

УДК 551.796:534.2,534-6

## ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И СКОРОСТИ ВЕТРА В ТРОПОСФЕРЕ, СВЯЗАННЫЕ С СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ

© 2021 г. И. П. Чунчuzов<sup>а</sup> \*, С. Н. Куличков<sup>а</sup>, О. Е. Попов<sup>а</sup>,  
В. Г. Перепелкин<sup>а</sup>, Д. В. Зайцева<sup>а</sup>, В. М. Сомсиков<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт Физики Атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

<sup>б</sup>Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби, просп. Аль-Фараби, 71, Алма-Ата, 050040 Казахстан

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

Поступила в редакцию 14.07.2021 г.

После доработки 28.07.2021 г.

Принята к публикации 11.08.2021 г.

Исследуются основные характеристики (когерентности, фазовые скорости, направления распространения, характерные периоды и амплитуды) волновых возмущений в поле давления и скорости ветра в тропосфере, вызванных движущимся относительно земли солнечным терминатором (СТ). Для обнаружения волновых возмущений от СТ применялся когерентный анализ вариаций давления, измеряемых с помощью микробарографов инфразвуковых станций IS26 (Германия), IS37 (Норвегия), IS43 (Россия), составляющих треугольник с размерами сторон около 2000 км. С помощью такого большого по размерам треугольника удается выделить акустико-гравитационные волны высокой когерентности с азимутами и скоростями распространения СТ на фоне значительно более медленных внутренних гравитационных волн (ВГВ) от метеорологических фронтов. Проведены измерения флуктуаций скорости ветра и атмосферного давления с помощью содаров и микробарографов, расположенных в московском регионе и составляющих малый треугольник с длинами сторон от 7 до 60 км. Получены распределения числа приходов сигналов по азимутам и по горизонтальным фазовым скоростям. Дано объяснение наличию доминирующих азимутов и фазовых скоростей ВГВ на малом треугольнике.

**Ключевые слова:** солнечный терминатор, внутренние гравитационные волны, содары, флуктуации давления и скорости ветра, восходы и заходы солнца

DOI: 10.31857/S0002351521060031

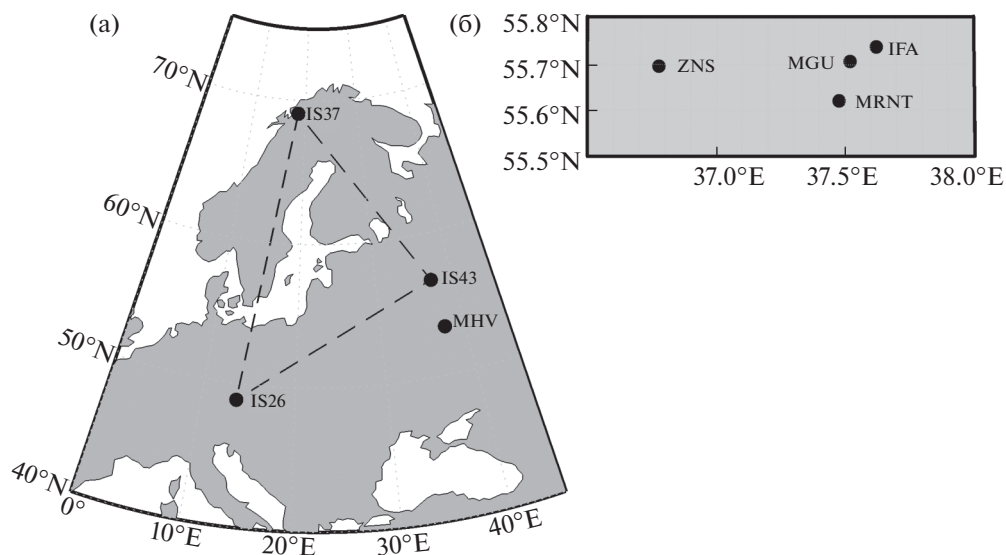
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Волновые возмущения в атмосфере, генерируемые движущейся относительно земли границей света и тени – солнечным терминатором (СТ), нередко обнаруживаются в верхних слоях атмосферы как наземными, так и спутниковыми методами [1–3]. Подробный обзор экспериментальных исследований и теоретических моделей генерации волн СТ, начиная еще с первых работ в этом направлении [4, 5], дан в [6]. Здесь же приведено решение уравнения в сферической системе координат, описывающее поле акустико-гравитационных волн в изотермической атмосфере, генерируемое движущимся относительно земли градиентом потока солнечной радиации, связанным с СТ ([6], уравнение (12)). Волновое поле на некоторой частоте, генерируемое движущимися вместе с СТ тепловыми источниками, представлялось в виде суперпозиции бегущих с востока на запад акустико-гравитационных мод с разными

зональными волновыми числами, и амплитудами, осциллирующими по высоте и широте места.

На широтах ниже 45 град движение СТ становится сверхзвуковым. При совпадении скорости СТ со скоростью звуковых волн в атмосфере возможен так называемый волновой резонанс, приводящий к усилению амплитуды звуковых волн, однако это усиление ограничено влиянием нелинейных и диссипативных эффектов [7–9].

В нижней атмосфере регулярность генерации акустико-гравитационных волн СТ в периоды восходов и заходов солнца нарушается наличием большого числа других и нерегулярных источников этих волн, связанных с погодными изменениями, такими как формирование метеорологических фронтов [10], тропосферных струйных течений, сдвигов скорости ветра и гроз [11]. Волновые возмущения атмосферного давления от этих источников могут иметь достаточно большие амплитуды, десятки и сотни Па, и поэтому сильно



**Рис. 1.** Большая треугольная сеть инфразвуковых станций IS26 (Германия), IS37 (Норвегия), IS43 (Россия) (а) и малая сеть микробарографов, установленных в Москве (ИФА, МГУ, МОСРЕНТГЕН) и Звенигороде (ЗНС) (б). Указана также Геофизическая обсерватория “Михнево” Института Геодинамики Геосфер РАН (МНВ) (а), где непрерывно проводятся измерения давления, скорости ветра, температуры.

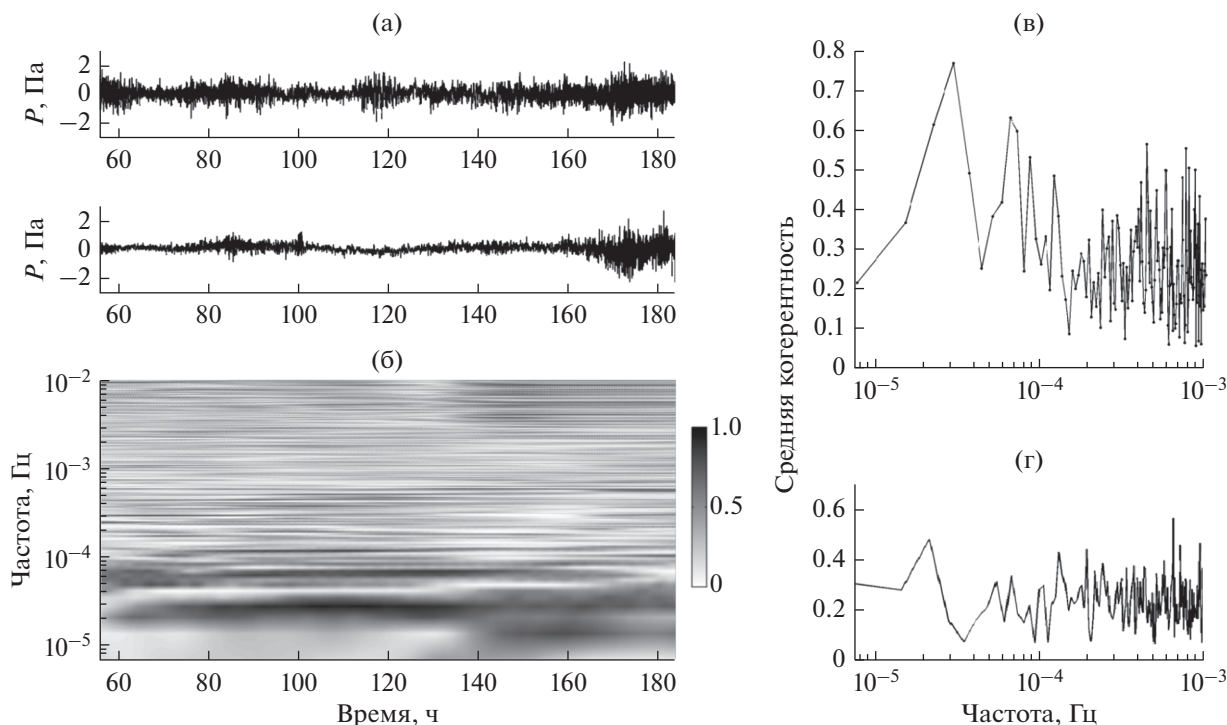
“маскировать” регулярные терминаторные волны. Тем не менее, многолетние измерения временных вариаций приземного атмосферного давления с помощью разветвленной сети барографов в восточной части США позволили в [12] обнаружить в периоды восходов и заходов солнца внутренние гравитационные волны (ВГВ) с периодами, кратными гармоникам солнечных суток, т.е. с частотами, кратными  $1/(24 \text{ ч})$  (от 4-й до 10-й гармоники). В наблюдениях приземного давления на всех барографах обнаруживались малоамплитудные ( $< 60 \text{ Па}$  от нуля до пика) колебания давления в диапазоне периодов от 2 до 6 ч, а в спектрах этих колебаний преобладали спектральные линии на частотах, которые являлись гармониками солнечных суток. Указанные выше сигналы давления не распределялись случайным образом во времени в течение каждого дня, а обнаруживались летом главным образом после захода солнца, а зимой — в полдень, после восхода солнца.

