

УДК: 534.2, 534-6, 551.796

## ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ И ИНФРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ ВО ВРЕМЯ УРАГАНА В МОСКВЕ 29 МАЯ 2017 г.

© 2019 г. С. Н. Куличков, И. П. Чунчuzов, О. Е. Попов, В. Г. Перепелкин, Е. В. Голикова, Г. А. Буш, И. А. Репина, Н. Д. Цыбульская, Г. И. Горчаков

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017 Москва, Пыжевский пер., 3  
E-mail: snik1953@gmail.com*

Поступила в редакцию 01.03.2018 г.  
Принята к печати 28.11.2018 г.

В статье приведены данные регистрации внутренних гравитационных волн (ВГВ) и инфразвуковых волн, образовавшихся при прохождении через Москву теплого и холодного фронтов, связанных с атмосферным штормом 29 мая 2017 г. Регистрация волн проводилась на сети 4 микробарографов ИФА–МГУ–Мосрентген–ЗНС, размещенных в Москве и Московской области, и сравнивалась с данными измерений параметров инфразвуковых волн в г. Дубне на станции IS43. Исследуются изменения характеристик ВГВ и инфразвуковых волн (когерентности, азимуты и фазовые скорости распространения, характерные периоды и частотные спектры) с течением времени при прохождении теплого и холодного фронтов. Исследуется также переход от гравитационной к акустической дисперсионной ветви акустико-гравитационных волн с ростом частоты и временная модуляция фазовой скорости инфразвуковых волн, вызванная ВГВ. Приведены данные измерений концентраций аэрозоля  $PM_{10}$  и концентрации газа  $NO_2$  в разных пунктах г. Москвы в процессе приближения атмосферного шторма. Исследуется возможность обнаружения волновых предвестников атмосферных штормов одновременно в вариациях атмосферного давления, скорости ветра и концентрациях примесей.

**Ключевые слова:** внутренние гравитационные волны, инфразвуковые волны, атмосферный шторм, когерентность, теплый фронт, холодный фронт, фазовая скорость, волновой предвестник.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555232-40>

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Внутренние гравитационные волны (ВГВ) в атмосфере являются предметом интенсивных исследований, проводившихся за последние, как минимум, полвека, начиная с работы Хайнса [1], посвященной исследованию распространения этих волн от тропосферных источников до высот ионосферы. Столь пристальное внимание к ВГВ связано с теми многочисленными эффектами, которые они оказывают на атмосферную циркуляцию, вертикальную структуру метеорологических полей, их изменчивость и турбулентный режим всех слоев атмосферы. Результатам, достигнутым в изучении этих эффектов, посвящена обширная литература, включая известные монографии Госсарда и Хука [2], Гилла [3], Лайтхилла [4], Холтона [5] и обзоры [6–7]. Однако до сих пор у исследователей динамики ВГВ нет единого мнения по поводу

физических механизмов генерации ВГВ и их воздействия на формирование пространственной структуры и энергетических спектров вариаций метеорологических полей [7].

Практически непрерывными во времени источниками ВГВ являются нестационарные процессы формирования метеорологических фронтов. Непрерывная адаптация метеорологических полей к состоянию квазигеострофического и квазистатического равновесия сопровождается излучением как трехмерных акустических и внутренних гравитационных волн, так и квазидвумерных волн, распространяющихся горизонтально под влиянием вращения Земли и силы тяжести [8]. Проблемам генерации ВГВ атмосферными фронтами и струйными течениями в тропосфере посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ, которые анализируются в обзорах [9, 10]. С одной

стороны ВГВ и инфразвуковые волны, генерируемые мощными конвективными штормами (грозы, ураганы, смерчи, тайфуны), могут играть роль волновых предвестников этих штормов, регистрируемых разными методами в верхних слоях атмосферы [11–18] и на поверхности земли [19–23]. С другой стороны, взаимодействие длинных ВГВ (горизонтальные длины волн 300–400 км, периоды 2–4 ч), имеющих большие амплитуды давления (до 1 мбар), с конвекцией в тропосфере может приводить к зарождению конвективных штормов, тем самым такие волны могут сами влиять на погоду [10, 21].

В настоящей работе представлены результаты исследования закономерностей изменения во времени характеристик внутренних и инфразвуковых волн (когерентности, азимуты распространения и горизонтальные фазовые скорости) в период прохождения через Москву атмосферного шторма 29 мая 2017 г., который привел к серьезным разрушениям и человеческим жертвам в городе.

Проблема мониторинга атмосферных фронтов, как источников внутренних и инфразвуковых волн, состоит в их большой протяженности: их характерная длина может достигать 1000 км и более, а размер поперек фронта составляет сто и более км. При расстоянии до приемной системы в несколько сотен километров волны могут приходить от разных участков фронта в широком диапазоне азимутальных углов. Кроме этого, волны от атмосферных фронтов могут приходить с одного азимутального направления, но под разными вертикальными углами скольжения (углами места), что делает пеленгацию отдельных областей генерации волн проблематичной. Необходимо также заметить, что фронты генерируют ВГВ и инфразвук в широком диапазоне частот и длин волн, поэтому для их пеленга необходимы группы приемников с разными расстояниями между ними, от нескольких километров до сотен километров. Именно такой уникальный комплекс непрерывной регистрации внутренних волн и инфразвука был создан в Москве и Московской области [19, 23–24]. Он позволяет регистрировать волновые возмущения разных масштабов в поле атмосферного давления (с помощью сети микробарографов и инфразвуковых приемников), в поле скорости ветра в атмосферном пограничном слое (с помощью сети акустических локаторов — содаров) и в концентрациях парниковых газов и аэрозоля [23].

