

УДК 534.2

АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В НИЖНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОТИВОГРАДОВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ПУШКИ

© 2024 г. И. П. Чунчузов^{а,*}, В. Г. Перепелкин^а, С. Н. Куличков^а, О. Е. Попов^а,
Г. В. Азизян^а, А. А. Варданян^б, Г. Е. Айвазян^б

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

^бНациональный политехнический университет Армении, 105 Теряна, Ереван, Армения

*e-mail: igor.chunchuzov@gmail.com

Поступила в редакцию 15.04.2024 г.

После доработки 11.08.2024 г.

Принята к публикации 02.09.2024 г.

Приведены результаты исследования влияния внутренних гравитационных волн (ВГВ) на пространственно-временную изменчивость атмосферного давления и скорости ветра в нижней тропосфере с помощью установленной в г. Талин (Армения) треугольной сети из трех микробарографов и противоградовой акустической пушки. Путем когерентного анализа флуктуаций давления, измеряемых в разных точках, обнаружены ВГВ, генерируемые грозowymi фронтами примерно за 5–6 ч до прохождения этих фронтов над сетью микробарографов. Изучены закономерности изменения с течением времени фазовых скоростей и направлений распространения ВГВ, являющихся предвестниками гроз. Показана возможность мониторинга ВГВ в тропосфере по временным флуктуациям времени пробега акустических импульсов вдоль лучей, соединяющих противоградовую пушку с разнесенными в пространстве акустическими приемниками. По формам и временам пробега акустических импульсов с ударным фронтом, рассеянных анизотропными флуктуациями скорости ветра и температуры в устойчиво стратифицированной нижней тропосфере, восстановлены вертикальные профили флуктуаций скорости ветра в определенных слоях нижней тропосферы, вплоть до высоты 800 м. Благодаря высокой разрешающей способности по высоте (порядка 1 м), используемого здесь метода импульсного акустического зондирования нижней тропосферы впервые получены вертикальные спектры анизотропных флуктуаций скорости ветра в диапазоне коротких вертикальных масштабов, от одного до десятков метров, и дана их теоретическая интерпретация.

Ключевые слова: устойчиво стратифицированный атмосферный пограничный слой, анизотропные флуктуации, импульсное акустическое зондирование, тонкая структура, нижняя тропосфера

DOI: 10.31857/S0002351524060011 EDN: HVKRCB

1. ВВЕДЕНИЕ

Мощные конвективные явления в атмосфере, включая грозы, ураганы, смерчи, сопровождаются генерацией внутренних гравитационных и инфразвуковых волн [Bowman and Bedard, 1971; Georges, 1973; Hung et al., 1973; Chimonas and Peltier, 1974; Jones and Georges, 1976; Stobie et al., 1983; Данилов и Свертилов, 1991; Грачев и др., 1994; Laštovička, 2006; Plougonven and Zhang, 2014; Blank et al., 2014; Lay et al., 2015; Куличков и др., 2017; 2019; Чунчузов и др., 2017а; Chunchuzov et al., 2021; 2023]. Эти волны регистрируются сетью микробарографов за несколько часов, иногда за 10–12 ч, до прихода урагана, являясь тем самым его волновыми сигналами-предвестниками [Куличков и др., 2017; 2019; Chunchuzov et al., 2023]. Волновые предвестники ураганов в виде внутренних гравитационных волн (ВГВ) обнаруживались не только по временным флуктуациям атмосферного давления, но и по изменениям во времени вертикальных профилей скорости ветра в атмосферном пограничном слое (АПС), измеряемых с помощью доплеровских сонаров [Чунчузов и др., 2017].

ВГВ, генерируемые грозами, тоже регистрировались с помощью сети микробарографов в Московском регионе за несколько часов до прохождения самой грозы над этой сетью [Данилов и Свертилов, 1991; Грачев и др., 1994]. Проблема заблаговремен-

ного обнаружения ВГВ, генерируемых грозами, тоже регистрировались с помощью сети микробарографов в Московском регионе за несколько часов до прохождения самой грозы над этой сетью [Данилов и Свертилов, 1991; Грачев и др., 1994]. Проблема заблаговремен-

ного обнаружения и мониторинга мощных гроз по их волновым предвестникам особенно остро стоит в регионах с частым выпадением града. В районе г. Талин (Армения) для предотвращения выпадения града используются противоградовые акустические пушки, воздействующие с помощью мощных акустических сигналов на грозовые облака, являющиеся потенциальными источниками выпадения града [Nalbandyan, 2011; Vardanyan and Galechyan, 2012]. С целью мониторинга ВГВ и инфразвуковых волн, генерируемых грозами, в этом регионе была установлена треугольная сеть микробарографов, показавшая свою способность обнаруживать ВГВ-предвестники от гроз и определять их скорости и направления распространения [Churchuzov et al., 2023]. Одновременно с этой сетью в настоящей работе будет использована противоградовая установка, генерирующая акустические импульсы с ударным фронтом с целью зондирования вертикального профиля флуктуаций скорости ветра и изучения его временных изменений в нижнем слое тропосферы, вызванных, в частности, ВГВ от гроз.

Предложенный нами метод акустического зондирования нижней тропосферы, благодаря своей высокой разрешающей способности по высоте (порядка 1 м), позволяет восстанавливать с временным шагом в 1 мин вертикальные профили флуктуаций эффективной скорости звука (определяемой как сумма скорости звука и проекции скорости ветра на направление от источника к приемнику) и скорости ветра в нижней тропосфере до высот порядка 1 км [Чунчужов и др., 2017 б].

Существенный вклад в формирование мезомасштабных флуктуаций скорости ветра и температуры в устойчиво стратифицированной тропосфере, имеющих периоды от 5 мин до нескольких часов, вносят ВГВ и различного рода вихревые структуры типа вихрей Кельвина-Гельмгольца [Fritts et al. 2013], часто образующиеся в результате сдвиговых и конвективных неустойчивостей ВГВ [Gossard et al. 1985; Danilov and Churchuzov, 1992; Dalaudier et al. 1994; Einaudi, and Finnigan, 1995; Chimonas, 1999; Birner, 2006; Balsley et al., 2013; Fritts et al., 2013; Каллистратова и др., 2014; Люлюкин и др., 2015; Sun et al., 2015; Сапунов и др., 2016; Hubert Luce et al., 2018; Banakh and Smalikho, 2023]. Использование противоградовой акустической пушки для непрерывного акустического зондирования нижней тропосферы позволяет обнаруживать временные изменения в вертикальном профиле скорости ветра, вызванные прохождением ВГВ и вихревых структур через область зондирования в АПС.

Настоящая работа посвящена исследованию закономерностей изменения во времени параметров ВГВ-предвестников грозовых фронтов (когерентностей, направлений и фазовых скоростей распространения), регистрируемых на сети микробарографов, и анализу влияния ВГВ на вертикальные профили и статистические характеристики (вертикальные спектры, когерентности и анизотропию) флуктуаций скорости ветра в устойчиво стратифицированном АПС с вертикальными масштабами от единиц до сотен метров. Горизонтальные масштабы этих флуктуаций могут быть в десятки или сотни раз превышать их вертикальные масштабы, поэтому такие флуктуации являются существенно анизотропными. Получение статистических характеристик анизотропных флуктуаций скорости ветра со столь малыми вертикальными масштабами (единицы и десятки метров) стало впервые возможным благодаря высокой разрешающей способности предложенного здесь нового дистанционного метода зондирования нижней тропосферы, использующего акустические сигналы с передним ударным фронтом длительностью 0.002–0.003 с.

Следует заметить, что, несмотря на имеющиеся многочисленные данные наблюдений анизотропных флуктуаций скорости ветра и температуры в устойчиво стратифицированном АПС, их статистические характеристики (вертикальные и горизонтальные спектры, структурные функции) изучены весьма слабо в сравнении с локально-однородной и изотропной турбулентностью в инерционном интервале масштабов. В то же время, знание этих характеристик принципиально необходимо для учета их влияния в моделях дальнего распространения звука, радиоволн и света в атмосфере, а также решения проблем локации различных импульсных источников звука (взрывы, извержения вулканов, землетрясения и др.). Кроме этого, оперативное дистанционное обнаружение экстремально-больших сдвигов скорости ветра и высот их расположения необходимо для оценки безопасности метеоусловий для авиации [Шакина и Иванова, 2016].

Используемый в настоящей работе акустический метод наклонного импульсного зондирования тропосферы основан на эффекте рассеяния акустического сигнала с ударным фронтом от анизотропных неоднородностей тропосферы с разными вертикальными градиентами скорости ветра и температуры. В устойчиво стратифицированном АПС этот эффект был впервые экспериментально обнаружен в [Перепелкин и др., 2013]. В дальнейшем, в работах [Чунчужов и др., 2017 б; 2019] были

восстановлены мгновенные вертикальные профили флуктуаций эффективной скорости звука $DC_{\text{эф}}(z)$ по формам и временам пробега сигналов, генерируемых противорадовой акустической пушкой в Армении. Благодаря высокому вертикальному разрешению импульсного метода зондирования (~ 1 м), удалось восстановить до высоты 800 м вертикальный профиль анизотропных флуктуаций скорости ветра с вертикальными масштабами от 1 до 30 м [Чунгузов и др., 2017 б]. Наличие столь тонких тропосферных слоев ранее обнаруживалось только с помощью контактных методов измерений [Gossard et al., 1985; Hubert Luce et al., 2018] и путем медленных подъемов беспилотного самолета до высот тропосферы порядка 1500 м и его спусков в течение 10–15 мин, измерявшего быстрые изменения скорости ветра, температуры и влажности с высотой в тропосфере [Martin et al., 2011]. Другие дистанционные методы зондирования (лидары, радары, доплеровские сонары) менее чувствительны к столь быстрым вертикальным вариациям скорости ветра и температуры на высотах свыше 300 м [Dalaudier et al., 1994; Birner et al., 2003; Balsley et al., 2013; Сапунов и др., 2016].

Результаты исследования закономерностей изменения во времени параметров ВГВ-предвестников грозовых фронтов, регистрируемых на сети микробарографов, приведены в разделе 2. В разделе 3 изучается влияние ВГВ в АПС на флуктуации времени пробега акустических сигналов от источника к сети приемников звука и скорости ветра. Анализ влияния ВГВ на вертикальные профили флуктуаций скорости ветра в устойчиво стратифицированном АПС и их вертикальные спектры проводится в разделе 4.