Цель настоящей работы состоит в исследовании основных характеристик (пространственной когерентности, фазовых скоростей, направлений распространения, характерных периодов и амплитуд) волновых возмущений, вызванных СТ, как в поле давления, так и скорости ветра в тропосфере. Насколько нам известно, такие исследования одновременно в полях скорости ветра и давления ранее не проводились. Нами будут проанализированы данные непрерывных измерений вариаций атмосферного давления в течение произвольно выбранных 10 дней (с 7 по 16 октября 2020 г.). Для анализа длиннопериодных волновых возмущений использовались данные микробаро-

графов сети инфразвуковых станций IS26 (Фрайунг, Германия), IS37 (Бардусфосс, Норвегия), IS43 (Дубна, Россия), расположенных в вершинах треугольника со сторонами IS26–IS37 2269 км, IS26–IS43 1799 км и IS37–IS43 1656 км. Эту группу микробарографов назовем большим треугольником (рис. 1а). Для анализа короткопериодных волновых возмущений использовалась сеть микробарографов, установленных в Москве (ИФА, МГУ, МОСРЕНТГЕН), Звенигороде (ЗНС) (рис. 1б) с расстояниями между ними от 7 до 60 км, а также микробарограф Геофизической обсерватории “Михнево” (указан на рис. 1а). Сеть приемников ИФА, МГУ, ЗНС будем называть малым треугольником. Одновременно с измерениями вариаций давления проводились непрерывные измерения скорости ветра на разных высотах атмосферного пограничного слоя (АПС) с помощью доплеровских содаров, расположенных в ИФА, МГУ и ЗНС, и анемометров в пунктах IS26, IS37, Михнево и ЗНС.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА БОЛЬШОМ ТРЕУГОЛЬНИКЕ

Приземная скорость СТ растет при уменьшении широты места и для выбранных пунктов измерений, составляющих большую треугольную антенну, равна  $V_l = 305.5 \text{ м/с}$  для IS26: (lat = 48.84 град);  $V_l = 254.6 \text{ м/с}$  для IS43 (lat = 56.72 град), и  $V_l = 165.6 \text{ м/с}$  для IS37 (lat = 69.07 град). Из модели генерации волн СТ [6] следует ожидать, что фазо-



**Рис. 2.** Сигналы (вертикальная ось в Па), зарегистрированные микробарографами на станциях IS26 и IS37 (а), и когерентность между ними в зависимости от времени для длины реализации в 111.11 ч со скользящим окном 46.67 ч (б). Справа: средняя когерентность за весь период времени измерений флуктуаций давления (в) и зональной проекции скорости ветра (г).

вые скорости волновых возмущений, движущихся синхронно вместе с СТ, должны находиться в диапазоне значений 165–305 м/с, а соответствующие им горизонтальные длины волн для периода, например, в 2 ч составят 1196–2196 км. Такие длины волн сравнимы с длинами сторон большого треугольника, поэтому корреляционный анализ сигналов на приемниках такого треугольника позволяет выделить длинноволновые и близкие к скорости звука стационарные возмущения от СТ на фоне ВГВ от метеорологических фронтов и других источников, имеющих при том же периоде в 2 ч значительно более короткие длины волн (сотни км) и низкие фазовые скорости (порядка 10–30 м/с) [10].

Следует заметить, что движущийся СТ может генерировать акустико-гравитационные моды разных порядков при одной и той же частоте этих мод [6]. Их фазовые скорости убывают с ростом порядка моды. Чтобы определить характеристики коротковолновых возмущений с длинами волн в десятки и сотни километров, необходима сеть приемников с расстояниями между ними во много раз меньшими, чем на большом треугольнике. Роль малых треугольников в нашем случае выполняли микробарографы и содары в пунктах ИФА–ЗНС–МГУ (рис. 1б). Таким образом, наш выбор треугольных сетей приемников разных раз-

меров был обусловлен необходимостью регистрации возможных волновых мод с разными длинами волн, генерируемых движущимися тепловыми источниками волн, связанными с СТ.

Сигналы, зарегистрированные микробарографами на станциях IS26 и IS37, показаны на рис. 2а, а когерентность между ними в зависимости от времени для длины реализации в 111 ч со скользящим окном 46.7 ч – на рис. 2б. Максимумы когерентности, как видно, достигаются в определенных частотных полосах и сохраняются с течением времени. Об этом свидетельствует и средняя за весь промежуток времени когерентность, показанная справа на рис. 2в. Основной максимум когерентности ( $\sim 0.7$ – $0.8$ ) наблюдается в полосе частот  $(2.31$ – $2.66) \times 10^{-5}$  Гц, причем одновременно между всеми парами микробарографов треугольной антенны. Эта полоса частот соответствует интервалу периодов 10.4–12 ч, включающему полусуточный период. Общие максимумы когерентности (показаны на рис. 2в) наблюдаются также в частотных полосах  $(6.94$ – $6.23) \times 10^{-5}$  Гц (периоды 4–4.4 ч),  $(9$ – $8) \times 10^{-5}$  Гц (периоды 3–3.5 ч),  $(1.13$ – $1.39) \times 10^{-4}$  Гц (периоды 2–2.45 ч), которые содержат периоды, кратные суточному периоду, т.е. его высшие гармоники. Амплитуды этих максимумов убывают с ростом соответствующих им частот примерно от 0.7 до 0.5. На рис. 2б видны

также множественные максимумы когерентности ( $\sim 0.5\text{--}0.7$ ) на частотах свыше  $10^{-4}$  Гц и вплоть до инфразвуковых частот порядка 0.01 Гц.

Средняя (за весь период измерений) когерентность между временными флуктуациями зональной проекции скорости ветра, полученной из данных измерений скорости и направления ветра в приземном слое атмосферы с помощью анемометров на станциях IS26 и IS37, показана на рис. 2г. Длина временной реализации в 111 ч для скорости ветра была выбрана для того же промежутка времени, что и для давления. Для приземной скорости ветра, как и для давления, тоже имеются локальные максимумы когерентности на определенных частотах, включая высшие гармоники суточного периода, хотя и более слабые по амплитуде (0.3–0.6), чем для давления. Тем не менее, эти максимумы лежат примерно в тех же интервалах частот, указанных выше, что и максимумы когерентности для флуктуаций давления.

Чтобы выяснить, имеют ли обнаруженные когерентные флуктуации волновую природу и определить их горизонтальные фазовые скорости и направления распространения, мы применили стандартный метод измерения времен задержек прихода сигналов между парами приемников с помощью вычисления взаимной корреляции сигналов. Для этой цели сигналы вначале отфильтровывались в интервалах частот, в которых функции когерентности между всеми парами приемников треугольной антенны достигали максимумов. После измерения задержек обрабатывались результаты лишь для тех моментов времени, для которых сумма задержек была близка к нулю (не превышала 10% от измеренной средней задержки между приемниками), что являлось свидетельством регистрации волнового процесса.