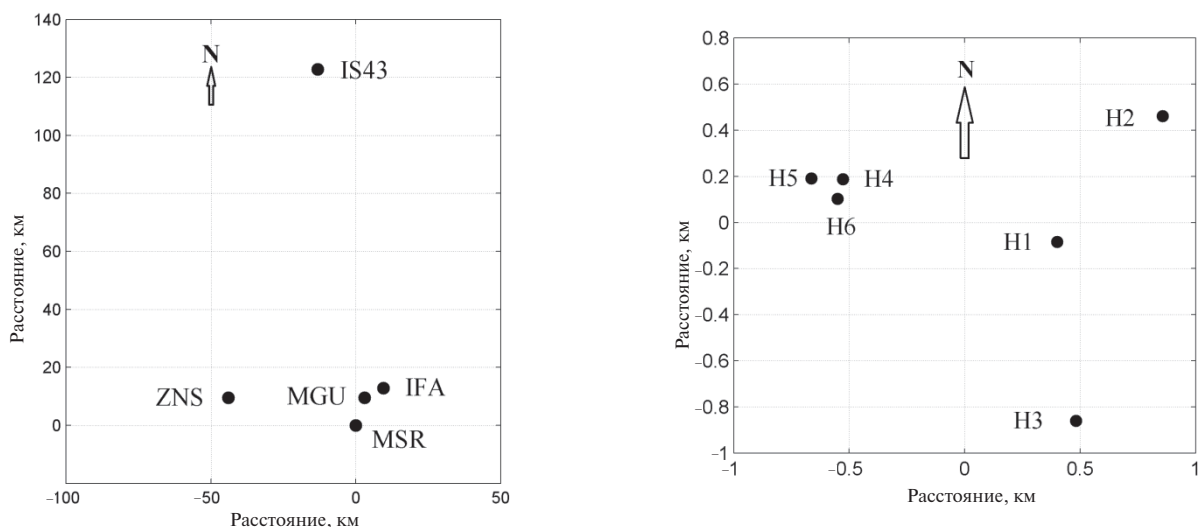
Результаты регистрации ВГВ и инфразвука от атмосферных фронтов и их характеристик,

полученных с помощью корреляционного анализа, будут приведены в разделе 2. Зависимость параметров волновых предвестников от времени в процессе прохождения через наблюдательный комплекс атмосферного шторма от 29 мая 2017 г. проанализирована в разделе 3, а влияние этих предвестников и самого шторма на концентрации аэрозоля ( $PM_{10}$ ) и газовых составляющих ( $NO_2$ ) обсуждается в разделе 4.

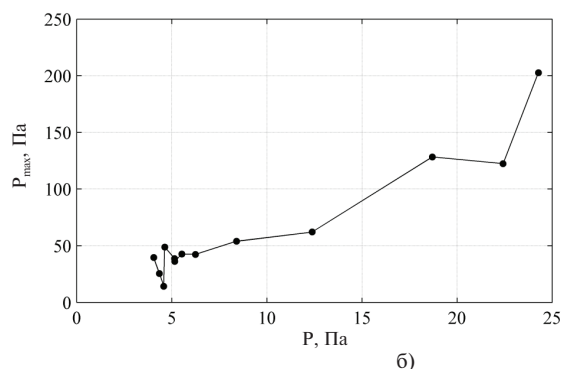
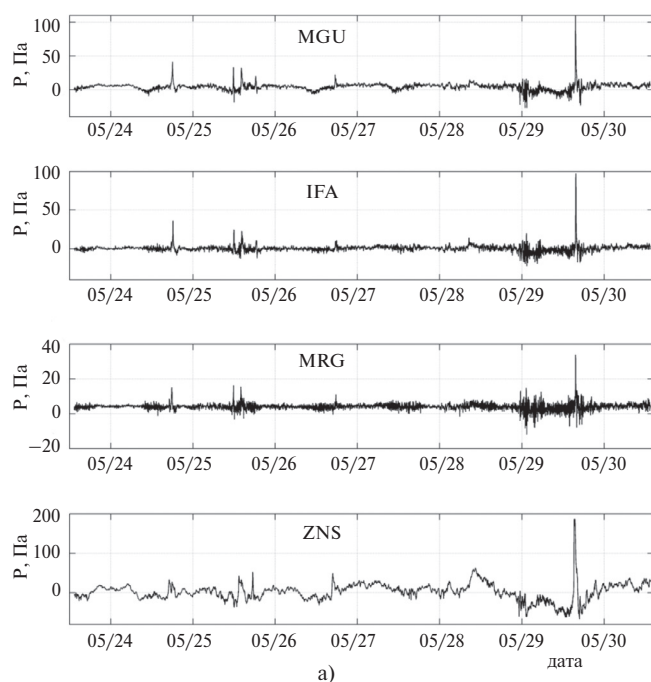
## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ВГВ ОТ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ В МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ

Измерительный комплекс состоит из сети четырех микробарографов для измерения волновых возмущений атмосферного давления в диапазоне частот инфразвука и ВГВ, 0.003–3 Гц, расположенных в ИФА, МГУ, пос. Мосрентген, на Звенигородской научной станции (ЗНС), обозначенных через IFA, MGU, ZNS, MSR соответственно (рис. 1, слева) и размещенных в Москве и Московской области. Расстояния между микробарографами от 7 до 54 км. Корреляционный анализ данных этого комплекса проводился одновременно с анализом измерений флуктуаций давления на инфразвуковой станции (IS43) в Дубне с помощью шести инфразвуковых приемников, схема расположения которых показана на рис. 1 справа.