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ПАРАМЕТРОВ ВГВ-ПРЕДВЕСТНИКОВ ГРОЗОВЫХ ФРОНТОВ

Механизм генерации ВГВ атмосферными фронтами и влияние ВГВ на динамику тропосферы и верхних слоев атмосферы до настоящего времени интенсивно исследовалось путем численного моделирования этого явления и экспериментальными методами [Chimonas and Peletier, 1974; Jones and Georges, 1976; Šauli and Boška, 2001; Laštovička et al., 2006; Plougonven and Zhang, 2014; Lay et al., 2015; Uccellini, 2016]. С одной стороны, ВГВ и инфразвуковые волны, генерируемые грозами и ураганами, и регистрируемые разными методами в верхних слоях атмосферы и на поверхности земли за несколько часов до прихода гроз и ураганов в пункты наблюдений [Куличков и др., 2017; 2019; Чунгузов и

др., 2017 а], могут играть роль волновых предвестников этих опасных явлений. С другой стороны, взаимодействие длинных ВГВ (горизонтальные длины волн 300–400 км, периоды 2–4 ч) с достаточно большими амплитудами давления (до 100 Па) с конвекцией в тропосфере может приводить к зарождению мощных конвективных ячеек, тем самым такие волны могут сами влиять на погоду [Stobie et al., 1983; Uccellini, 2016].

С целью мониторинга гроз и других опасных природных явлений (ураганы, землетрясения) вблизи г. Талин была установлена треугольная сеть микробарографов конструкции Г. В. Азизяна, являющихся модификацией жидкостного микробарографа, первоначально разработанного в ИФА В. М. Бовшеверовым [Бовшеверов и др., 1979]. Он позволяет измерять флуктуации атмосферного давления в широком диапазоне периодов, от 10 с до нескольких часов.

Благодаря широкой частотной полосе микробарографов, их треугольная сеть (рис. 1, верхняя панель) способна обнаруживать волновые предвестники гроз одновременно в диапазонах периодов ВГВ (периоды от 5 мин до нескольких часов) и инфразвука с периодами от 10 сек до 120 с. Один из случаев регистрации (1–2 ноября 2019 г.) ВГВ от грозовых ячеек F1 и F2, и их волновых предвестников показан на рис. 1 (внизу).

По метеорологическим данным аэропорта Звартноц в г. Ереване, в период времени с 1-го по 3-е ноября 2019 наблюдались грозы. При этом происходило значительное понижение температуры, примерно от 20°C до -1°C, рост атмосферного давления, влажности и скорости ветра. Грозовые облака наблюдались 2 ноября 2019 г. вблизи г. Талин также и по данным метеорадара (<https://www.ventusky.com/ru>).

ВГВ обнаруживались путем анализа функций когерентности и фазовых спектров пульсаций давления для каждой пары микробарографов треугольной сети. Индикатором прохождения волн через три микробарографа в рассматриваемый промежуток времени являлся рост коэффициента корреляции (рис. 2, нижняя панель) и функций когерентности флуктуаций давления (рис. 3 а,б) на всех парах микробарографов 1–2, 2–3, 3–1 до их максимумов порядка 0.8–1 одновременно с обращением в нуль суммы разностей фаз флуктуаций (или их временных задержек) для этих пар. Когерентный анализ флуктуаций давления позволил определить азимут прихода (рис. 2, вторая панель сверху) и горизонтальную фазовую скорость распространения ВГВ от грозовых ячеек в зависимости от времени (рис. 3 в).

Прохождение грозовых ячеек F1 и F2 через сеть наблюдения вызвало резкие скачки давления. Подобные по форме скачки давления, иногда называемые грозовыми «носами», часто регистрируются на барографах при прохождении шквалов с грозами и ливнями [www.veter.academic.ru/2933/ГРОЗО-

ВОЙ НОС]. Однако, еще за 5–6 часов до приходов грозовых ячеек обнаруживались ВГВ более малой амплитуды (ВГВ-предвестники гроз показаны на рис. 1 внизу, рис. 2 и рис. 3) по сравнению с амплитудами скачков давления F1 и F2, непосредственно связанных с грозовыми ячейками.

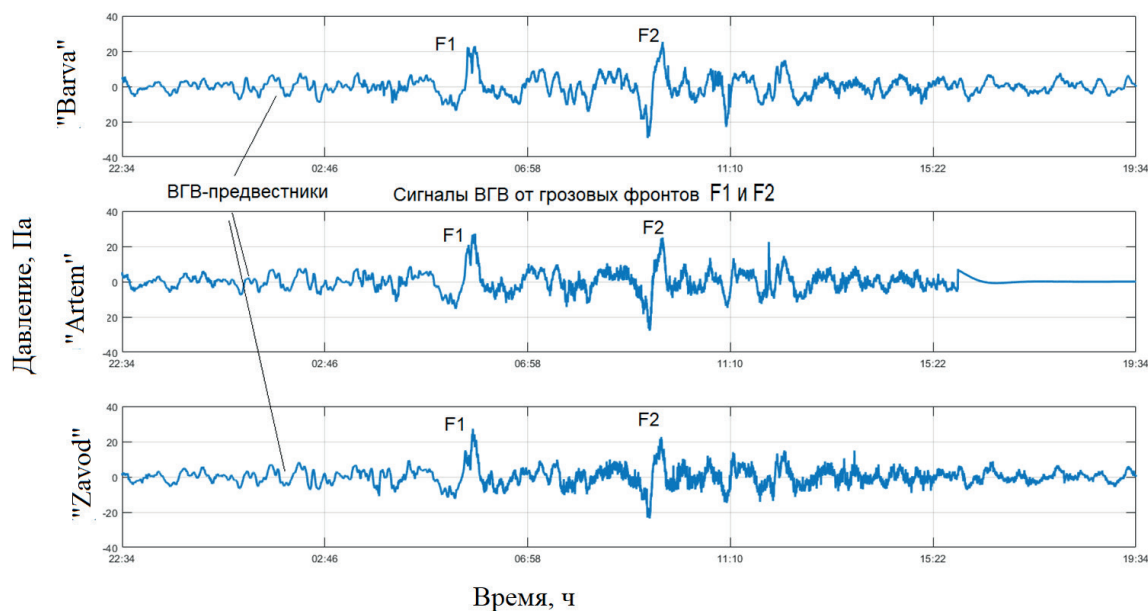


Рис. 1. Вверху: треугольная сеть микробарографов в г. Талин (Армения). Внизу: внутренние гравитационные волны (ВГВ), вызванные прохождением грозовых ячеек F1 и F2 через треугольную сеть микробарографов 1 (“Barva”)–2 (“Artem”)–3 (“Zavod”) и зарегистрированные 1–2 ноября 2019 г. Показаны также ВГВ-предвестники гроз, отфильтрованные среди флуктуаций атмосферного давления с помощью когерентного анализа. По горизонтальной оси отложено местное время в часах, равное времени UTC+4 ч; по вертикальной оси — атмосферное давление в Па.

Азимут прихода низкочастотных ВГВ с периодами 48–83 мин слабо менялся до прихода грозовой ячейки F1 и был близок к 200 град (юго-западное направление) (рис. 2, вторая панель сверху), а их фазовая скорость составляла 15–20 м/с.

Изменение фазовой скорости волн с течением времени зависит от их частотного диапазона, что связано с дисперсией ВГВ. Для короткопериодных ВГВ-предвестников с периодами ~ 5.5 мин наблюдалась тенденция уменьшения горизонтальной фазовой скорости по мере приближения грозовой ячейки F1 примерно от 20 м/с до 5 м/с (рис. 3 в, нижняя панель). Однако, непосредственно перед ее приходом происходил резкий скачок горизонтальной фазовой скорости волны до 40–50 м/с с последующим резким спадом до 5 м/с, что можно объяснить прохождением грозовой ячейки F1 непосредственно над треугольной сетью микробарографов. Подобное поведение горизонтальной фазовой скорости волны наблюдалось также непосредственно перед прохождением грозовой ячейки F2. Однако, после ее прохождения над треугольной сетью и удаления от этой сети, начиная примерно с 12:00, происходило резкое изменение азимута прихода низкочастотных ВГВ почти на 180 град (указано на рис. 2, вторая панель сверху).

Обнаруженные закономерности изменения со временем амплитуд ВГВ, фазовых скоростей и направлений прихода ВГВ от гроз согласуются с теми, что ранее наблюдались в московском регионе [Данилов и Свертилов, 1991; Грачев и др., 1994; Куличков и др., 2017; 2019; Чунчузов и др., 2017 а]. В частности, в [Куличков и др., 2017] было установлено,

что чем выше амплитуда волн-предвестников атмосферных фронтов, тем выше амплитуды скачка давления, вызванного самим фронтом. В [Данилов и Свертилов, 1991; Грачев и др., 1994] с помощью метода когерентного анализа пульсаций давления на сети микробарографов авторы обнаруживали ВГВ с периодами 15–20 мин и амплитудой около 50 Па за 2–3 часа до момента прохождения грозы над пунктами наблюдения.

Изученные здесь закономерности изменения характеристик ВГВ-предвестников гроз в регионе Армении, подверженном частому выпадению града, помогают заблаговременно обнаруживать приближение гроз и осуществлять их непрерывный мониторинг.

3. ВЛИЯНИЕ ВГВ НА ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ ВЕТРА И ВРЕМЕНА ПРОБЕГА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ПРОТИВОГРАДОВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ПУШКОЙ

ВГВ, генерируемые грозовыми фронтами и другими их источниками, такими как обтекание гор нестационарным ветром, струйные течения, неустойчивости сдвигов скорости ветра и др., вносят вклад как в мезомасштабные (периоды от 3 мин до нескольких часов) флуктуации атмосферного давления, так и флуктуации скорости ветра. Временные флуктуации скорости ветра восстанавливались в [Chunchuzov et al., 2005; 2007; 2009] с помощью метода акустической томографии АПС по флуктуациям времени пробега акустического сигнала от импульсных источников до сети разнесенных приемников.