Мы использовали метод вычисления азимутов и горизонтальных фазовых скоростей в предположении, что фронт волны, приходящий на приемники треугольной сети, является плоским, а его скорость практически не меняет величины и направления на расстояниях порядка размеров треугольника. Для выбранного нами большого треугольника это условие заведомо не выполняется, так как скорость СТ и связанного с ним волнового возмущения существенно зависит от широты нахождения приемника. Тем не менее, используемый нами корреляционный метод позволяет оценить горизонтальную фазовую скорость и азимут прихода фронта для некоторой гипотетической плоской волны, которая имеет времена задержек прихода на приемники треугольной антенны, совпадающие с измеренными временными задержками сигнала для выбранной полосы частот.

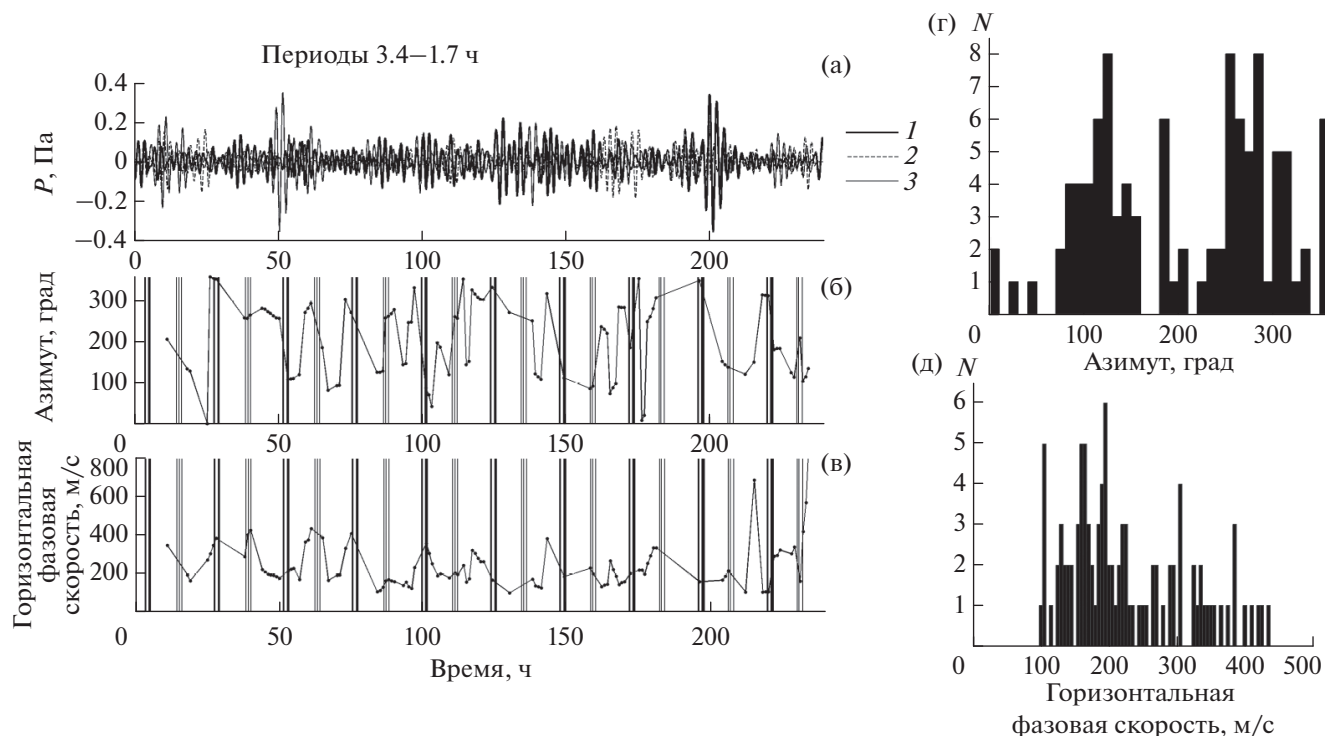
Прежде чем применить корреляционный метод к измеренному сигналу, нами проводилось тестирование этого метода по отношению к спе-

циально сгенерированному сигналу, представляющему из себя белый шум, отфильтрованный с помощью полосового фильтра в указанных выше частотных полосах и имеющий временные задержки прихода на приемники, соответствующие временным задержкам восхода солнца на станциях IS26–IS37–IS43. Результат тестирования для параметров СТ 7 октября 2020 г. дал почти неизменный во времени азимут прихода фронта сигнала в 118 град (с юго-восточного направления) для частотного интервала  $(2\text{--}7) \times 10^{-5}$  Гц и горизонтальную фазовую скорость 240–245 м/с, которая близка к средней (по трем широтам расположения станций) скорости СТ.

Для измеренных сигналов на большом треугольнике (рис. 3а), длительностью 240 ч, начиная с 7 октября, 00:00 UTC, и до 16 октября 2020 г., расчет зависимости от времени азимутов прихода колебаний атмосферного давления в диапазоне периодов 1.73–3.47 ч, с использованием скользящего корреляционного окна в 10.8 ч, показан на рис. 3б, а соответствующая этим азимутам горизонтальная фазовая скорость колебаний показана на рис. 3в. Значения азимутов и фазовых скоростей получены только для тех ограниченных промежутков времени, в которых когерентности флуктуаций давления для всех пар приемников 1–2, 2–3 и 3–1 достигли максимумов одновременно с условием, что сумма временных задержек прихода сигнала между указанными парами приемников была близка к нулю. В эти ограниченные промежутки времени отфильтрованные когерентные флуктуации давления на всех приемниках можно рассматривать как волновые пакеты, являющиеся суперпозицией гармонических волн с периодами от 1.73 до 3.47 ч.

На рис. 3б и 3в показаны значения (точки) локальных фазовых скоростей и направлений распространения максимумов (волновых гребней) почти гармонических осцилляций давления в волновых пакетах в разные интервалы времени. Здесь же показаны также времена восходов солнца в трех пунктах IS43, IS37 и IS26 с помощью вертикальных толстых линий, а вертикальными тонкими линиями – времена его заходов. Распределение числа  $N$  гребней волнового пакета, обнаруженных в разные промежутки времени, по их азимутам прихода (рис. 3г) имеет один из локальных максимумов, лежащий в интервале 110–120 град. Этот узкий интервал включает в себя азимут (118 град) распространения сигнала от СТ, полученный нами при описанном выше тестировании корреляционного метода анализа сигналов.

Что касается распределения числа  $N$  гребней волновых пакетов по их горизонтальным фазовым скоростям  $V_{\phi}$  (рис. 3д), то оно вместе с максимумом при  $V_{\phi} = 200$  м/с сосредоточено главным образом в диапазоне скоростей СТ (165–305 м/с), соответ-