На рис. 2а показаны данные измерений флуктуаций атмосферного давления за период с 23 по 30 мая 2017 г. Хорошо заметно увеличение интенсивности флуктуаций в ночь с 28 на 29 мая и резкий скачок давления перед прохождением шторма 29 мая. Результаты корреляционного анализа волнового предвестника шторма 29 мая представлены ниже. Кроме самого шторма, наблюдались более слабые по амплитуде скачки давления в предыдущие дни, 24 и 25 мая, связанные с прохождением атмосферных фронтов в эти дни. Этим фронтам тоже предшествуют длительные волновые предвестники, причем видно, что чем больше амплитуда скачка давления, связанного с данным фронтом, тем больше и амплитуда его волнового предвестника, примерно за 3–4 ч до прихода скачка давления. Зависимость амплитуд скачков давления  $P_{max}$  перед атмосферными фронтами, с амплитудами вариаций давления  $P$  в предвестниках прихода фронта показана на рис. 2б. Она построена по 12 фронтам. Хорошо видна тенденция роста  $P_{max}$  с ростом  $P$ .



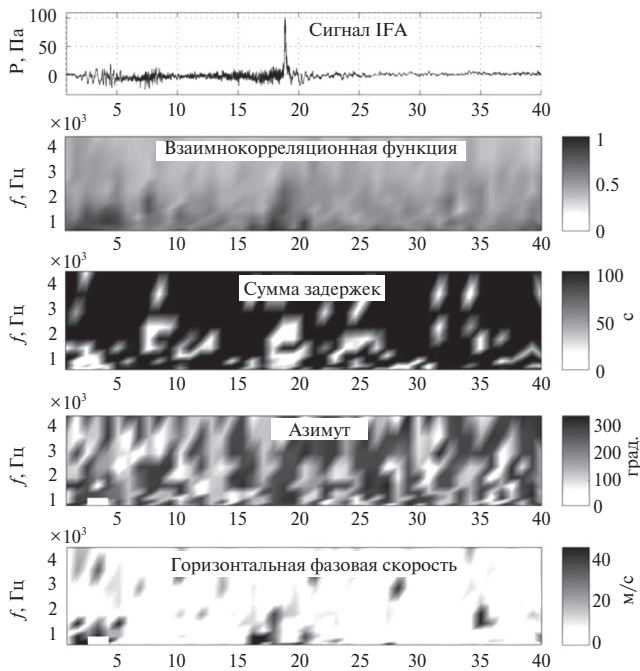
**Рис. 1.** Слева: расположение микробарографов IFA, MGU, ZNS, MSR и инфразвуковой станции IS43. Справа: расположение на карте шести инфразвуковых приемников H1–H6 на станции IS43 в Дубне. N — направление на север.



**Рис. 2.** Связь амплитуды скачка давления перед атмосферным фронтом с амплитудой вариаций давления в предвестнике прихода фронта. а) Вариации атмосферного давления, регистрируемые с 23.05.2017 по 30.05.2017 на сети микробарографов MGU–IFA–MSR–ZNS. Наблюдается увеличение интенсивности флуктуаций в ночь с 28 на 29 мая и резкий скачок давления  $P_{\max}$  перед прохождением шторма 29 мая. б) Зависимость амплитуд скачков давления  $P_{\max}$  перед атмосферными фронтами от амплитуд вариаций давления  $P$  в предвестниках прихода фронта. Кривая построена по 12 фронтам.

На рис. 3 представлены результаты корреляционного анализа флуктуаций атмосферного давления на трех микробарографах в Москве, IFA–MGU–MRG, для периода времени с 23.05.2017 по 30.05.2017. Волновые вариации давления на фоне турбулентности выделяются в случаях, когда взаимные корреляционные функции флуктуаций давления для каждой пары микробарографов выбранного треугольника, достигают максимумов одновременно с обращением в нуль суммы разностей временных задержек вариаций в этих пунктах. На рис. 3 (первая и вторая панели сверху) отчетливо видны вре-

менные интервалы, в которых при стремлении средней (по трем пунктам) корреляционной функции к единице величина суммы задержек близка к нулю. В этих интервалах наблюдаются устойчивые во времени азимуты прихода волн (рис. 3 третий график сверху) и их горизонтальные фазовые скорости (рис. 3, нижний график). К таковым относится временной интервал 15–20 ч, содержащий скачок давления, наблюдавшийся перед приходом шторма, и его предвестник в виде цуга ВГВ, пришедших в пункт наблюдения за 3–4 ч до прихода шторма. Кроме этого, когерентный цуг ВГВ наблю-

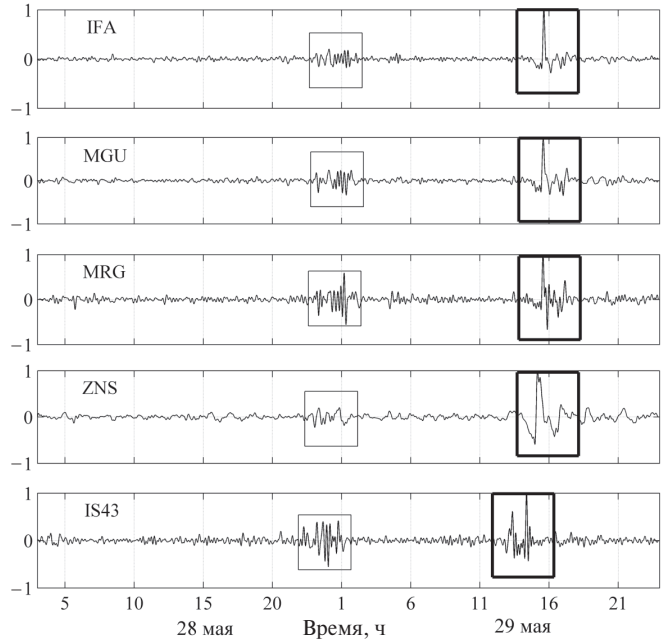


**Рис. 3.** Вариации атмосферного давления перед атмосферным штормом 29 мая 2017 г. Вверху — вариации атмосферного давления, зарегистрированные в пункте IFA с 23.05.2017 по 30.05.2017. Ниже — результаты корреляционной обработки вариаций атмосферного давления: зависимость от частоты и времени средней (для трех пар приемников 1–2, 2–3 и 3–1) взаимной корреляционной функции, суммы задержек приходов сигналов для трех пар приемников 1–2, 2–3 и 3–1, азимута приходов сигналов и горизонтальной фазовой скорости ВГВ.