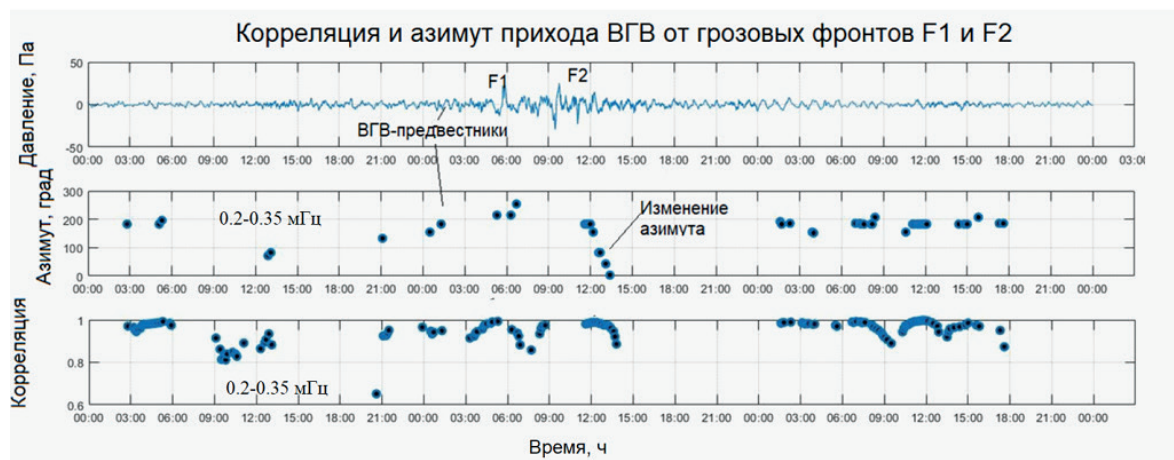


Рис. 2. Изменение с течением времени коэффициента корреляции между флуктуациями давления на треугольной антенне, азимута прихода низкочастотных ВГВ в частотном диапазоне 0.00020–0.00035 Гц (периоды 48–83 мин). Указан промежуток времени резкого изменения азимута распространения волн после прохождения грозовой ячейки F2 через треугольную сеть.

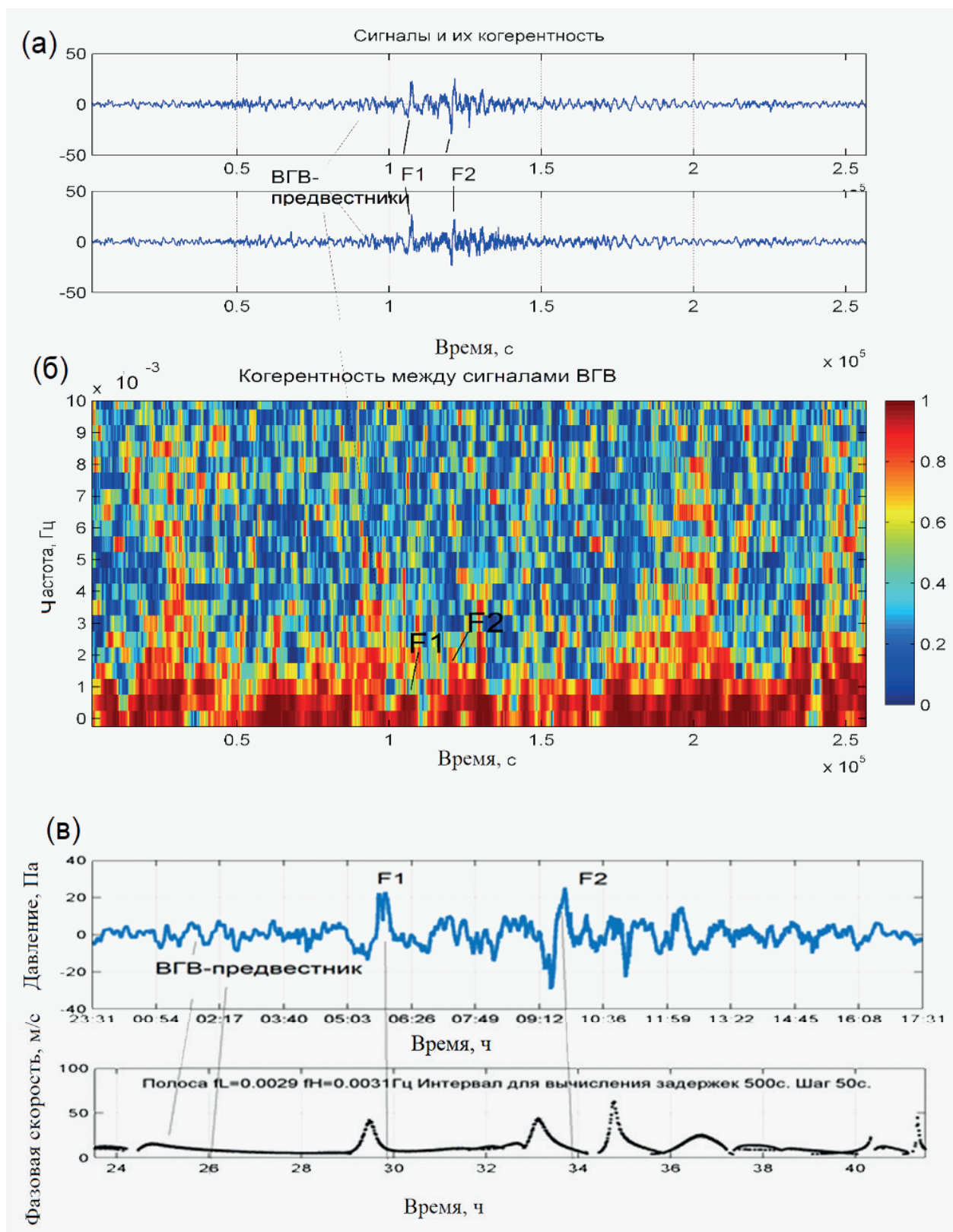


Рис. 3. (а) Скачки давления F1 и F2, зарегистрированные на микробарографах 1 и 3 при прохождении над ними грозových ячеек, и колебания давления, вызванные ВГВ, зарегистрированные за несколько часов до прихода грозových ячеек. (б) Функции когерентности между флуктуациями давления на микробарографах 1 и 3 в зависимости от времени и частоты (в). Изменение горизонтальной фазовой скорости ВГВ с течением времени (относительно 01.10.2019, 00:00 ч) для частотного диапазона 0.0029–0.0031 Гц (соответствующие периоды 5.4–5.7 мин).

В качестве излучателя акустических импульсов для зондирования нижней тропосферы нами была использована противорадовая акустическая пушка «Зенит» с конусообразной трубой (рис. 4, верхняя панель), внутри которой происходила генерация акустических импульсов с ударным передним фронтом из-за детонации смеси воздуха с пропаном. Описание процесса генерации импульсов в противорадовой установке содержится в работах [Aramyan et al., 2011; Vardanyan et al., 2011; Vardanyan and Galechyan, 2012]. Типичный акустический импульс, генерируемый пушкой, показан на рис. 4 (средняя панель), а ослабление его амплитуды с ростом высоты от поверхности земли показано на рис. 4 (нижняя панель). Период излучения сигнала составлял 1 мин для изучения флуктуаций с периодами от нескольких минут до нескольких часов.

В ночное время, когда из-за инверсии температуры формируется приземный акустический волновод, сигнал от акустической пушки, на расстоянии свыше 2 км от неё, распадается на ряд отдельных приходов, распространяющихся в приземном волноводе [Чунчузов и др. 20176]. В методе акустической томографии, разработанном в [Chunchuzov et al., 2007; 2009], измерялись временные флуктуации разности между временами приходов сигнала на каждый из приемников, разнесенных друг от друга в пространстве. Основной вклад в эти флуктуации вносили флуктуации эффективной скорости звука $DC_{\text{эф}}$ и скорости ветра вблизи точек поворота лучевых траекторий (вклад температурных флуктуаций в 4–5 раз меньше вклада флуктуаций скорости ветра), соединяющих источник с каждым из приемников. Если внутренняя гравитационная волна проходит над сетью приемников, то она вызывает временные осцилляции скорости ветра и осцилляции $DC_{\text{эф}}$ в разных точках поворота лучей с определенным запаздыванием по времени прихода фронта волны в эти точки. По функциям когерентности и фазовым спектрам между этими флуктуациями в разнесенных точках пространства можно определить азимут распространения волны и ее горизонтальную фазовую скорость.

Возможность мониторинга ВГВ с помощью метода акустической томографии была впервые показана в [Chunchuzov et al., 2005]. В ней были восстановлены временные флуктуации $DC_{\text{эф}}$ вблизи точек поворота лучей на высотах $z = 99–100$ м, соединяющих детонационный генератор акустических импульсов на Звенигородской Научной Станции (ЗНС) ИФА РАН с тремя приемниками.

Когерентный анализ временных флуктуаций $DC_{\text{эф}}$ обнаружил максимумы на всех парных функ-

циях когерентности на периодах 8–10 мин и 28–30 мин, типичных для ВГВ. По фазовым спектрам между временными флуктуациями $DC_{\text{эф}}$, восстановленными вдоль трех направлений от источника к трем приемникам, удалось определить азимут прихода волнового пакета ВГВ относительно треугольной сети приемников и его горизонтальную фазовую скорость (5–6 м/с на периоде 28–30 мин).

На рис. 5а показаны временные флуктуации разности между временами приходов акустических импульсов от противорадовой установки Зенит в Армении до пар приемников 1–2, 2–3 и 1–3 треугольной антенны, измеренные в вечернее время (20:00–21:08), когда сформировалась инверсия температуры и приземный акустический волновод. Максимумы функции когерентности между временными флуктуациями разностей времен прихода (обозначены z_{21} и z_{23}), достигаются на периодах около 8 мин и 3 мин (рис. 5б), свойственных коротким ВГВ и вихрям Кельвина-Гельмгольца, часто наблюдаемым в устойчиво стратифицированном АПС [Caughey and Readings, 1975; Danilov and Chunchuzov, 1992; Einaudi and Finnigan, 1993; Blumen et al., 2001; Zeri and Sá. 2011; Каллистратова и др., 2014; Люлюкин и др., 2015; Kantha et al., 2019].

Описанные выше результаты акустических измерений с помощью противорадовой акустической пушки показывают возможность обнаружения и мониторинга ВГВ по измеряемым флуктуациям времен пробега акустических импульсов вдоль лучей, соединяющих противорадовую установку с разнесенными в пространстве приемниками. Вместе с сетью микробарографов, используемая вблизи г. Талин схема акустического зондирования нижней тропосферы, состоящая из противорадовой установки и сети приемников, образует единый измерительный комплекс для обнаружения и мониторинга ВГВ от гроз и других источников ВГВ по измерениям флуктуаций атмосферного давления одновременно с измерением флуктуаций времени пробега (или проекций скорости ветра) вдоль разных лучей, соединяющих импульсный источник с приемниками.