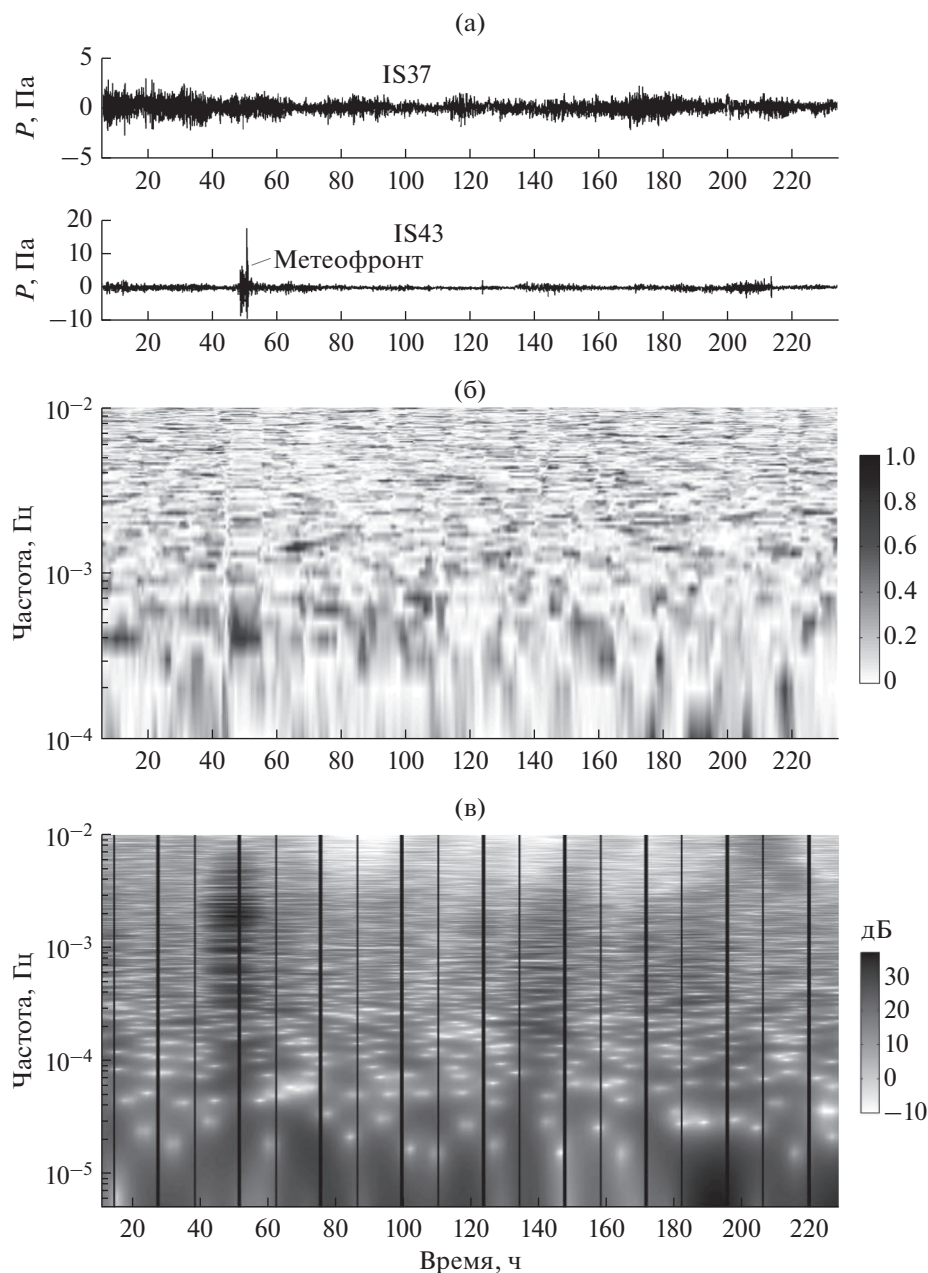


**Рис. 3.** Флуктуации атмосферного давления, отфильтрованные в диапазоне периодов 3.4–1.7 ч (а), и зависимости от времени азимутов прихода (б) и горизонтальной фазовой скорости отфильтрованных колебаний (в), с использованием скользящего корреляционного окна в 10.76 ч. Показаны также времена восходов солнца в трех пунктах IS43, IS37 и IS26 с помощью вертикальных толстых линий, а тонкими вертикальными линиями—времена его заходов. Распределение числа  $N$  гребней волнового пакета, обнаруженных в разные промежутки времени, по их азимутам прихода (г) и горизонтальным фазовым скоростям (д).

ствующей полосе широт 48.84–69.07 град, в которой лежат приемники большого треугольника. Таким образом, сохранение у сигналов высокой когерентности на расстояниях в несколько тысяч километров в диапазоне периодов 1.73–3.47 ч, типичном для ВГВ в атмосфере, и наличие определенных доминирующих азимутов и фазовых скоростей приходов сигналов, совпадающих с таковыми для движущегося СТ, говорит о связи этих сигналов с движущимся СТ.

Однако в азимутальном распределении приходов значительное их число сосредоточено также в азимутальном секторе 250–300 град (рис. 3г), который соответствует направлениям распространения сигналов с запада на восток, т.е. практически противоположным направлению движения СТ. Такие азимуты могут появляться из-за нарушения приближения плоской волны при расчете корреляционным методом временных задержек между приходами волновых гребней возмущения от одного и того же участка СТ на разные приемники, вызванного наличием существенной широтной зависимости горизонтальной скорости СТ. Действительно, если предположить, что  $\vec{k}$  — волновой вектор некоторой гармонической компонен-

ты сигнала, генерируемого СТ, а  $\omega$  — ее частота в системе отсчета, связанной с СТ (для стационарного источника  $\omega = 0$ ), движущимся со скоростью  $\vec{V}$ , зависящей от широты, то доплеровское смещение частоты гармонической компоненты  $\vec{k}\vec{V}$ , принимаемой разными приемниками, будет разным. Это приводит к тому, что отдельные гребни волнового пакета будут приходить на разные приемники с разным периодом, что с течением времени будет приводить к смене знака временной задержки между ближайшими по времени прихода гребнями сигнала, принимаемого на разных приемниках. Смена знаков временных задержек прихода сигнала приводит к изменению его азимута распространения на 180 град. Таким образом, расчет с помощью корреляционного метода азимутов возможных приходов сигналов от СТ, имеющего заведомо неплоский фронт и период, зависящий от широты места, приводит в отдельные промежутки времени к смене азимута распространения на противоположный (на 180 град). Поэтому, в дальнейшем, мы ограничимся только азимутальным сектором 20–200 град, включающим только сигналы от СТ, приходящие с восточного направления.



**Рис. 4.** Сигналы, записанные микробарографами на станциях IS43 и IS37, 7–16 октября 2020 г. (а), их текущая когерентность в диапазоне частот  $10^{-4}$ – $10^{-2}$  Гц в зависимости от времени, полученная для интервала анализа в 40000 с и со скользящим окном 10000 с при шаге сдвига в 400 с, (б) и частотный спектр сигнала на IS43 в зависимости от времени (в). Толстые вертикальные линии соответствуют восходам солнца, а тонкие – его заходам.

Важно отметить, что в интервале частот  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  Гц локальное возрастание когерентности между сигналами на IS43 и IS37 (рис. 4а, 4б), полученное с более коротким окном скольжения 40000 с, чем на рис. 2, и возрастание спектральной плотности сигнала на IS43 (рис. 4в) происходит в ограниченные промежутки времени между восходами и заходами солнца (отмечены на рис. 4в вертикальными линиями). Однако в некоторые про-

межутки времени, например, между 40 и 60 ч или между 130 и 150 ч, заметно значительное усиление спектральной плотности на дискретных частотах свыше  $10^{-3}$  Гц по сравнению с другими промежутками времени. Усиление спектральной плотности во временном интервале 40–60 ч совпадает по времени с локальным увеличением амплитуды сигнала на IS43 (рис. 4а) и обусловлено, по-видимому, прохождением метеорологического фронта 9 ок-



Эхо сигнал содара (МГУ) в зависимости от времени, 7–15 октября 2021

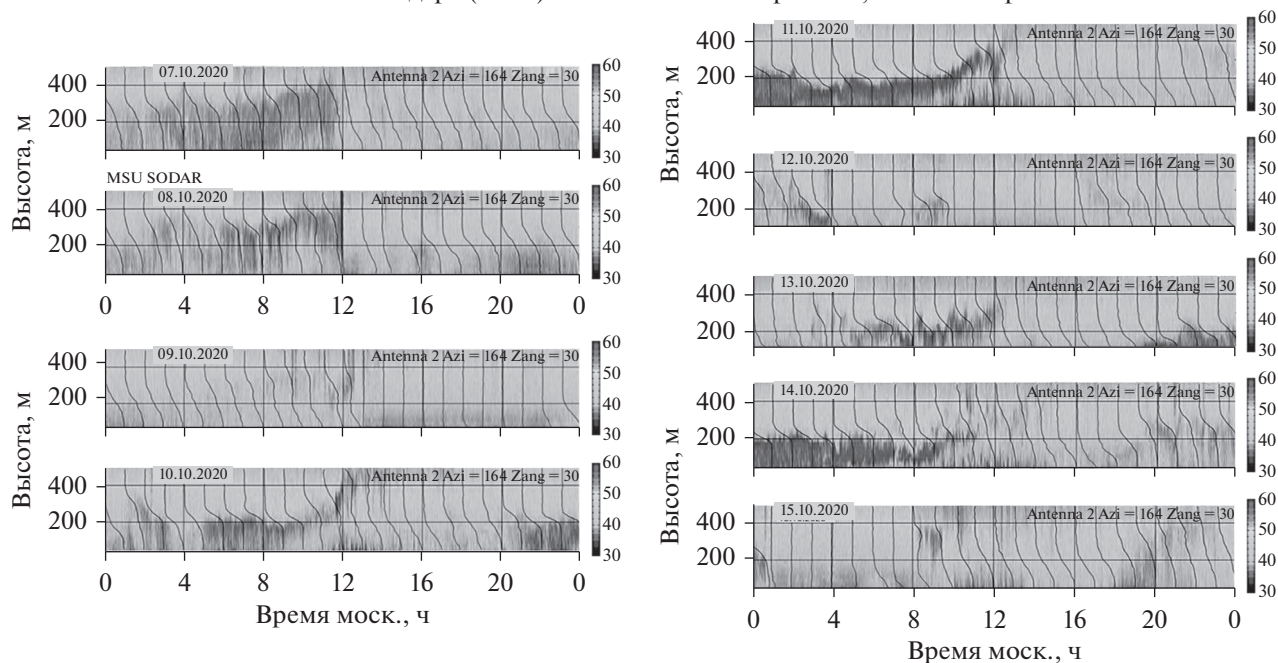


Рис. 6. Эхо-сигналы содара в МГУ в зависимости от времени (моск. время) за период с 7 по 15 октября 2020 г.