дался в интервале 1–5 ч, который, как следует из анализа метеорологических карт, был вызван приходом теплового фронта задолго (более чем за 15 ч) до прихода самого шторма.

### 3. РЕГИСТРАЦИЯ ВГВ И ИНФРАЗВУКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТЕПЛОГО И ХОЛОДНОГО ФРОНТОВ 28–29 МАЯ 2017 г. В МОСКОВСКОМ РЕГИОНЕ

На рис. 4 представлены сигналы перед приходом атмосферного шторма и резкий скачок давления, вызванный штормом 29 мая, измеренные в пяти пунктах, включая Дубну. Во всех пяти пунктах наблюдался длительный цуг волн вечером 28 мая (очерчен левым прямоугольником, тонкая линия), примерно за 15 ч до прихода резкого скачка давления 29 мая (очерчен правым прямоугольником, толстая линия), вызванного приходом холодного фронта и атмосферного шторма. Некоторое различие в формах сигналов обусловлено главным образом различием в ча-

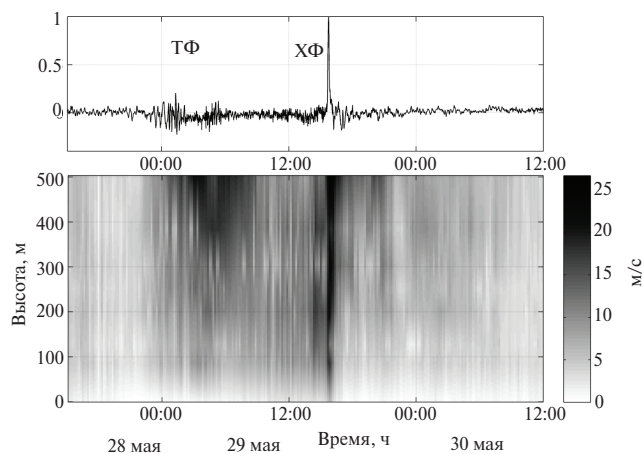


**Рис. 4.** Сигналы-предвестники атмосферного шторма в ночь с 28 на 29 мая и резкий скачок давления во время шторма 29 мая. Начало в 03:00 MSK 28.05.2017. Максимум сигнала принят за 1. Полоса сигнала 0.0001–0.0015 Гц. Цуги внутренних волн, очерченных левым прямоугольником (тонкая линия), вызваны теплым фронтом, пришедшим в пункты наблюдения более, чем за 15 ч до прихода цуга ВГВ и резкого скачка давления, связанного с холодным фронтом и атмосферным штормом 29 мая (очерчен правым прямоугольником, толстая линия).

стотных характеристиках датчиков давления в Москве и Дубне.

Среднее направление прихода сигнала во время прохождения холодного фронта атмосферного шторма составляло около  $307^\circ$ , т. е. сигнал приходил с северо-запада. Горизонтальные фазовые скорости распространения этих волн превышали скорости ветра и достигали 50 м/с. Это указывало на возможность использования ВГВ-предвестников для заблаговременного в реальном времени прогноза прохождения атмосферных фронтов за несколько часов.

Анализ метеорологических карт и радиолокационных отражений метеорадаара показал, что в ночь с 28 на 29 мая к Москве подошел теплый фронт, а холодный фронт пришел в Москву (пункт IFA) в 15:20–15:30 MSK. Именно с приходом теплового фронта и был связан длительный цуг волн (левый прямоугольник на рис. 4), зарегистрированный в пяти пунктах. При прохождении холодного фронта (правый прямоугольник) во второй половине дня 29 мая в Москве и области наблюдались шквалы ветра большой раз-

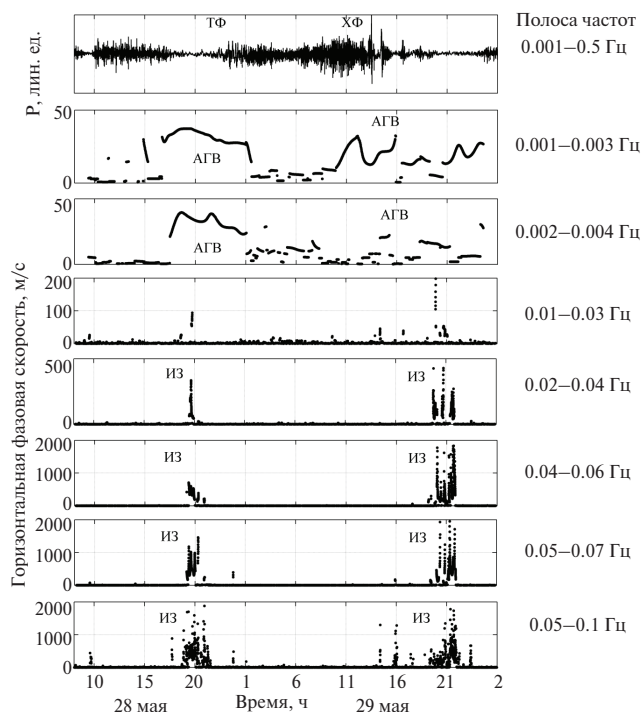


**Рис. 5.** Вверху — сигналы-предвестники атмосферного шторма, зарегистрированные в IFA, в ночь с 28 на 29 мая и резкий скачок давления во время шторма 29 мая. Внизу: скорость ветра в зависимости от высоты, измеренная на Останкинской телебашне. Заметен сильный рост скорости ветра с высотой в периоды прохождения теплого (ТФ) и холодного (ХФ) фронтов.