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА В УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОМ АПС И ИХ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ

Предложенная здесь схема наклонного акустического зондирования тропосферы позволяет также восстанавливать вертикальные профили флуктуаций скорости ветра в устойчиво стратифицированной тропосфере с вертикальными масштабами от

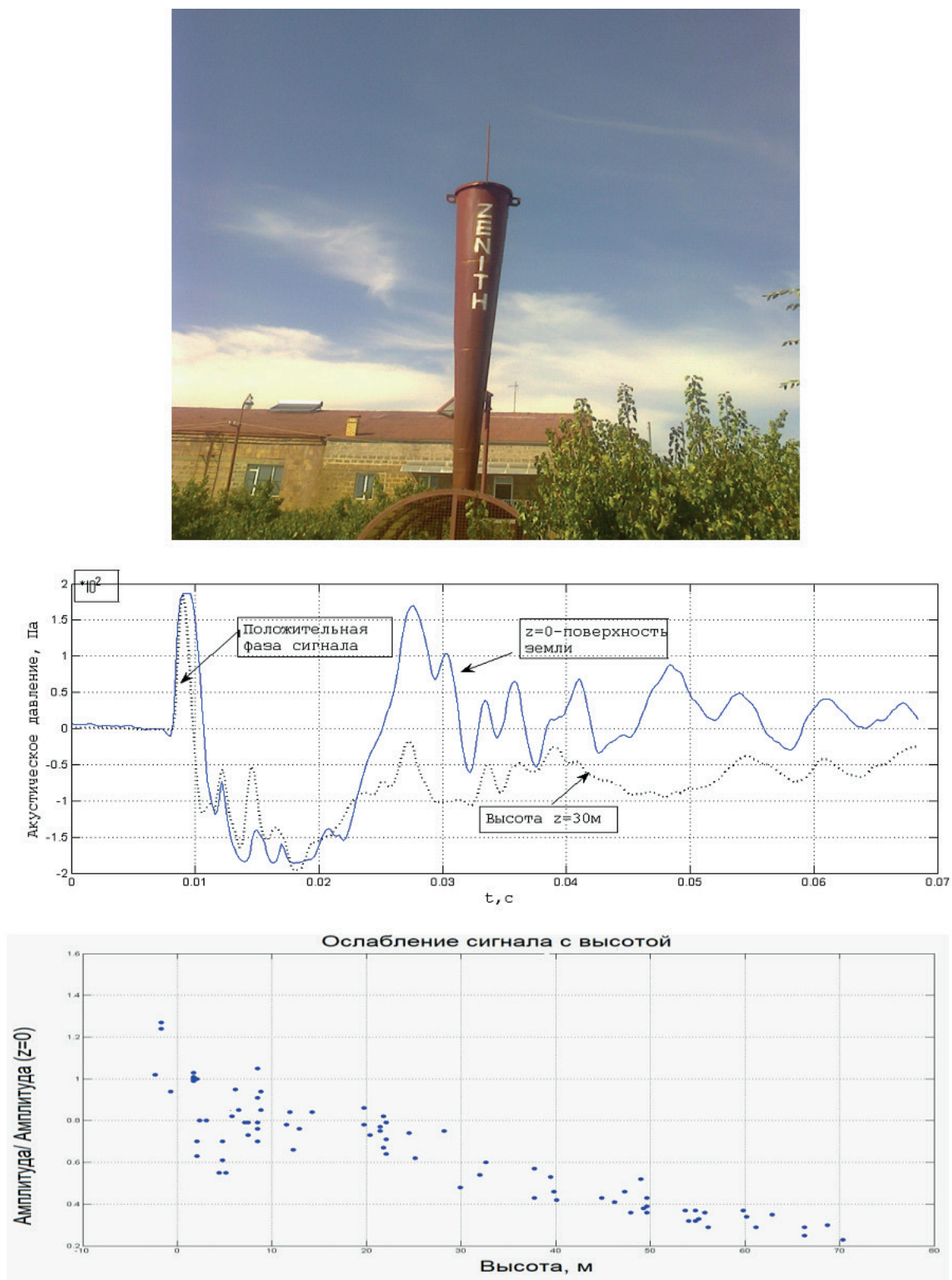


Рис. 4. Верхняя панель: конусообразная выходная труба генератора ударных волн. Средняя панель: импульсные сигналы, зарегистрированные на поверхности земли на горизонтальном расстоянии 30 м от трубы генератора, и непосредственно над срезом трубы на высоте 30 м. Нижняя панель: ослабление амплитуды переднего фронта сигнала с ростом вертикальной координаты z , отсчитываемой от поверхности земли (получено с помощью подъема квадрокоптера с акустическими приемниками). Амплитуда нормирована на амплитуду вблизи источника.

единиц до сотни метров. Методика восстановления этих профилей основана на явлении рассеяния акустических импульсов от анизотропных флуктуаций эффективной скорости звука $DC_{\text{eff}}(z)$ в тропосфере и детально описана в [Чунгузов и др., 2017б].

Для восстановления $DC_{\text{eff}}(z)$ решается уравнение типа свертки, связывающее форму рассеянного акустического сигнала от произвольного слоя тропосферы конечной толщины, содержащего вертикальные флуктуации скорости звука (вызванные флуктуациями температуры) и проекции скорости ветра вдоль направления от источника к приемнику, с формой вертикального профиля флуктуаций эффективной скорости звука $DC_{\text{eff}}(z)$ и формой падающего на слой сигнала [Чунгузов и др., 2017 б, уравнение (1)]. Вертикальная разрешающая способность, с которой можно восстанавливать профиль $DC_{\text{eff}}(z)$, определяется пространственной толщиной ударного фронта, падающего на слой сигнала. Показанные на рис. 4 (средняя панель) импульсные сигналы, зарегистрированные на поверхности зем-

ли на горизонтальном расстоянии 30 м от трубы генератора, и непосредственно над срезом трубы на высоте 30 м относительно поверхности земли, имеют длительность (или толщину) переднего ударного фронта порядка 0.002 с, которая мала по сравнению с длительностью всей положительной фазы излучаемого сигнала. В этом случае пространственные толщины ударных фронтов сигналов с разными углами падения на слой тропосферы, лежат в интервале 0.4–0.8 м, что позволяет восстанавливать флуктуации $DC_{\text{eff}}(z)$ в этом слое с вертикальными масштабами от 1 м и более.

Один из сигналов, зарегистрированный 01.10.2018 в 19:36, с помощью двух треугольных антенн из акустических микрофонов Б&К на расстояниях $r = 2250$ м и $r = 2750$ м от противорадовой акустической пушки, и соответствующие этим антеннам средние (по трем парам треугольной антенны приемников) функции когерентности между сигналами показаны на рис. 6а и рис. 6б, соответственно. Сигнал был зарегистрирован в ночное время,

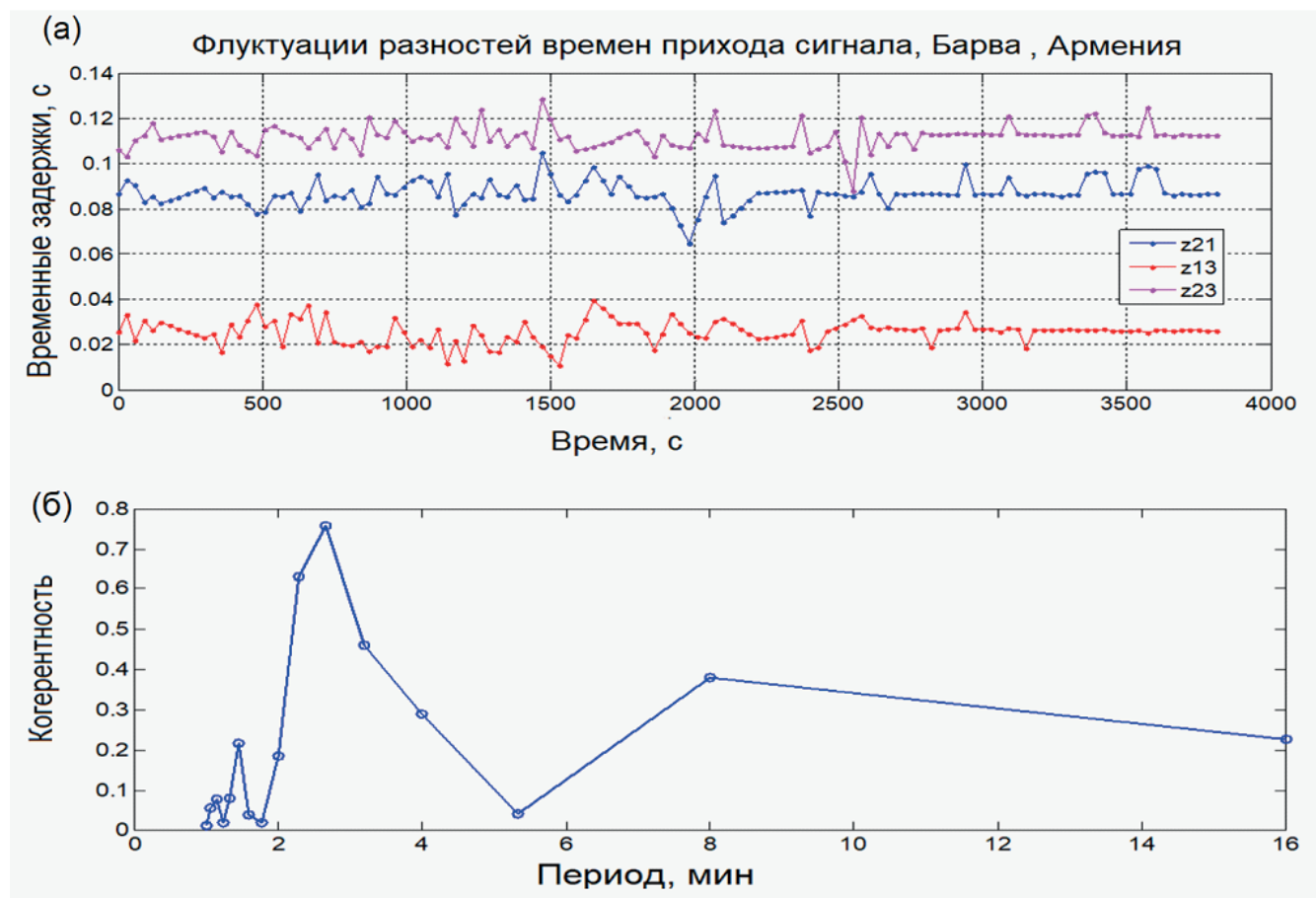


Рис. 5. Вариации временных задержек (обозначены z21, z23, z13) между приходами акустических импульсов от противорадовой акустической пушки в Армении на приемники каждой пары: 2–1, 2–3, 1–3, измеренные 17 сентября 2015 г. (20:00–21:08) (а) и когерентность между временными флуктуациями задержек z21 и z23 (б).