от 7 км (ИФА–МГУ) до 50 км (ЗНС–ИФА) эти максимумы когерентности значительно ослабевают, примерно от 0.7 до 0.4.

Определенная повторяемость наблюдается после восходов солнца во временной зависимости интенсивности эхо-сигнала содара, рассеянного на турбулентных пульсациях АПС, для разных дней в промежутке 7–15 октября 2020 г. (рис. 6). После восходов солнца (моменты обозначены вертикальными отрезками) и возрастании притока тепла в приземный слой атмосферы, вначале происходит “отрыв” от поверхности земли ночного слоя инверсии температуры (слой почернения) и, примерно к полдню, наблюдается увеличение его высоты до примерно 300 м. При этом высота поднимающегося слоя совершает во времени слабые по амплитуде колебания порядка нескольких десятков метров и с периодами ~1 ч и менее (см., например, случай 13.10.2020 г.), которые визуально обнаруживаются во все дни, кроме 9, 12 и 15 октября, когда отмечалось прохождение метеорологических фронтов через Московский регион. Подобное поведение во времени поднимающегося слоя инверсии температуры после восходов солнца наблюдалось также на записях эхо-сигналов содаров на ЗНС и ИФА.

Период порядка 1 ч (частота  $2 \times 10^{-4}$  Гц) обнаруживается также и в функциях когерентности флуктуаций горизонтальной компоненты скорости ветра между ИФА и МГУ (рис. 5б), ИФА и ЗНС (рис. 5в). Однако наряду с низкочастотными

ВГВ флуктуации скорости ветра всегда содержат короткие ВГВ с периодами 8–10 мин, которые захватываются волноводами в устойчиво-стратифицированных слоях тропосферы над конвективным АПС, но проникают вниз к поверхности земли и модулируют поле скорости ветра в АПС [14]. Кроме этого, анализ в [15] 148 случаев утренних поднимающихся инверсий обнаружил в 45% случаев структуры типа вихрей Кельвина–Гельмгольца с характерным периодом 120–150 с.

Нестационарное увеличение притока солнечной радиации к поверхности земли и приземному слою атмосферы после восхода солнца приводит к возникновению вертикальных конвективных движений воздуха в приземном слое и росту с течением времени среднеквадратичных значений флуктуаций вертикальной скорости  $\langle w^2 \rangle$ , полученных из измерений компонент скорости ветра на ЗНС с помощью акустического анемометра на высоте 6 м (рис. 7). Этот рост  $\langle w^2 \rangle$ , наблюдавшийся практически регулярно каждый день (за исключением 9 октября), достигал максимума примерно в полдень, а затем происходило спадание  $\langle w^2 \rangle$  до значений  $\sim 0.1 \text{ м}^2/\text{с}^2$  после заходов солнца (после 18:30 МСК). Мы предполагаем, что развивающаяся вблизи земной поверхности нестационарная во времени конвекция после восхода солнца проникает в устойчиво-стратифицированные слои АПС, находящиеся над приподнятым слоем турбулентности, генерируя ВГВ в этих



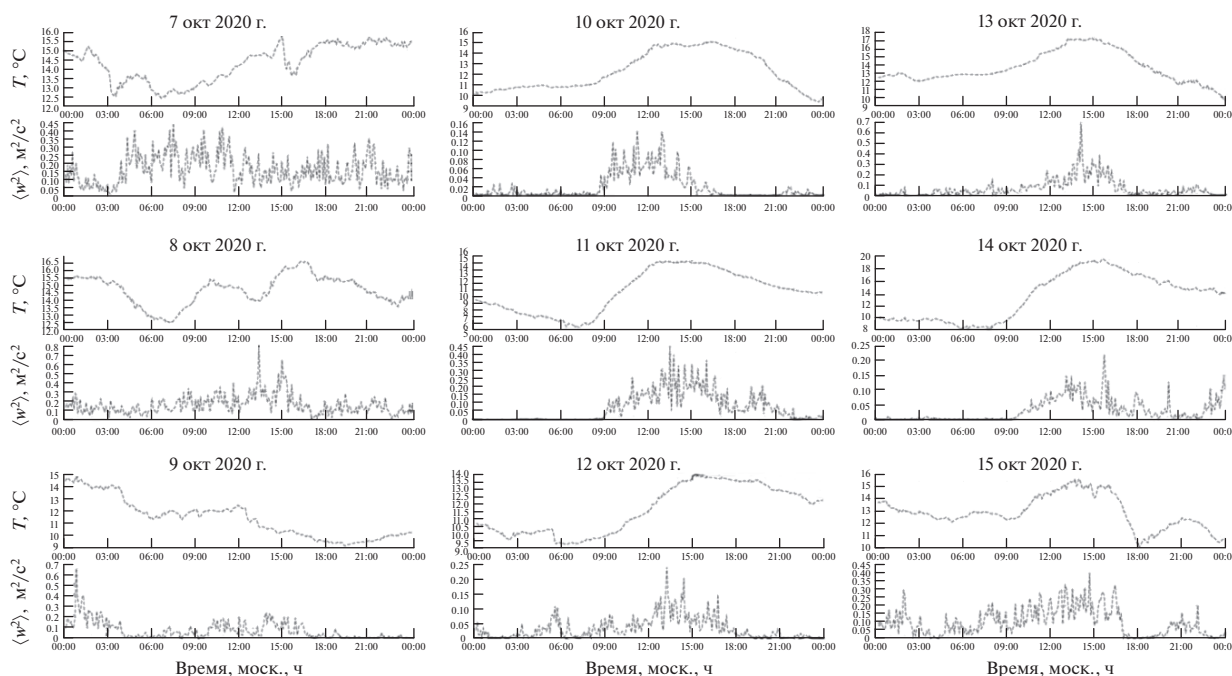


Рис. 7. Температура и среднеквадратичная вертикальная скорость в зависимости от времени, полученные вблизи г. Звенигород (ЗНС) из данных измерений термометром и акустическим анемометром на высоте 6 м за период времени 7–15 октября 2020 г.

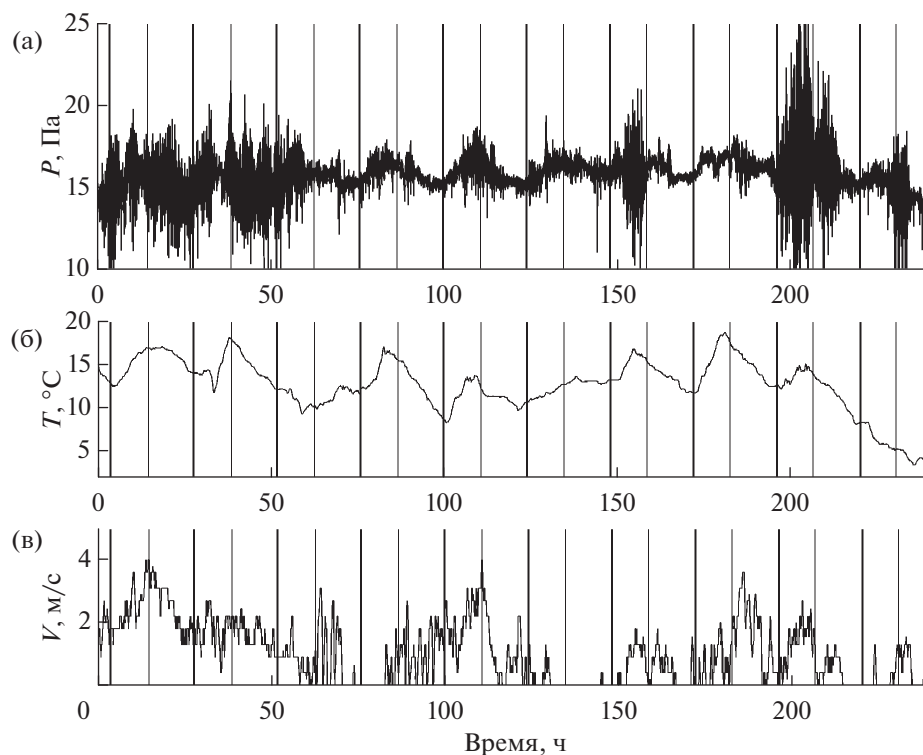
слоях и вызывая периодические вертикальные смещения приподнятого турбулентного слоя на записях интенсивности эхо-сигнала содара на рис. 6 и колебания вертикальной скорости на записях анемометров на рис. 7. Таким образом, мы предполагаем, что наблюдаемые временные осцилляции с разными периодами в вариациях  $\langle w^2 \rangle$  на рис. 7 и в высоте приподнятого турбулентного слоя на рис. 6 вызваны нестационарной конвекцией, развивающейся после восходов солнца.