рушительной силы, скорость ветра в порывах достигала 30 м/с (рис. 5). Заметен сильный рост скорости ветра с высотой, измеренной на телебашне в Останкино, в периоды прохождения теплого и холодного фронтов.

Примерно в 15:30 был зафиксирован и основной приход ВГВ с резким скачком интенсивности сигнала (рис. 4). Азимут прихода сигнала равен примерно  $308^\circ$ , его горизонтальная скорость распространения достигала 40 м/с и больше. Таким образом, наиболее вероятное время прохождения холодного фронтального раздела у земли через Москву (IFA) можно считать время 15:30 MSK, 29.05.2017.

Благодаря корреляционному анализу вариаций давления на треугольной антенне приемников в г. Дубне (см. рис. 1 справа) в разных частотных диапазонах удалось выделить не только ВГВ, но и инфразвуковые волны от атмосферного шторма 29 мая. На рис. 6 показаны горизонтальные фазовые скорости (вертикальная ось, м/с) ВГВ и инфразвуковых волн в разных частотных диапазонах, наблюдавшихся при прохождении теплого и холодного фронтов через г. Дубну. В низкочастотных диапазонах, в которых частоты лежат ниже типичной частоты Брента–Вяйсяля в тропосфере (соответствующие периоды выше 5 мин) фазовые скорости волновых возмущений не превышают 50 м/с, т. е. типичны для ВГВ. Заметим, что ВГВ обнаруживались как за несколько часов до прихода шторма, так и после его прохождения через приемную сеть (рис. 6, 2-я и 3-я панели сверху).

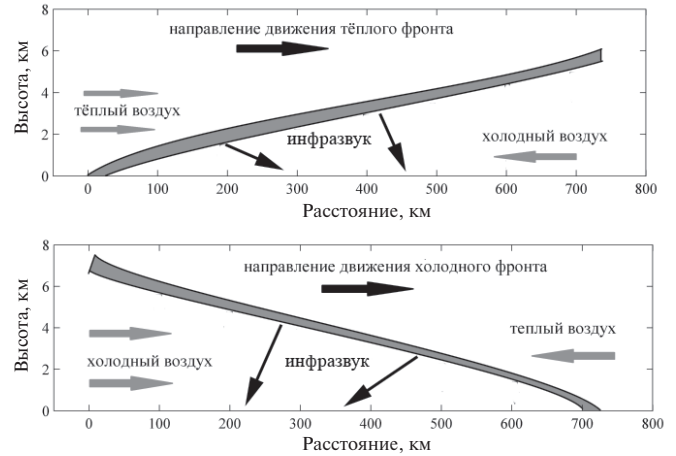
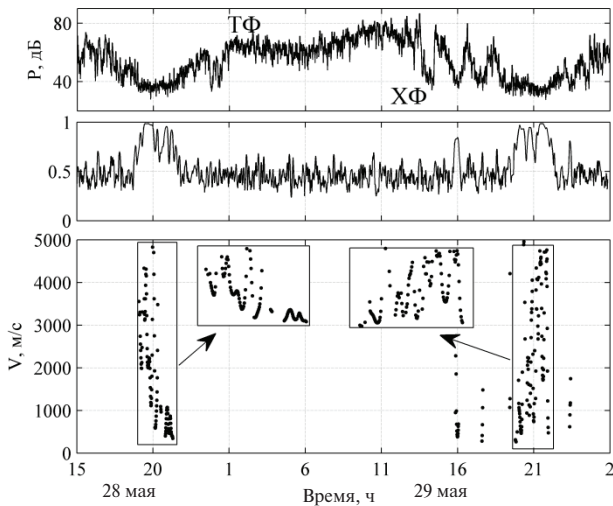


**Рис. 6.** Вверху: сигнал, зарегистрированный одним из приемников IS43. Ниже — зависимости от времени горизонтальных фазовых скоростей атмосферных гравитационных волн (АГВ) и инфразвука (ИЗ) от теплого (ТФ) и холодного (ХФ) фронтов в разных частотных полосах. Время MSK.

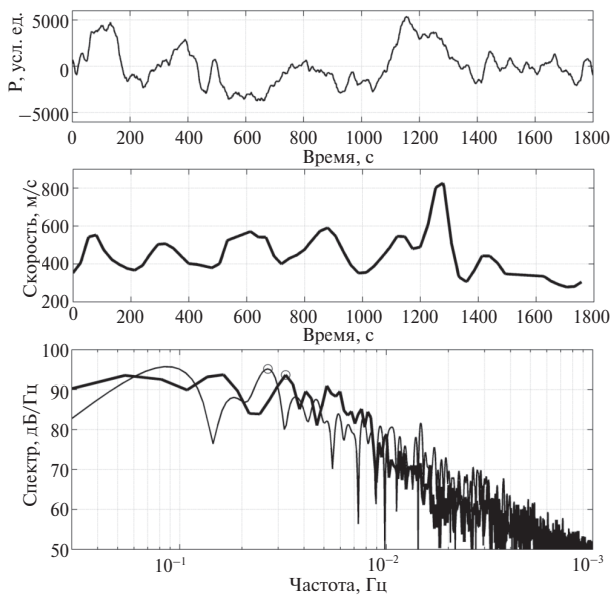
При переходе к высокочастотным диапазонам, внутри которых частоты выше 0.01 Гц (соответствующие периоды менее 100 с) наблюдается резкое увеличение горизонтальных фазовых скоростей волновых возмущений, достигающих в определенные промежутки времени значений 1000 м/с (панели 4–8 на рис. 6).