когда сформировался приземный акустический волновод из-за наличия температурной инверсии и сдвига скорости ветра. Основной приход сигнала (“main”) вызван его волноводным распространением вдоль поверхности земли. Однако, на хвосте сигнала, следующего за его основным приходом, были обнаружены с помощью корреляционного анализа слабые по амплитуде приходы 1, 2 и 3. По формам и временам пробега этих приходов были восстановлены вертикальные профили флуктуаций $DC_{\text{eff}}(z)$ на расстояниях 1125 м и 1375 м от источника (на рис. 7а, б). Эти приходы вызваны рассеянием сигнала на восстановленных флуктуациях $DC_{\text{eff}}(z)$, что хорошо подтверждается результатами расчета рассеянных приходов сигнала (на рис. 6 и рис. 7в) методом псевдо-дифференциального параболического уравнения (ППУ) [Avilov, 1995]. Расчетные приходы хорошо согласуются с зарегистрированными приходами сигнала по их формам, временам прихода и амплитудам (рис. 6а, б, верхняя и нижняя панели).

Высокая когерентность (0.6–0.7) между вертикальными флуктуациями $DC_{\text{eff}}(z)$ с вертикальными масштабами 1.8 м и 3.3 м, восстановленными на горизонтальных расстояниях 1125 м и 1375 м от источника, сохраняется на горизонтальном расстоянии порядка 250 м, что видно из рис. 8. Это говорит о сильной анизотропии флуктуаций DC_{eff} , от которых происходит рассеяние сигналов, т.к. отношение их горизонтальных масштабов к вертикальным лежит в интервале 75–140.

Вертикальные спектры восстановленных флуктуаций $DC_{\text{eff}}(z)$ для всех слоев, от которых принимались отраженные приходы сигналов 1, 2, 3, обозначенные psd ij, где $i = 1, 2$ — номер треугольной антенны, а $j = 1, 2, 3$ — номера приходов, показаны на рис. 9 (здесь спектр psd 12а получен для всего слоя 350–500 м). Помимо анализируемых здесь спектров приходов psd ij, на рис. 9 показаны также спектры приходов psd 31 и psd 32, зарегистрированных ранее в г. Талин (сентябрь 2016 г), и спектр psd_S восстановленных флуктуаций вблизи г. Звенигорода (ЗНС) по приходам сигналов от детонационного генератора [Чунчужов и др., 2017 б]. Все полученные спектры в среднем спадают с ростом вертикального волнового числа m по степенному закону, близкому к m^{-3} (сплошная линия) и аналогичны по закону спада ($\sim m^{-3}$) вертикальным спектрам флуктуаций скорости ветра, восстановленных в устойчиво стратифицированных слоях стратосферы по данным инфразвукового зондиро-

вания стратосферы с помощью наземных взрывов, вулканических извержений [Chunchuzov et al., 2015] и по данным радарных измерений [Tsuda, 2014].

Вертикальный спектр m^{-3} предсказывается также его теоретической моделью формирования [Chunchuzov, 2018]. Эта модель учитывает существенное влияние на формирование спектра нелинейного процесса адвекции внутренних волн и горизонтальных вихревых движений ветром, вызванным суммарным полем всех внутренних волн и вихрей. При больших вертикальных волновых числах $m \gg m^*$, где $m^* = N / (\sqrt{2}\sigma)$ — характерное вертикальное волновое число, N — частота Брента–Вайсяля в слое, σ — среднеквадратичное значение вертикальных флуктуаций скорости ветра в слое, теоретический спектр флуктуаций горизонтальной скорости ветра приобретает универсальную форму $V(m) = \alpha N^2 / m^3$, где численный коэффициент $\alpha \sim 0.2$. Например, для флуктуаций в слое 600–670 м (рис. 8 а) значение $\sigma = 0.53$ м/с, следовательно, при типичном среднем значении частоты $N = 0.02$ рад/с в устойчивом АПС, вертикальный масштаб $L^* = 2\pi / m^* = 2\sqrt{2}\pi\sigma / N \sim 270$ м.

На коротких масштабах по сравнению с L^* теоретический спектр спадает при уменьшении вертикальных масштабов $2\pi / m$ как m^{-3} (рис. 9, показан черной сплошной линией). Несмотря на то, что этот спектр лежит значительно ниже экспериментальных спектров восстановленных флуктуаций $DC_{\text{eff}}(z)$, он хорошо описывает закономерности их спада при уменьшении вертикальных масштабов $2\pi / m$ от нескольких десятков метров до 1 м. Общие закономерности спада с ростом m вертикальных спектров анизотропных флуктуаций скорости ветра и температуры в устойчиво стратифицированном АПС и в слоях стратосферы и мезосферы [Chunchuzov et al., 2015] свидетельствуют об общем механизме формирования анизотропных неоднородностей полей скорости ветра и температуры в разных устойчиво-стратифицированных слоях атмосферы. В то же время, характерные вертикальные масштабы L^* анизотропных флуктуаций растут с высотой из-за уменьшения средней плотности атмосферы и достигают в стратосфере нескольких км. В [Chunchuzov et al., 2021] было показано, что механизм рассеяния инфразвуковых сигналов, генерируемых взрывами, от анизотропных флуктуаций скорости ветра в стратосфере аналогичен механизму рассеяния акустических импульсов, генерируемых акустической пушкой, от анизотропных флуктуаций скорости ветра в устойчиво-стратифицированной нижней тропосфере.

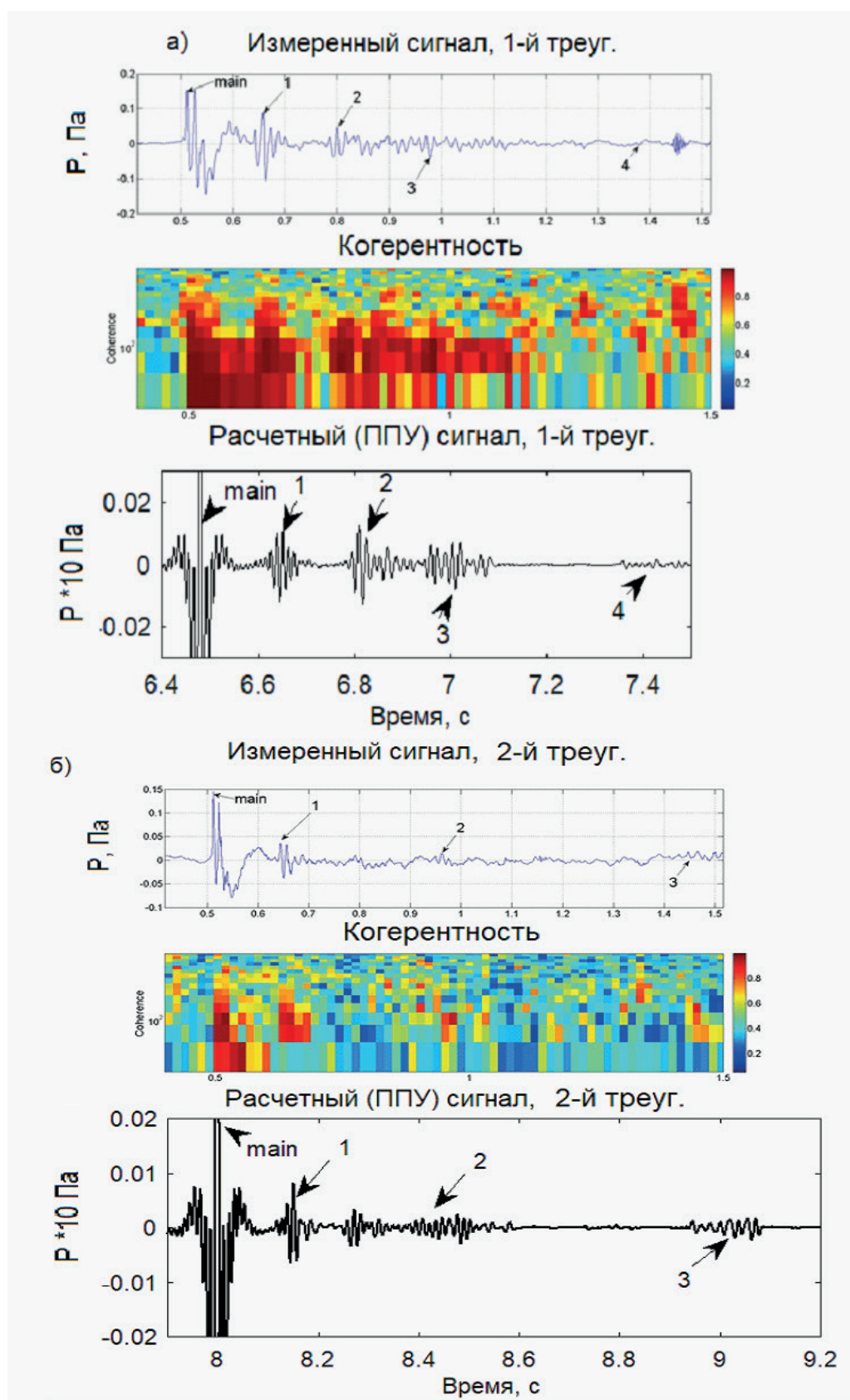


Рис. 6. Измеренные сигналы (01.10.2018, 19:36, Талин, Армения) и расчетные сигналы методом ППУ на расстояниях $\Gamma = 2250$ м (а) и $\Gamma = 2750$ м (б) от акустической пушки, и средние (по трем парам треугольной антенны приемников) когерентности между сигналами.