Гипотеза о том, что волны в поднимающемся слое инверсии вызваны конвекцией под этим слоем, выдвигалась во многих работах (см. [15] и обзор литературы). Однако наряду с конвекцией вклад в волновое поле могут давать также захваченные волны, распространяющиеся горизонтально в устойчиво-стратифицированной тропосфере над конвективным АПС [16, 17, 14].

Интересно заметить, что в [18] наблюдалось регулярное и повторяющееся усиление интенсивности осцилляций напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы после восходов солнца. Спектральная плотность этих осцилляций была сосредоточена главным образом в диапазоне периодов 1.5–3 ч, типичном для ВГВ. Одним из возможных источников этих осцилляций, как указывает Смирнов [18], “... могут быть вихревые движения зарождающихся конвективных ячеек в пограничном слое атмосферы, переносящие объемные заряды вверх при увеличении

температуры воздуха на восходе Солнца...”. Вероятно, этот эффект связан с наблюдаемым нами эффектом усиления интенсивности осцилляций вертикальной скорости из-за развивающейся конвекции после восходов солнца, т.к. переменная во времени адвекция объемных зарядов в поле вертикальной скорости ветра должна приводить также и к соответствующим осцилляциям напряженности электрического поля.

Анализ суточного хода температуры на ЗНС (рис. 7) и в Михнево (рис. 8, вторая панель) показывает, что его минимумы достигаются в моменты времени, близкие к восходам солнца, а максимумы—в середине дня, примерно в 14–15 ч по местному времени. Важно заметить также, что эти суточные колебания температуры далеки от гармонических и скорее напоминают пилообразную форму волны с крутыми участками роста температуры после восходов солнца (рис. 8, вторая панель). Подобные суточные колебания обнаруживаются также во временных флуктуациях давления (рис. 8, верхняя панель), измеренных микробарографом, и в скорости ветра (рис. 8, нижняя панель), измеренной с помощью анемометра с временным усреднением в 0.5 ч. Пилообразная форма суточных колебаний говорит о наличии высокочастотных гармоник суточного периода в спектре этих колебаний, которые, действительно, обнаруживались нами в функциях когерентности флуктуаций давления (рис. 2в) и скорости ветра (рис. 2г) на большом треуголь-



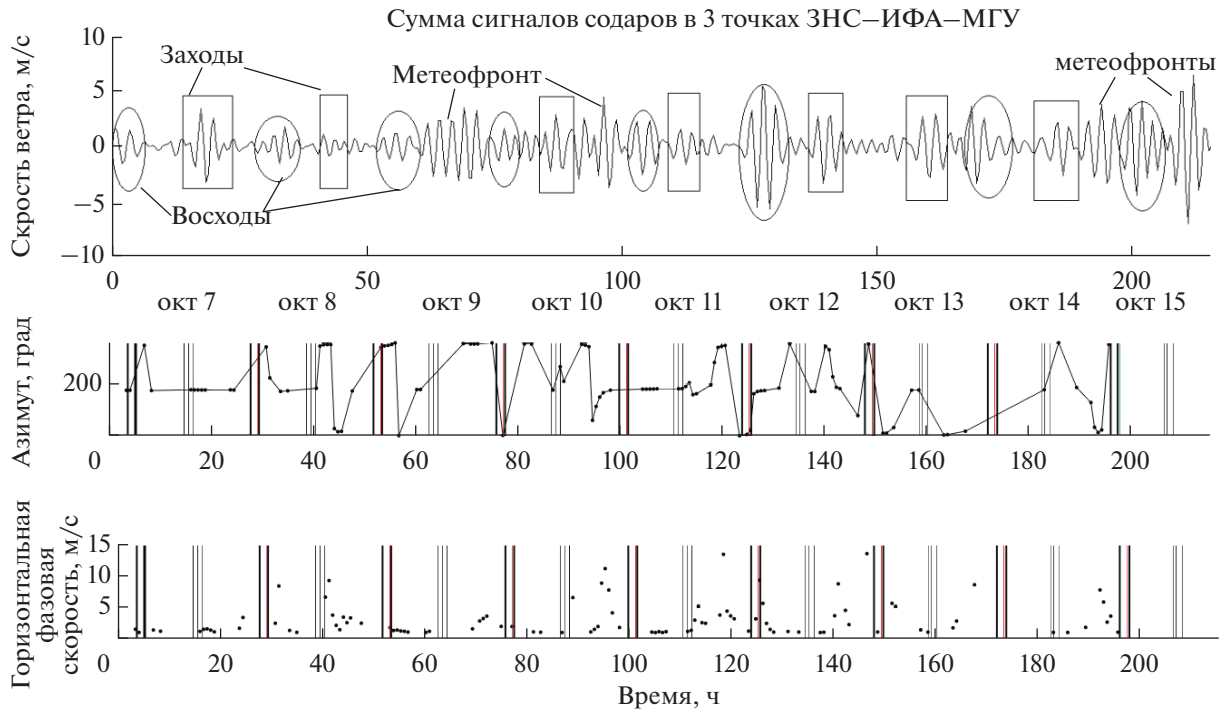
**Рис. 8.** Атмосферное давление, измеренное микробарографом (а), температура (б) и скорость ветра (в) (анемометер, усреднение 0.5 ч), полученные из архива данных Геофизической обсерватории “Михнево” Института Геодинамики Геосфер РАН ([idg-comp.chph.ras.ru/~idg/Data/](http://idg-comp.chph.ras.ru/~idg/Data/)) за период с 7 по 16 октября 2020 г.

нике. Нами было установлено также, что высокочастотные гармоники с периодами около 3 ч (8-я гармоника) и 2 ч (9-я гармоника), лежащие внутри отфильтрованной полосы периодов 1.7–3.4 ч, имеют азимуты прихода и горизонтальные скорости распространения, типичные для движущегося СТ в рассматриваемых нами широтах (рис. 3в, 3г).

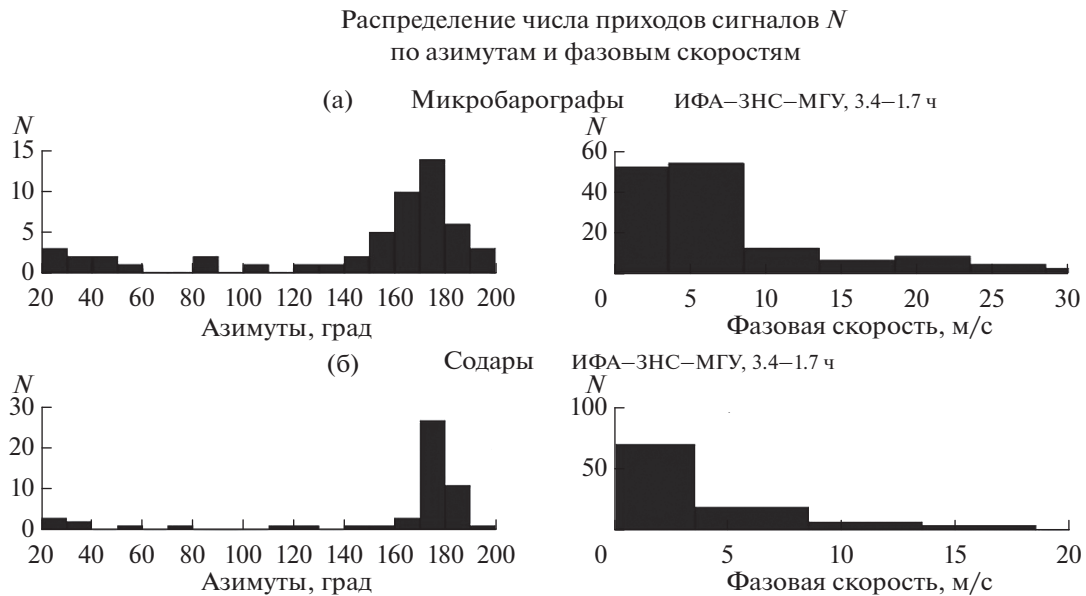
Чтобы обнаружить сигналы, связанные с восходами и заходами солнца, мы сложили сигналы в трех пунктах малого треугольника содаров МГУ–ЗНС–ИФА, для которых моменты восходов или заходов отличаются не более, чем на 3 мин. На рис. 9 показаны суммарные сигналы содаров (верхняя панель), азимуты приходов сигналов (вторая панель) и их горизонтальная фазовая скорость (нижняя панель) в зависимости от времени с 7 по 15 октября 2020 г. Сигналы ограниченной длительности (~6 ч), которые усиливаются при сложении и наиболее близко отстоят по времени от моментов восходов солнца, обведены овалами, а те, что ближе к заходам – прямоугольниками. Регулярное появление таких сигналов в периоды восходов и заходов солнца наблюдалось практически каждый день. Однако в определенных промежутки времени (70–100 и 180–200 ч), когда отмечалось прохождение метеорологических фронтов через московский регион (указаны на рис. 9, верхняя панель), эти сигналы трудно было различить на