Столь высокие горизонтальные фазовые скорости волн можно объяснить тем, что эти волны, во-первых, принадлежат уже к акустической дисперсионной ветви акустико-гравитационных волн (см., например, [2], [14]), а во-вторых, приходят под большими вертикальными углами скольжения к поверхности земли (выше 60 град).

Из рис. 7 видно, что при прохождении теплого фронта, горизонтальная фазовая скорость, несмотря на временные осцилляции, имеет тенденцию к уменьшению с течением времени, примерно от 1000 м/с до 330 м/с. Такая зависимость может быть вызвана тем, что по мере приближения теплого фронта, инфразвук вначале приходит под большими углами скольжения к поверхности земли от высоко расположенных участков фронта, где источниками звука могут быть слои турбулентности, расположенные в верхней тропосфере (направления распространения инфразвука ука-



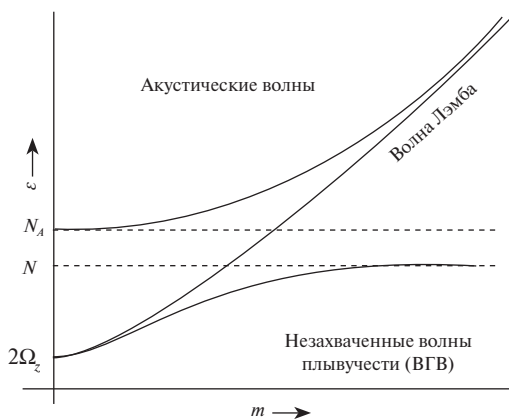
**Рис. 7.** Слева сверху — уровень ИЗ на одном из приемников IS43 в полосе частот 0.05–0.1 Гц в периоды прохождения теплового и холодного фронтов 28–29 мая. Ниже взаимная корреляционная функция для пары приемников IS43 и соответствующая максимумам корреляции горизонтальная фазовая скорость. Справа: схематичное изображение теплового и холодного фронтов. Наклонные стрелки — условное обозначение излучения инфразвука фронтом.



заны стрелками вверх на рис. 7 справа). По мере дальнейшего приближения теплового фронта, инфразвук приходит от более низко расположенных участков фронта и под более низкими углами скольжения, чем он приходил в начальные моменты его регистрации.

При прохождении же холодного фронта, с другой геометрией и наклоном к земной поверхности, фазовая скорость, наоборот, проявляет тенденцию роста с течением времени после прохождения фронта. Это, как схематически показано на рис. 7 (внизу справа), связано с регистрацией вначале волн от низких участков фронта, а затем, по мере его прохождения и удаления от приемной системы — от более высоких его участков.

Как видно из рис. 7 фазовая скорость испытывает осцилляции во времени. Они показаны также на рис. 8 (вторая панель сверху) в течение



**Рис. 8.** Временные осцилляции давления в сигнале, измеренном инфразвуковым приемником IS43 (верхняя панель), и горизонтальной фазовой скорости инфразвуковых волн (вторая панель сверху) в промежутке 16.4–16.9 ч, 28 мая 2017 г. На третьей панели сверху показаны их спектральные оценки: для давления — тонкой линией и для фазовой скорости — толстой линией. Кружками указаны спектральные максимумы с периодами 6 и 5 мин, типичными для коротких ВГВ. На нижней панели, для иллюстрации дисперсионных ветвей АГВ, воспроизведен рисунок из книги [2] (с. 134), на котором показана акустическая ветвь (выше нижней акустической частоты  $N_A$ ), ветвь ВГВ (ниже частоты  $N$ ) и ветвь (прямая посередине), соответствующая волне Лэмба. По горизонтальной оси отложено горизонтальное волновое число, по вертикальной — частота,  $2\Omega_z$ -инерционная частота или параметр Кориолиса.

короткого промежутка времени: 16.4–16.9 ч, 28 мая, вместе с осцилляциями давления на одном из приемников (первая панель сверху). Спектральные оценки осцилляций давления и фазовой скорости (3-я панель сверху), нормированных на соответствующие среднеквадратичные значения осцилляций, охватывают диапазон частот (примерно 0.001–0.1 Гц), включающий таковой для акустико-гравитационных волн, примерный вид дисперсионных зависимостей которых показан на рис. 8 внизу. Эти спектры имеют близкие по частоте спектральные максимумы, соответствующие периодам 5–6 мин, типичным для коротких внутренних волн. Возможное объяснение появлению таких осцилляций связано с модуляцией скорости ветра внутренними волнами, а, следовательно, и горизонтальной фазовой скорости инфразвуковых волн относительно неподвижной приемной антенны. Кроме этого, внутренние волны вызывают периодические вертикальные смещения слоев турбулентности, генерирующих инфразвук, что в свою очередь приводит к периодическим вариациям угла скольжения и горизонтальной фазовой скорости волн. Эти предположения относительно модуляции внутренними волнами высоты расположения источников наблюдаемых инфразвуковых волн требуют дальнейшей экспериментальной проверки. Тем не менее, нам впервые удалось наблюдать различие в закономерностях распространения и параметрах инфразвуковых волн, генерируемых теплыми и холодными фронтами.