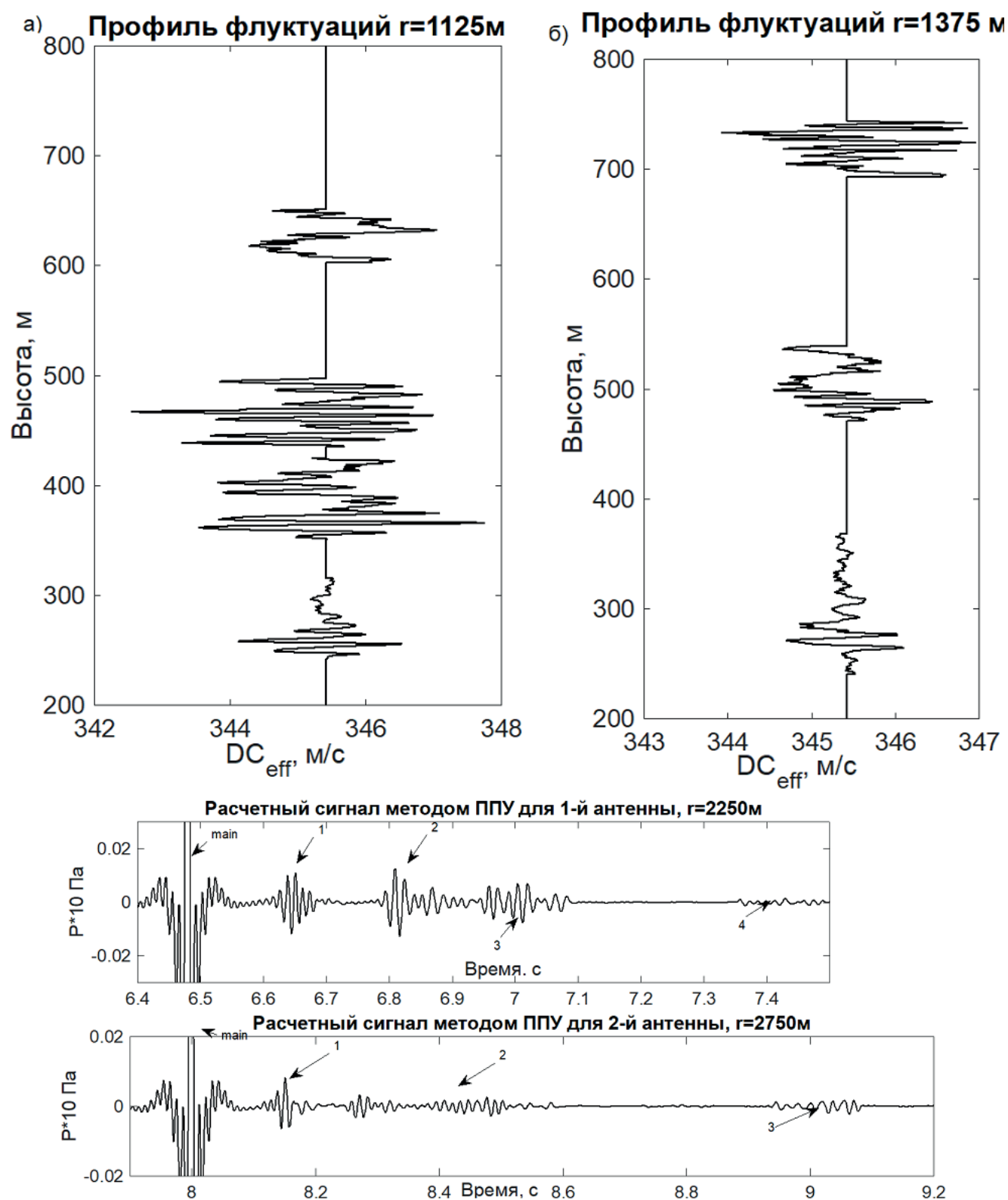


Рис. 7. Вверху: восстановленные вертикальные профили флуктуаций эффективной скорости звука DC_{eff} на расстояниях 1125 м и 1375 м от акустической пушки в Армении (а)–(б). Внизу: результаты расчета методом ППУ основного прихода сигнала (“main”) в приземном волноводе и приходов 1, 2, 3, рассеянных на восстановленных флуктуациях DC_{eff} , показанных вверху.

Вертикальный градиент восстановленных флуктуаций dC_{eff}/dz в слое 430–500 м осциллирует в зависимости от высоты z (рис. 10). Он зависит от вертикальных градиентов температуры и проекции скорости ветра на направление источник–приемник. Если градиент проекции скорости ветра dV/dz превышает по абсолютной величине значение 0.01 с^{-1} , то периодически расположенные по высоте тонкие слои с короткими вертикальными масштабами, менее 5 м, для которых $|dC_{eff}/dz| > 2N$, оказываются локально динамически неустойчивыми, т.к. для них локальное число Ричардсона $Ri = N^2 / (dV/dz)^2 < 1/4$ [Gossard and Hooke, 1975]. Этим неустойчивым слоям на рис. 10 соответствуют интервалы масштабов, содержащие внутри закрашенные области осцилляций dC_{eff}/dz . Неустойчивости генерируют почти периодически расположенные по высоте тонкие слои турбулентности, перемежающиеся по высоте с тонкими устойчиво стратифицированными слоями с вертикальными масштабами, для которых $|dC_{eff}/dz| < 2N$ (эти масштабы соответствуют локальным участкам вертикальных осцилляций, лежащих между вертикальными линиями на рис. 10).

Восстановление профилей анизотропных флуктуаций $DC_{eff}(z)$ в определенных слоях тропосферы (рис. 7а) и их спектров в диапазоне вертикальных масштабов от 1 м до десятков метров (рис. 9), стало возможным благодаря высокой разрешающей способности по высоте используемого здесь метода импульсного акустического зондирования нижней тропосферы. При непрерывном зондировании этот метод позволяет следить за изменениями профиля флуктуаций скорости ветра в нижнем слое тропосферы до 1 км, вызванных ВГВ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью установленного в г. Талин (Армения) измерительного комплекса, состоящего из треугольной сети микробарографов и противогравитационной акустической пушки, проведены исследования влияния внутренних гравитационных волн (ВГВ) на пространственно-временную изменчивость поля атмосферного давления и скорости ветра в нижней тропосфере. Методом когерентного анализа флуктуаций атмосферного давления обнаружены ВГВ от грозовых ячеек, примерно за 5–6 ч до их прохождения над сетью микробарографов, и изучены их горизонтальные фазовые скорости и направления распространения в зависимости от времени.

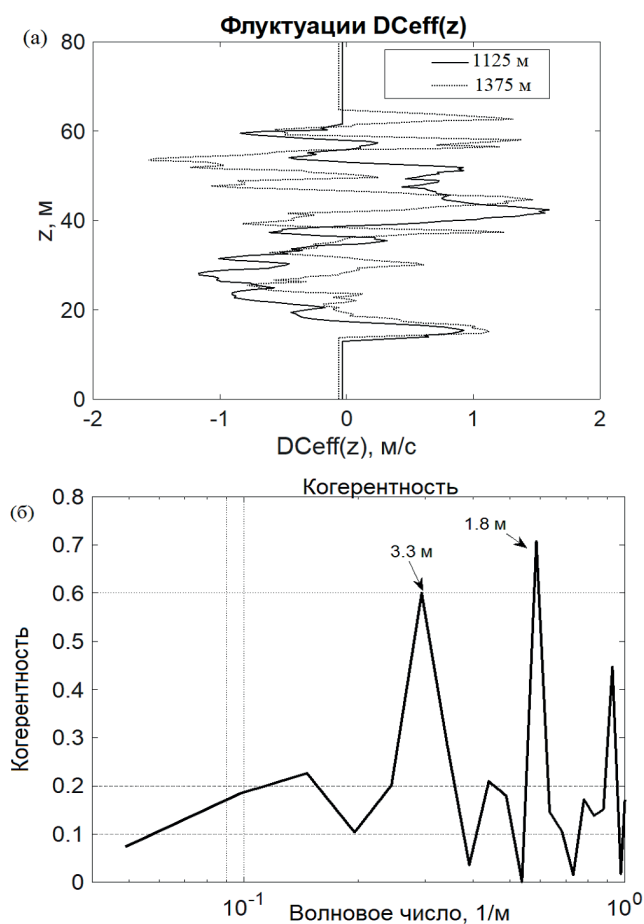


Рис. 8. Восстановленные вертикальные флуктуации $DC_{eff}(z)$ в слое отражения сигнала 600–670 м на расстоянии 1125 м от источника, и в слое 700–770 м на расстоянии 1375 м от источника (а) и когерентность между вертикальными флуктуациями $DC_{eff}(z)$, восстановленными на расстояниях 1125 и 1375 м от источника (б).

Для ВГВ-предвестников гроз, зарегистрированных за несколько часов до их прохождения над сетью микробарографов, наблюдалась тенденция уменьшения горизонтальной фазовой скорости примерно от 20 м/с до 5 м/с по мере приближения одной из грозовых ячеек к этой сети. Однако, непосредственно перед приходом грозовой ячейки происходило резкое увеличение горизонтальной фазовой скорости волны до 40–50 м/с с последующим ее резким спадом до 5 м/с, что объяснялось прохождением этой ячейки непосредственно над треугольной сетью микробарографов. После прохождения гроз над треугольной сетью и их удалении от нее, наблюдалось изменение азимута прихода ВГВ почти на 180 град. Изученные закономерности изменения скорости и направления распространения

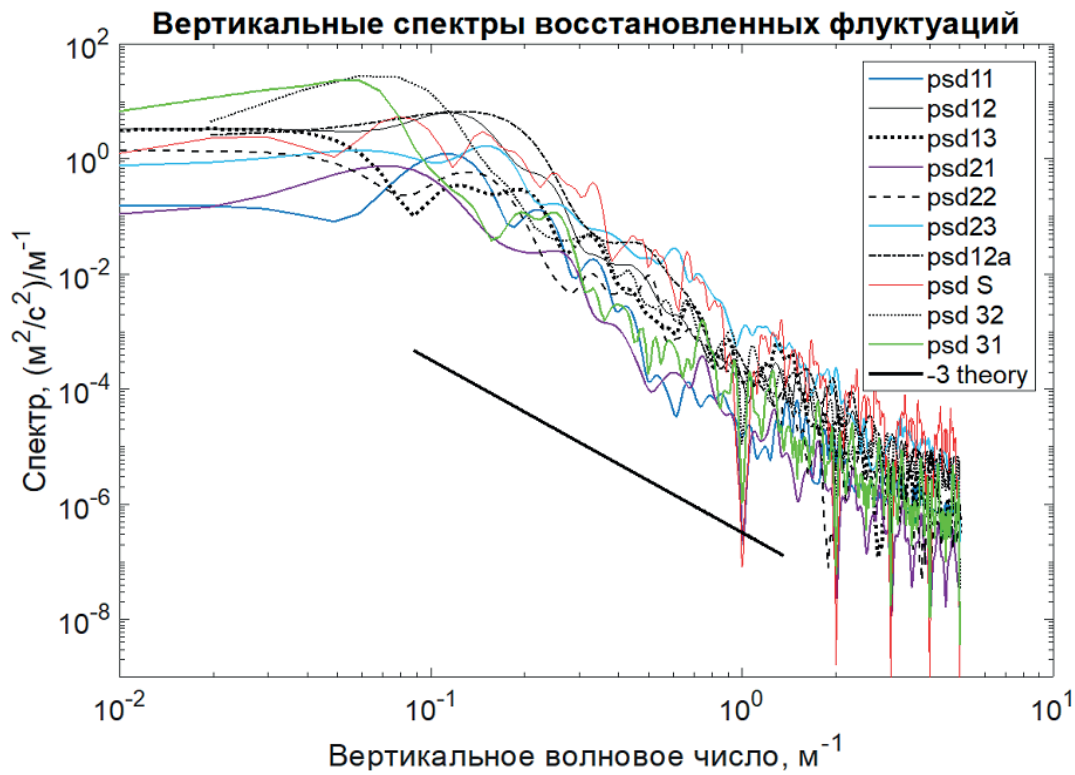


Рис. 9. Вертикальные спектры восстановленных в разные годы флуктуаций $DC_{eff}(z)$.

