschow D. H., Burns S. P. et al. Atmospheric disturbances that generate intermittent turbulence in nocturnal boundary layers // Boundary-Layer Meteorol. 2004. V. 110. P. 255–279.
- Sun J., Mahrt L., Banta R. M. et al. Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during CASES-99 // J. Atmos. Sci. 2012. V. 69. № 1. P. 338–351.
- Sun J., Nappo C.J., Mahrt L. et al. Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer // Reviews of geophysics. 2015a. V. 53. № 3. P. 956–993.
- Sun J., Mahrt L., Nappo C. et al. Wind and temperature oscillations generated by wave-turbulence interactions in the stably stratified boundary layer // J. Atmos. Sci. 2015b. V. 72. № 4. P. 1484–1503.
- Vercauteren N., Klein R. A clustering method to characterize intermittent bursts of turbulence and interaction with submesoscale motions in the stable boundary layer // J. Atmos. Sci. 2015. V. 72. № 4. P. 1504–1517.
- 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.
- Vickers D., Mahrt L. The cospectral gap and turbulent flux calculations // *J. Atmos. Oceanic Tech.* 2003. V. 20. № 5. P. 660–672.
- Zaitseva D., Kallistratova M., Lyulyukin V. et al. On the influence of internal gravity waves on the intensity of turbulence in the atmospheric boundary layer // *IOP Conf. Series Earth Environ. Sci.* 2022. V. 1040. № 1. P. 012034.

## THE INFLUENCE OF INTERNAL GRAVITY WAVES IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER ON TURBULENCE CHARACTERISTICS MEASURED BY THE EDDY COVARIANCE TECHNIQUE

D.V. Zaitseva<sup>1,\*</sup>, M.A. Kallistratova<sup>1</sup>, V.S. Luyluykin<sup>1,2</sup>, R. D. Kouznetsov<sup>3</sup>, D.D. Kuznetsov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>*Bauman Moscow State University, 2nd Baumanskaya, 5, 105005 Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Finnish Meteorological Institute, Erik Palménin aukio 1, FI-00101 Helsinki, Finland*

\*e-mail: zaycevadv@gmail.com

The paper presents the results of an analysis of the influence of submesoscale internal gravity waves (IGWs), registered with the help of a sodar in the atmospheric boundary layer, on turbulence characteristics measured in the surface layer. Data obtained in rural areas in the Moscow region were used. Two types of IGW were identified visually on sodar echograms: internal gravity-shear waves (IGSW) of the Kelvin-Helmholtz wave type and buoyancy waves (BW). For 28 episodes of IGSW and 10 episodes of BW, based on the data of eddy covariance measurements carried out with an ultrasonic thermometer-anemometer located on a mast 56 m high, turbulent kinetic energy, as well as heat and momentum fluxes were calculated. Alterations of these characteristics accompanying the passage of wave trains were investigated, particularly, quantitative estimates were made, and degree of influence of IGSW and BW on the turbulence was compared.

**Keywords:** sodar, stable atmospheric boundary layer, internal gravity waves, Kelvin-Helmholtz waves, buoyancy waves, turbulence, heat flux, momentum flux, turbulent kinetic energy