#### 4. ВЛИЯНИЕ ВГВ НА ПРИМЕСИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ТЕПЛОГО И ХОЛОДНОГО ФРОНТОВ

Согласно данным Мосэкомониторинга, во время прохождения шторма и задолго (примерно за 15 ч) до его прохождения через сеть измерения наблюдались резкие изменения в концентрациях аэрозоля  $PM_{10}$  и диоксида азота  $NO_2$  в Москве (рис. 9–10). Эти скачки концентрации наблюдались одновременно со скачками давления, напоминая по форме импульсы с ударным фронтом (рис. 9). Возможный механизм образования скачков давления во внутренних волнах, генерируемых холодным фронтом, действительно аналогичен механизму образования ударного фронта в одиночной акустической волне конечной амплитуды и был изложен в работе [22]. Индуцируемая внутренними волнами переменная

адвекция частиц среды и аэрозоля, как пассивной примеси, способна вызывать наблюдаемые резкие изменения в концентрации частиц аэрозоля, в данном случае  $PM_{10}$  [23]. Резкое увеличение наблюдалось также в концентрациях  $NO_2$  в пяти пунктах Москвы в периоды прохождения через эти пункты теплого и холодного фронтов (рис. 10). Таким образом, благодаря влиянию ВГВ-предвестников на вариации примесей, последние тоже начинают “ощущать” приближение атмосферных штормов задолго до их прохождения через сеть наблюдения.

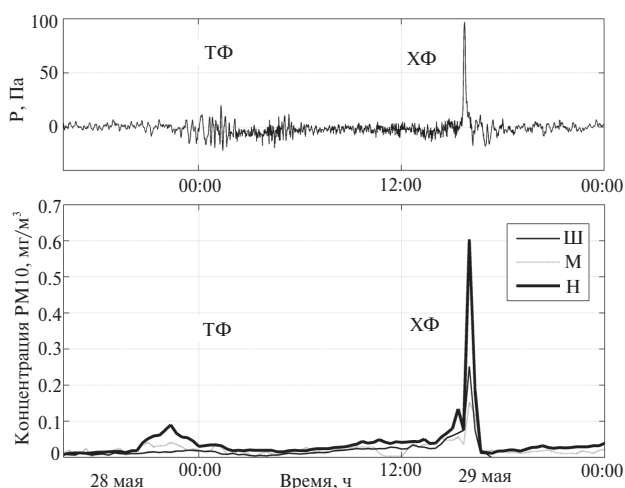


Рис. 9. Вариации давления в ИФА (вверху) и концентрация (в  $mg/m^3$ ) аэрозоля  $PM_{10}$  (внизу) в пунктах Шаболовка (Ш), Мелитопольская ул. (М) и Новокосино (Н) при прохождении теплого фронта (ТФ) и холодного фронта (ХФ) 28–29 мая 2017.

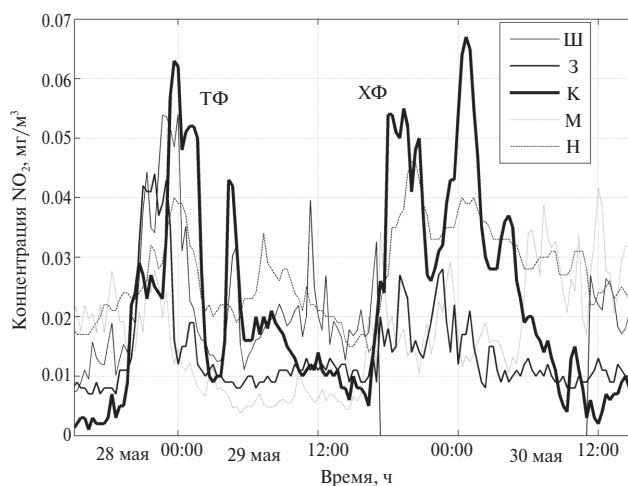


Рис. 10. Вариации концентрации диоксида азота ( $NO_2$ ) в пунктах Шаболовка (Ш), Звенигород (З), Кожухово (К), Мелитопольская ул. (М) и Новокосино (Н) при прохождении через г. Москву теплого (ТФ) и холодного (ХФ) фронтов 28–29 мая 2017 г.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведены данные регистрации ВГВ и инфразвуковых волн при прохождении теплого и холодного фронтов, связанных с атмосферным штормом 29 мая 2017 г. Дана интерпретация наблюдаемым закономерностям изменения характеристик ВГВ и инфразвуковых волн при прохождении теплого и холодного фронтов. Впервые выявлены различия в этих закономерностях, вызванные различием в геометриях теплого и холодного фронтов.

Структура и размеры применяемого измерительного комплекса позволили надежно определить характеристики (когерентности, азимуты, скорости распространения) основных приходов ВГВ от атмосферных фронтов в области длин волн от единиц до сотен километров. На основе данных сети четырех микробарографов ИФА–МГУ–Мосрентген–ЗНС, размещенных в Москве и Московской области, в перспективе можно построить систему предупреждения о подходе атмосферных фронтов к московскому региону, а также по оценке их мощности. Анализ данных этого комплекса совместно с данными инфразвуковых измерений в г. Дубне позволил впервые пронаблюдать переход от ВГВ к акустической дисперсионной ветви акустико-гравитационных волн, генерируемых фронтами. При таком переходе был обнаружен скачок фазовой скорости волн с ростом частоты и модуляция фазовой скорости инфразвуковых волн, вызванная ВГВ.

Во время прохождения шторма и задолго (примерно за 15 ч) до его прохождения через сеть измерения наблюдались также резкие изменения концентраций аэрозоля PM10 и концентрации газа NO<sub>2</sub> в Москве. Именно влияние ВГВ-предвестников на вариации примесей приводит к тому, что примеси тоже начинают “ощущать” приближение атмосферных штормов задолго до их прохождения через сеть наблюдения.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы Президиума РАН № 56П «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности» (раздел 1), грантов РФФИ № 14-47-00049 (раздел 2) и РФФИ 18-05-00576 (разделы 3) и 18-55-05002 (раздел 4).