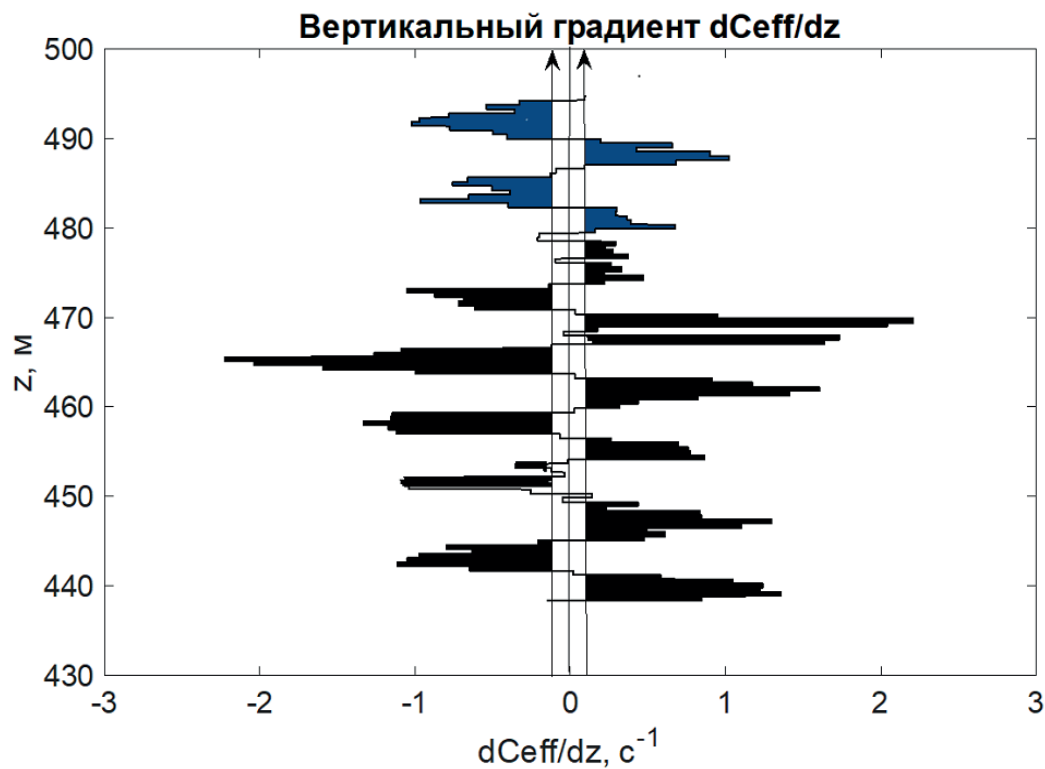


Рис. 10. Вертикальные осцилляции градиента dC_{eff}/dz в слое 430–500 м.

ВГВ-предвестников гроз в регионе г. Талин, где часто выпадает град, помогают заблаговременно обнаруживать приближение гроз и осуществлять мониторинг их движения.

Была показана также возможность мониторинга ВГВ в тропосфере по временным флуктуациям времени пробега акустических импульсов вдоль лучей, соединяющих противорадовую установку с разнесенными в пространстве приемниками.

Предложенная схема наклонного акустического зондирования тропосферы акустическими импульсами с малой толщиной ударного фронта ($\sim 0.4\text{--}0.6$ м) позволила восстановить на двух разных расстояниях от источника почти вертикальные профили флуктуаций скорости ветра в устойчиво-стратифицированной тропосфере с вертикальными масштабами от единиц до нескольких десятков метров. Методика восстановления этих профилей основана на явлении рассеяния акустических импульсов от анизотропных флуктуаций эффективной скорости звука $DC_{\text{эф}}(z)$ в тропосфере. Основной вклад в эти флуктуации вносят флуктуации проекции скорости ветра на направление источник—приемник, который в 4–5 раз превышает вклад флуктуаций температуры.

По формам и временам пробега рассеянных сигналов, зарегистрированных на двух треугольных антеннах, расположенных на расстояниях 2250 м и 2750 м от акустической пушки, были восстановлены вертикальные профили флуктуаций $DC_{\text{эф}}(z)$ и скорости ветра в определенных слоях нижней тропосферы, расположенных на разных высотах, вплоть до высоты 800 м. Благодаря высокой разрешающей способности по высоте используемого здесь метода импульсного акустического зондирования нижней тропосферы были впервые получены вертикальные спектры анизотропных флуктуаций скорости ветра в диапазоне коротких вертикальных масштабов, от 1 м до десятков метров. В этом диапазоне масштабов полученные спектры в среднем спадали с ростом вертикального волнового числа m по степенному закону, близкому к m^{-3} . Подобные универсальные вертикальные спектры наблюдались ранее для флуктуаций скорости ветра в устойчиво-стратифицированных слоях стратосферы и мезосферы, что свидетельствует об общем механизме формирования тонких устойчиво стратифицированных слоев в стратосфере и в устойчиво стратифицированном АПС.

Было установлено, что рассеяние акустических сигналов происходит от анизотропных флуктуаций скорости ветра с вертикальными масштабами от 1 м до нескольких десятков метров. При этом вер-

тикальные градиенты скорости ветра осциллируют по высоте, достигая на определенных высотах критических значений, при которых локальное число Ричардсона становится меньше критического значения $\frac{1}{4}$. Показано, что возникающие в тонких слоях тропосферы сдвиговые неустойчивости генерируют турбулентные слои, перемежающиеся по высоте с устойчиво стратифицированными слоями.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науки Армении, грант 21Т-2D023 (разделы 1–3), и частичной поддержке Российского Министерства образования и науки, грант FMWR-2022-0017 (раздел 4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бовшверов В.М., Грачев А.И., Ломадзе С.О. Жидкостный микробарограф // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15. № 2. С. 1215–1217.
- Грачев А.И., Данилов С.Д., Куличков С.Н., Свертилов А.И. Основные характеристики внутренних гравитационных волн в нижней атмосфере от конвективных штормов // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 6. С. 759–767.
- Данилов С.Д., Свертилов А.И. ВГВ, генерируемые при прохождении гроз // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1991. Т. 27. № 3. С. 234–242.
- Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Петенко И.В. Реализация идей А.М. Обухова о наземном дистанционном зондировании нижней тропосферы акустическими и электромагнитными волнами // В сб. Труды конференции «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» / Под. ред. Г.С. Голицына, И.И. Мохова. М: ГЕОС, 2014. С. 593–620.
- Куличков С.Н., Н.Д. Цыбульская, И.П. Чунгузов, В.А. Гордин, Ф.Л. Быков, А.И. Чуликов, В.Г. Перепелкин, Г.А. Буш, Е.В. Голикова. Исследования внутренних гравитационных волн от атмосферных фронтов в московском регионе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 455–469.
- Куличков С.Н., И.П. Чунгузов, О.Е. Попов, В.Г. Перепелкин, Е.В. Голикова, Г.А. Буш, И.А. Репина, Н.Д. Цыбульская, Г.И. Горчаков. Внутренние гравитационные и инфразвуковые волны во время урагана в Москве 29 мая 2017 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 32–40.
- Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д., Кузнецов Д.Д., Чунгузов И.П., Широкова Г.Ю. Внутренние гравитационно-сдвиговые волны в атмосферном пограничном слое по данным акустической локации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. V. 51. Р. 218–229.

- Сапунов М.В., Мельникова И.Н., Донченко В.К., Самуленков Д.А., Кузнецов А.Д. Сопоставление вертикальных профилей скорости и направления ветра, полученных на основе лидарных и аэрологических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 149–160.
- Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Чунчузов И.П. Изучение оптимальных условий регистрации информативного сигнала при исследовании пограничного слоя атмосферы акустическим методом частичных отражений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 2. С. 180–195.
- Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. Росгидромет, 2016. 308 с.
- Чунчузов И.П., Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Горчаков Г.И., Каллистратова М.А., Джола А., Лу Джун, Пенсяо Тэнг, Ичун Янг, Ву Лин, Килонг Ли, Ели Сан. Влияние внутренних гравитационных волн на метеорологические поля и газовые примеси вблизи городов Москва и Пекин // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2017а, Т. 53. № 5. С. 597–611.
- Чунчузов И.П., Перепелкин В.Г., Попов О.Е., Куличков С.Н., Варданыан А.А., Айвазян Г.Е., Хачикян Х.З. Исследование характеристик тонкой слоистой структуры нижней тропосферы с помощью акустического импульсного зондирования // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2017 б. Т. 53. № 3. С. 279–293.
- Чунчузов И.П., Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Попов О.Е., Варданыан А.А., Айвазян Г.Е. Рассеяние акустического импульса на анизотропных неоднородностях устойчиво-стратифицированного пограничного слоя атмосферы // В сб. трудов XXXII сессии Российского акустического общества. Москва. 2019. ГЕОС. С. 53–59.
- Aramyan A.R., Galechyan G.A., Vardanyan A.A. A study of acoustic waves generated by the shock wave of an antihail gun // Acoustical Physics. 2011. V. 57. № 3. P. 432–436.
- Avilov K.V. Pseudo-differential parabolic equations of sound propagation in the slowly range-dependent ocean and their numerical solutions // Acoust. Phys. 1995. V. 41. № 1. P. 1–7.
- Balsley B.B., Lawrence D.A., Woodman R.F., Fritts D.C. Fine-scale characteristics of temperature, wind, and turbulence in the lower atmosphere (0–1300 m) over the south Peruvian coast // Boundary-Layer Meteorology. 2013. V. 147. P. 165–178. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9774-x>.
- Banakh V.A., Smalikh 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 Sens. 2023. V. 15. P. 2894. <https://doi.org/10.3390/rs15112894>.
- Blanc E., Farges T., Le Pichon A. and Heinrich P. Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in western Africa // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. V. 119. P. 6409–6418. doi:10.1002/2013JD020499.
- Blumen W., Banta R., Durns S.P., Fritts D.C., Newsom R., Poulos G.S., Sun J. Turbulence statistics of a Kelvin–Helmholtz billow event observed in the nighttime boundary layer during the CASES-99 field program // Dyn. Atmos. Oceans. 2001. V. 34. P. 189–204.
- Bowman H.S., Bedard A.J. Observations of infrasound and subsonic pressure disturbances related to severe weather // Geophys. J. Roy. Astron. Soc.. 1971. V. 26. P. 215–242.
- Birner T. Fine-scale structure of the extratropical tropopause region. J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D04104. doi:10.1029/2005JD006301.
- Caughey S.J. and Readings C.J. An observation of waves and turbulence in the earth's boundary layer // Boundary–Layer Meteorol. 1975. V. 9. P. 279–296.
- Chimonas G. and Peltier W.R. On severe storm acoustic signals observed at ionospheric heights // J. Atmos. Terr. Phys. 1974. V. 36. P. 821–828.
- Chimonas G. Steps, Waves and Turbulence in the Stably Stratified Planetary Boundary Layer // Boundary-Layer Meteorol. 1999. V. 90. P. 398–416.
- Chunchuzov I., Kulichkov S., Otrezov A., Perepelkin V. Acoustic pulse propagation through a fluctuating stably stratified atmospheric boundary layer // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V.117. P. 1868–1879.
- Chunchuzov I., Kulichkov S.N., Perepelkin V., Ziemann A., Arnold K. and Kniffka A. Acoustic tomographic study of the mesoscale coherent structures in the lower atmosphere // Proc. Meetings Acoust. 2007. <http://scitation.aip.org/confst/ASA/pub/8/4pPA5>.
- Chunchuzov I., Kulichkov S., Perepelkin V., Ziemann A., Arnold K., Kniffka A. Mesoscale variations in acoustic signals induced by atmospheric gravity waves // J. Acoust. Soc. Am. 2009. V. 125. № 2. P. 651–664.
- Chunchuzov I., Kulichkov S., Perepelkin V., Popov O., Firs-
tov P., Assink J.D., Marchetti E. Study of the wind velocity-layered structure in the stratosphere, mesosphere and lower thermosphere by using infrasound probing of the atmosphere // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. doi:10.1002/2015JD023276.
- Chunchuzov I.P. Nonlinear formation of the three-dimensional spectrum of mesoscale wind velocity and temperature fluctuations in a stably stratified atmosphere // J. Atmos. Sci. 2018. V. 75. P. 3447–3467.