фоне почти непрерывных сигналов от метеорологических фронтов.

Результаты применения корреляционного анализа к флуктуациям скорости ветра и давления, полученных из данных содаров и микробарографов малого треугольника МГУ–ЗНС–ИФА и отфильтрованных в полосе периодов 3.4–1.7 ч, показаны на рис. 10. Распределения числа  $N$  приходов сигналов по азимутам и по горизонтальным фазовым скоростям, полученные по измерениям флуктуаций давления (а) и измерениям скорости ветра (в), показывают, что максимум приходов приходится на азимутальные направления 170–190 град, а фазовые скорости приходов лежат, в основном, в интервале 3–10 м/с, т.е. значительно ниже скорости движения СТ на широтах Москвы и Звенигорода. Столь малые фазовые скорости характерны для захваченных ВГВ в устойчиво-стратифицированной нижней тропосфере [19]. Их генерация тепловыми источниками конечных размеров, движущимися со скоростью, превышающей групповую скорость излучаемых ВГВ, подобна излучению корабельных волн Кельвина [20], т.е. фронты волн, исходящих от движущегося источника, распространяются под углами  $\phi$  к направлению движения источников, удовлетворяющими условию  $\cos(\phi) = V/V_t$ , где  $V$  – фазовая скорость волн, а  $V_t$  –



**Рис. 9.** Суммарные сигналы содаров на треугольной сети МГУ–ЗНС–ИФА (верхняя панель), азимуты приходов сигналов (вторая панель) и их горизонтальная фазовая скорость (нижняя панель) в зависимости от времени с 7 по 15 октября 2020 г.



**Рис. 10.** Распределения числа приходов сигналов  $N$  с периодами 3.4–1.7 ч по азимутам (с интервалом 10 град) и горизонтальным фазовым скоростям (интервал 5 м/с) для малого треугольника ИФА–ЗНС–МГУ: (а) – для давления, измеряемого микробарографами; (б) – для меридиональной проекции скорости ветра на высоте 240 м, измеряемой содарами.

скорость источника. Взяв  $V = 10$  м/с,  $V_s = 255$  м/с, получим, что  $\varphi \approx 88$  град, поэтому при азимуте распространения СТ в первой половине октября, примерно равном 105 град, фронты волн, исходя-

щие от движущихся тепловых источников, будут иметь азимуты  $105 + \varphi = 193$  град и  $105 - \varphi = 17$  град. К этим направлениям очень близки два азимута, в которых нами было зарегистрировано макси-

мальное число приходов сигналов с периодами 3.4–1.7 ч на малом треугольнике содаров и микробарографов (рис. 10а, 10б).

#### 4. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АМПЛИТУД ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ДВИЖУЩИХСЯ ВМЕСТЕ С ТЕРМИНАТОРОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Будем исходить из системы уравнений, описывающих акустико-гравитационные волны при наличии их тепловых источников [21]. Система сводится к одному уравнению 4-го порядка по времени для вертикальной скорости  $w(x, y, z, t)$  (уравнение (8), [21]). Это уравнение можно обобщить и на случай наличия скорости ветра в атмосфере, используя систему уравнений для акустико-гравитационных волн в движущейся атмосфере [19, 22 Гл. 1] и учитывая наличие радиационных источников тепла в уравнении для скорости изменения во времени энтропии среды. В частном случае, когда фазовые скорости волн малы по сравнению со скоростью звука, уравнение для вертикальной скорости приобретает следующий приближенный вид:

$$\Delta \frac{D^2 W}{Dt^2} + N^2 \Delta_{\perp} W = \frac{\gamma - 1}{\rho_0 c^2} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \frac{D^2 q'}{Dt^2} + g \Delta_{\perp} q' \right], \quad (1)$$

где  $W = \left( \frac{\bar{\rho}}{\rho_0} \right)^{1/2} w$ ,  $\bar{\rho}(z)$  – невозмущенная плотность атмосферы в зависимости от вертикальной координаты  $z$ ,  $\rho_0 = \bar{\rho}(z = 0)$ ,  $q'(x, y, z, t) = \bar{\rho} Q(x, y, z, t)$  – скорость притока тепла в единицу объема среды,  $Q(x, y, z, t)$  – скорость притока тепла в единицу массы,  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $N^2(z)$  – квадрат частоты Брента–Вяйсяля, а оператор  $D/Dt = \partial/\partial t + \vec{V}(z) \nabla_{\perp}$  учитывает адвекцию ветром  $\vec{V}(z)$  как самих источников тепла, так и ВГВ, генерируемых этими источниками. Скорость ветра  $\vec{V}(z)$  и  $N^2(z)$  считались медленно меняющимися на пространственных масштабах волн.

Будем учитывать, что наряду с медленным увеличением температуры  $T(x, y, z, t)$  вдоль координаты  $x$  при переходе от ночи к дню на расстоянии  $L$  в несколько тысяч км переходная область терминатора содержит также неоднородности температуры  $\Delta T(x, y, z, t)$  значительно более малых масштабов [6], поэтому представим изменение температуры в области терминатора в виде:

$$T(x, y, z, t) = \bar{T}(x + V_t t, y, z) + \Delta \bar{T}(y, z) \sin k_0(x + V_t t), \quad (2)$$

где масштаб горизонтальных неоднородностей  $l_0 = 2\pi/k_0$  составляет десятки и сотни километ-

ров, а  $V_t(y)$  – горизонтальная скорость терминатора, зависящая от широты.

Нас интересует вклад в генерацию волн именно мелкомасштабных неоднородностей, описываемых вторым членом в (2). Рассмотрим случай малых скоростей ветра  $V$  по сравнению со скоростью СТ:  $V \ll V_t$ , что часто (но далеко не всегда) справедливо для тропосферы. Тогда приток тепла в единицу времени

$$Q = c_p \partial T / \partial t \approx V_t c_p k_0 \Delta \bar{T}(y, z) \cos k_0(x + V_t t), \quad (3)$$

где  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении единицы массы воздуха, поглощающего тепло. Для средних широт вблизи Москвы можно взять  $V_t = 254$  м/с, а для тропосферы  $c_p \sim 10^3$  дж/(кг град). На масштабах неоднородностей  $l_0 = 2\pi/k_0 = 10$ –100 км изменения температуры  $\Delta \bar{T}(y, z)$  могут достигать значений 0.01 град, тогда, согласно (3), притоки тепла в единицу массы воздуха  $|Q| = 0.16$ –1.60 дж/(кг с), а в единицу объема:  $|q'| = 0.16$ –1.60 дж/(м<sup>3</sup> с).

Оценим теперь величину тепловых источников внутренних волн в правой части уравнения (1),

учитывая, что  $\frac{D^2 q'}{Dt^2} \sim k_0^2 (V_t + V_x)^2 q'$ , где  $V_x$  – компонента скорости ветра в направлении скорости движения СТ, а  $\partial q' / \partial z \sim k_z q' = (2\pi/l_z) q'$ , где  $l_z$  – характерный вертикальный масштаб температурных неоднородностей. Считая вертикальный и горизонтальный масштабы неоднородностей близкими по величине,  $l_z \sim l_0$ , и оценивая величины членов в левой части уравнения (1):  $\left| \Delta \frac{D^2 W}{Dt^2} + N^2 \Delta_{\perp} W \right| \sim k_0^2 [k_0^2 (V_t + V_x)^2 W]$ , получим из уравнения (1) оценку амплитуды вертикальной скорости в волне, генерируемой СТ:  $|W| \approx \frac{\gamma - 1}{\rho_0 c^2} k_0^{-1} |q'| \sim 0.01$  м/с.