**Благодарности.** Авторы благодарят Мосэкомониторинг за предоставленные данные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hines C.O.* Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* 1960. V. 38. P. 1441–1481.
2. *Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. М.: “Мир”, 1978. 531 с.
3. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. Т. 2. М.: «Мир», 1986. 415 с.
4. *Лайтхилл Д.* Волны в жидкостях. М.: “Мир”, 1981. 598 с.
5. *Холтон Д.Р.* Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 223 с.
6. *Fritts D.C.* Gravity wave saturation in the middle atmosphere: A review of theory and observations // *Reviews of Geophysics*, 1984. V. 22. P. 275–308.
7. *Fritts D.C., Alexander M.J.* Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // *In Reviews of Geophysics*. 2003. V. 41. P. 1–59.
8. *Обухов А.М.* Турбулентность и динамика атмосферы. Гидрометеиздат, 1988. 414 с.
9. *Plougonven R., Zhang F.* Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // *Reviews of Geophysics*. 2014. V. 52. I. 1. P. 33–76. American Geophysical Union.
10. *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.
11. *Jones R.M., Georges T.M.* Infrasound from convective storms. III. Propagation to the ionosphere // *J. Acoust. Soc. Am.* 1976. V. 59. P. 765–779. Doi: 10.1121/1.380942
12. *Lay E.H., Shao X.-M., Kendrick A.K., Carrano C.S.* Ionospheric acoustic and gravity waves associated with midlatitude thunderstorms // *J. Geophys. Res. Space Physics* 2015. V. 120. I. 7. P. 6010–6020. Doi: 10.1002/2015JA021334
13. *Chimonas G., Peletier W.R.* On severe storm acoustic signals observed at ionospheric heights // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1974. V. 36. I. 5. P. 821–828.
14. *Григорьев Г.И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // *Изв. ВУЗов Радиофизика.* 1999. Т. 52. № 1. С. 3–24.
15. *Laštovička J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2006. V. 68. I. 3. P. 479–497. Doi: 10.1016/j.jastp.2005.01.018
16. *Šindelářová T., Burešová D., Chum J.* Observations of acoustic-gravity waves in the ionosphere generated by severe tropospheric weather // *Stud. Geophys. Geod.* 2009. V. 53. I. 3. P. 403–418.
17. *Šauli P., Boška J.* Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2001. V. 63. I. 9. P. 945–950.
18. *Xiao Z., Xiao S.G., Hao Y.Q., Zhang D.H.* Morphological features of ionospheric response to typhoon // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. I. A04. P. 1–5.



19. Куличков С.Н., Цыбульская Н.Д., Чунчузов И.П., Гордин В.А., Быков Ф.Л., Чуличков А.И., Перепелкин В.Г., Буш Г.А., Голикова Е.В. Некоторые результаты регистрации внутренних гравитационных волн от атмосферных фронтов в московском регионе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 455–469.
20. Blanc E., Farges T., Le Pichon A., Heinrich P. Ten year observations of gravity waves from thunderstorms in western Africa // J. Geophys. Res. Atmos. 2014. V. 119. I. 11. P. 6409–6418. Doi: 10.1002/2013JD020499.
21. Stobie J.G., Einaudi F., Uccellini L.W. A case study of gravity waves-convective storms interaction // J. Atm. Sci. 1983. V. 40. P. 2804–2830.
22. Tepper M. The Application of the Hydraulic Analogy to Certain Atmospheric Flow Problems // Research paper no. 35, us weather bureau. 1952. 50 p.
23. Чунчузов И.П., Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Горчаков Г.И., Каллистратова М.А., Джоза А., Лу Джун Л., Пенсяо Тэнг П., Ичун Янг И., Ву Лин В., Килонг Ли К., Ели Сан Е. Влияние внутренних гравитационных волн на метеорологические поля и газовые примеси вблизи городов Москва и Пекин // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 597–611.
24. Chunchuzov I., Kulichkov S., Popov O., Perepelkin V. Acoustic-gravity waves observed during strong atmospheric storms in Moscow region // Proc. Long-range sound propagation symposium. 2018. June 12–14. Lyon, France.

## Internal Gravity and Infrasound Waves During a Hurricane in Moscow on May 29, 2017

S. N. Kulichkov, I. P. Chunchuzov, O. E. Popov, V. G. Perepelkin, E. V. Golikova,  
G. A. Bush, I. A. Repina, N. D. Tsybulskaya, G. I. Gorchakov

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS  
Pyzhevsky per., 3, Moscow 109017, Russia  
e-mails: snik1953@gmail.com, igor.chunchuzov@gmail.com*

Received: 01.03.2018

Accepted: 28.11.2018

The results of recording of internal gravity waves (IGWs) and infrasound waves from the warm and cold fronts associated with the atmospheric storm passing through Moscow on May 29, 2017 are presented. The waves were recorded by a network of 4 microbarographs IFA–MGU–MSR–ZNS located in Moscow and Moscow region, and compared with the data of measurements of the parameters of infrasound waves at infrasound station IS43 in Dubna. We study the temporal changes in the characteristics of IGWs and infrasound waves (coherence, direction of propagation, phase velocities, characteristic periods and frequency spectra) with the passage of warm and cold fronts through the network. The transition from the gravity to the acoustic dispersive branch of acoustic-gravity waves due to an increase in frequency and the temporal modulation of the phase velocity of infrasound waves caused by IGWs are also studied. The measurement data for PM<sub>10</sub> aerosol concentrations and NO<sub>2</sub> gas concentrations at various locations in Moscow during a passage of atmospheric storm are presented. The possibility of detecting wave precursors of atmospheric storms simultaneously in variations of atmospheric pressure, wind velocity and aerosol concentrations is studied.

**Keywords:** internal gravity waves, infrasound waves, atmospheric storm, coherence, warm front, cold front, phase velocity, wave precursor.