- Chunchuzov I., Kulichkov S., Popov O., Perepelkin V., Vardanyan A. and Ayvazyan G.* Physical modeling of waveguide propagation and scattering of infrasound signals in the atmosphere. // Proceed. 18-th Long Range Sound Propagation (LRSP) Symposium. 2020. University of the District of Columbia (Washington).
- Chunchuzov I., Kulichkov S., Popov O., Perepelkin V., Vardanyan A. and Ayvazyan G.* Atmospheric boundary layer as a laboratory for modeling infrasound propagation and scattering in the atmosphere. // Pure and Applied Geophysics. 2021. V. 178. № 2. doi:10.1007/s00024-020-02507.
- Chunchuzov I.P., Kulichkov S.N., Popov O.E., and Perepelkin V.G.* Infrasound Generation by Meteorological Fronts and Its Propagation in the Atmosphere // J. Atm. Sci. 2021. V. 78. № 5. P. 1673–1686.
- Chunchuzov I., Kulichkov S., Popov O., Perepelkin V., Vardanyan A. and Ayvazyan G.* Infrasound and Internal Gravity Waves generated by Meteorological Fronts // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2023. V. 0. Acoustical Society of America. <https://doi.org/10.1121/2.0001713>.
- Dalaudier F., Sidi C., Crochet M., Vernin J.* Direct evidence of sheets in the atmospheric temperature field // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. P. 237–248.
- Danilov S.D., and Chunchuzov I.P.* Possible Mechanism of Layered Structure Formation in a Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 1992. V. 28. P. 684–688.
- Einaudi F., and Finnigan J.J.* Wave-turbulence dynamics in the stably stratified boundary layer // J. Atmos. Sci. 1993. V. 50. P. 1841–1863.
- Fritts D.C., Wang L., Werne J.A.* Gravity Wave–Fine Structure Interactions. Part I: Influences of Fine Structure Form and Orientation on Flow Evolution and Instability // J. Atmos. Sci. 2013. V. 70. P. 3710–3734.
- Georges T.M.* Infrasound from convective storms: Examining the evidence // Reviews of Geophysics. 1973. V. 11. № 3. P. 571–594.
- Gossard E.E. and Hooke W.H.* Waves in the atmosphere. 1975. Elsevier, Amsterdam, 456 pp.
- Gossard E.E., Gaynor J.F., Zamor R.J., and Neff W.D.* Fine structure of elevated stable layers observed by sounder and in situ Tower Sensors // J. Atmos. Sci. 1985. V. 42. P. 2156–2169.
- Jones R.M. and Georges T.M.* Infrasound from convective storms. III. Propagation to the ionosphere // J. Acoust. Soc. Am. 1976. V. 59. P. 765. <https://doi.org/10.1121/1.380942>.
- Hung R.J., Plan T. and Smith R.E.* Coupling of ionosphere and troposphere during the occurrence of isolated tornadoes on November 20, 1973 // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 1261–1267.
- Kantha et al.* Atmospheric structures in the troposphere as revealed by high-resolution backscatter images from MU radar operating in range imaging mode // Progress in Earth and Planetary Science. 2019. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0274-1>
- Martin S., Bange J. and Beyrich F.* Meteorological profiling of the lower troposphere using the research UAV “M2AV Carolo” // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4. P. 705–716.
- Lay E.H., Shao X.-M., Kendrick A.K. and Carrano C.S.* Ionospheric acoustic and gravity waves associated with midlatitude thunderstorms // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V.120. P. 6010–6020. doi:10.1002/2015JA021334.
- Laštovička J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 479–497. doi: 10.1016/j.jastp.2005.01.01.
- Hubert Luce et al.* Vertical structure of the lower troposphere derived from MU radar, unmanned aerial vehicle, and balloon measurements during ShUREX 2015 // Progress in Earth and Planetary Science. 2018. V. 5. № 29. <https://progearthplanetsci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-018-0187-4>.
- Nalbandyan O.* The Clouds Microstructure and the Rain Stimulation by Acoustic Waves // Atmospheric and Climate Sciences. 2011. V. 1. P. 86–90 doi:10.4236/acs.2011.13009.
- Plougonven R. and Zhang F.* Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // Reviews of Geophysics, American Geophysical Union. 2014. V. 52. № 1. P. 33–76.
- Šauli P. and Boška J.* Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 945–950.
- Stobie J.G., Einaudi F. and Uccellini L.W.* A case study of gravity waves-convective storms interaction // J. Atmos. Sci. 1983. V. 40. P. 2804–2830.
- Staquet C. and Sommeria J.* Internal gravity waves: From instabilities to turbulence // Annual Review of Fluid Mechanics. 2002. V. 34. P. 559–593.
- Sun J. et al.* Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer // Rev. Geophys. 2015a. V.53. doi:10.1002/2015RG000487.
- Sun J., Mahrt L., Nappo C., Lenschow D.H.* Wind and Temperature Oscillations Generated by Wave–Turbulence Interactions in the Stably Stratified Boundary Layer // J. Atmos. Sci. 2015b. V. 72. P. 1484–1503.
- Tsuda T.* Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (middle and upper atmosphere) radar and GPS (global positioning system) radio occultation // Proc. Japan Acad. 2014. V. 90B. P. 12–27.

- Uccellini L.W.* Historical Perspective on the Research and Operational Application of Weather-Significant Gravity Waves. // Presentation at SPARC Gravity Wave Symposium, May 16–20. 2016. Pennsylvania State University US.
- Vardanyan A.A., Galechyan G.A.* Acoustic waves and flows of negative ions for stimulation of the precipitations // International Journal of Altern. Energy and Ecology. 2012. V. 8. P. 85–90.
- Vardanyan A.A., Galechyan G.A., Perepelkin V.G., Chunchuzov I.P.* On generation of a shock wave in a hail protection setup // Technical Physics. 2011. V. 56. № 10. P. 1524–1526.
- Zeri M. and Sá L.D.A.* Horizontal and Vertical Turbulent Fluxes Forced by a Gravity Wave Event in the Nocturnal Atmospheric Surface Layer Over the Amazon Forest // Boundary-Layer Meteorol. 2011. V. 138. P. 413–431. doi: 10.1007/s10546-010-9563-3.

ACOUSTIC MONITORING OF INTERNAL GRAVITY WAVES IN THE LOWER TROPOSPHERE USING AN ANTI-HAIL ACOUSTIC CANNON

**I. P. Chunchuzov^{1,*}, V. G. Perepelkin¹, S. N. Kulichkov¹, O. E. Popov¹,
G. V. Azizyan¹, A. A. Vardanyan², G. E. Ayzvazyan²**

¹*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, 3 Pyzhevsky Per., 119017 Moscow, Russia*

²*National Polytechnic University of Armenia, 105 Teryan, Yerevan, Armenia*

*e-mail: igor.chunchuzov@gmail.com

The results of study of the influence of internal gravity waves (IGWs) on the spatial and temporal variability of the lower troposphere using a triangular network of three microbarographs and an anti-hail acoustic cannon installed in Talin (Armenia) are presented. By coherent analysis of pressure fluctuations measured at different points, the IGWs generated by thunderstorm cells about 5–6 h before the passage of the cells over the network of microbarographs were detected. The regularities of changes with time of phase speeds and directions of propagation of IGWs precursors of thunderstorms were studied. The possibility of monitoring of IGWs in the troposphere by measuring temporal fluctuations of the travel time of acoustic pulses along the ray-paths connecting the anti-hail cannon with spatially separated acoustic receivers has been demonstrated. Vertical profiles of wind velocity fluctuations in certain layers of the lower troposphere up to a height of 800 m were reconstructed from the shapes and travel times of acoustic pulses with a shock front scattered by a fine layered structure of wind velocity and temperature in the stably-stratified lower troposphere. Due to the high vertical resolution (of the order of 1 m) of the method of pulsed acoustic sounding of the lower troposphere used here, the vertical wavenumber spectra of layered inhomogeneities of wind velocity in the range of short vertical scales, from one to tens of meters, were obtained for the first time and theoretically interpreted.

Keywords: stably-stratified atmospheric boundary layer, mesoscale fluctuations, pulsed acoustic sounding, fine vertical layered structure, lower troposphere