Поле давления  $p'$  для внутренних волн связано с полем вертикальной скорости уравнением [19]:

$$\Delta_{\perp} P = \rho_0 \frac{\partial}{\partial z} \frac{DW}{Dt}, \quad (4)$$

где  $P = \left( \frac{\rho_0}{\bar{\rho}} \right)^{1/2} p'$ , откуда амплитуда возмущения давления в волне при скорости ветра  $V_x = 5$  м/с

$$P \approx \rho_0 (V_t + V_x) W = 2.6 \text{ Па.}$$

Такие амплитуды флуктуаций давления наблюдались нами в периоды восходов и заходов солнца (рис. 2а), и, как мы показали выше, они могли генерироваться движущимися вместе с СТ неоднородностями температуры.

В общем случае, нахождение структуры волнового поля, генерируемого движущимися тепловыми источниками ограниченных пространственных масштабов, требует решения уравнения (1) при заданных вертикальных профилях частоты  $N(z)$  и скорости ветра  $V(z)$ . Для двуслойной модели атмосферы с постоянным ветром ( $V(z) = \text{const}$ ), когда  $N(z) = N_1$  при  $0 \leq z \leq h$ , и  $N(z) = N_2 \ll N_1$  при  $h \leq z < \infty$ , где  $h$  — высота нижнего устойчиво стратифицированного слоя тропосферы, задача нахождения поля захваченных гравитационных мод в нижнем слое тропосферы во многом аналогична задаче обтекания горы воздушным потоком со скоростью, превышающей фазовые скорости захваченных мод [23]. В этом случае, захваченные моды заключены в пределах клина с половинным углом, определяемым отношением фазовых скоростей мод к скорости воздушного потока (в нашем случае к скорости терминатора), и имеют вид корабельных волн Кельвина. По-видимому, именно такие медленные по сравнению со скоростью терминатора внутренние волны наблюдались нами на малом треугольнике в разд. 3 (см. рис. 10).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря использованию приемников большого треугольника IS26—IS43—IS37, впервые удалось обнаружить сигналы акустики-гравитационных волн высокой когерентности на расстояниях в несколько тысяч км с доминирующими азимутами распространения (110—120 град) и фазовыми скоростями 165—305 м/с, совпадающими с таковыми для движущегося СТ в полосе широт 48.84—69.07 град, что говорит о связи этих сигналов с движущимся СТ. Максимумы когерентности сигналов наблюдались в определенных сравнительно узких полосах частот, содержащих частоты, кратные частоте вращения земли, причем как в поле флуктуаций давления, измерявшихся микробарометрами инфразвуковых станций, так и в поле флуктуаций скорости ветра, измерявшихся анемометрами.

Было установлено, что сигналы в виде ВГВ и инфразвука, генерируемые метеорологическими фронтами, усложняют обнаружение волновых сигналов от СТ. Тем не менее ВГВ, генерируемые метеорологическими фронтами, имеют малые фазовые скорости по сравнению со скоростями волновых возмущений, движущимися со скоростью СТ, которые были обнаружены нами на большом треугольнике.

Нами наблюдалась после восходов солнца определенная повторяемость в поведении временной зависимости интенсивности эхо-сигнала содара, рассеянного на турбулентных пульсациях АПС. Высота приподнятого инверсионного слоя после восхода солнца совершала определенные осцилляции с амплитудами в десятки метров и перио-

дами порядка 1 ч и менее. Мы предположили, что развивающаяся вблизи земной поверхности нестационарная во времени конвекция после восхода солнца проникает в устойчиво-стратифицированные слои АПС, находящиеся над приподнятым слоем турбулентности, генерируя ВГВ в этих слоях и вызывая периодические вертикальные смещения приподнятого турбулентного слоя на записях интенсивности эхо-сигнала содара и колебаний вертикальной скорости на записях анемометра.

Из измерений флуктуаций скорости ветра и атмосферного давления с помощью, соответственно, содаров и микробарографов на малом треугольнике ИФА—ЗНС—МГУ были получены распределения числа приходов сигналов по азимутам и по горизонтальным фазовым скоростям. Они показали, что максимум приходов лежит в интервале азимутальных углов 170—190 град, а фазовые скорости приходов лежат, в основном, в интервале 3—10 м/с, т.е. значительно ниже скорости движения СТ на широтах Москвы и Звенигорода. Такие доминирующие азимуты распространения и малые фазовые скорости характерны для захваченных гравитационных мод в устойчиво-стратифицированной нижней тропосфере. Было показано, что столь медленные моды могут распространяться от движущегося СТ, подобно волнам Кельвина от движущегося корабля, поэтому азимуты распространения фронтов этих мод могут почти на 90 град отличаться от азимута распространения СТ, что и объясняет наблюдаемые азимуты 170—190 град медленных волн на малом треугольнике как в поле скорости ветра, так и давления.

Теоретические оценки амплитуд вертикальных скоростей и давления во внутренних волнах, генерируемых мелкомасштабными неоднородностями температуры (масштабы 10—100 км), существующими в переходной области движущегося СТ, дают величины, сравнимые по порядку величины с наблюдаемыми амплитудами ВГВ в периоды восходов солнца, и подтверждают эффективность механизма генерации ВГВ, движущимися вместе с СТ неоднородностями температуры. Наши результаты показывают, что, наряду с существующими в тропосфере разнообразными источниками ВГВ и инфразвука (метеофронты, грозы, струйные течения, орография и т.д.), имеется глобальный и регулярный источник волновых возмущений в поле скорости ветра и давления в широком диапазоне дискретных периодов, кратных суточному периоду и вплоть до инфразвуковых периодов порядка 1 мин.

Авторы выражают благодарность В.П. Юшкову, М.А. Локощенко и В.С. Люлюкину за предоставленные содарные данные. Работа выполнена при финансовой поддержке грантами РФФИ № 21-17-00021 и РФФИ № 19-05-01008.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forbes J.M., Bruinsma S.L., Miyoshi Y., Fujiwara H.* A solar terminator wave in thermosphere neutral densities measured by the CHAMP satellite // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. L14802.
2. *Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V.* Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator // *Advances in Space Research.* 2009. V. 44. № 7. P. 824–835.
3. *Bespalova A.V., Fedorenko A.K., Cheremnykh O.K., Zhuk I.T.* Satellite observations of wave disturbances caused by moving solar terminator // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2016. V. 140. P. 79–85.
4. *Beer T.* Supersonic Generation of Atmospheric Waves // *Nature.* 1973. V. 242. № 34. <https://doi.org/10.1038/242034a0>
5. *Сомских В.М., Троицкий Б.В.* Генерация возмущений в атмосфере при прохождении через нее солнечного терминатора // *Геомagnetизм и аэрoномия.* 1975. Т. 15. № 5. С. 856–860.
6. *Somsikov V.M.* Solar Terminator and Dynamic Phenomena in the Atmosphere: A Review // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011. V. 51. № 6. P. 707–719.
7. *Karabutov A.A., Lapshin E.A., Rudenko O.V.* Interaction between light waves and sound under acoustic nonlinearity conditions // *SOV. Phys. JETP.* 1976. V. 44. № 1. P. 58–63.
8. *Васильев В.Н.* Возбуждение инфразвука при радиационно-механическом синхронизме // *Кинематика и физика небесных тел.* 1987. Т. 3. № 6. С. 3–9.
9. *Руденко О.В., Хедберг К.М.* Волновой резонанс в диссипативной среде с модульной, квадратичной или квадратично-кубичной нелинейностью // *Акуст. Журн.* 2018. Т. 64. № 4. С. S3–S13.
10. *Chunchuzov I., Kulichkov S., Perepelkin V., Gorchakov G., Kallistratova M., Dzhola A., Lv Jun, Yang Yichun, Teng Pengxiao, Wu Lin, Li Qilong, Yele Sun.* Influence of internal gravity waves on meteorological fields and gas constituents near Moscow and Beijing // *Izv. Atmos. and Ocean. Physics.* 2017. V. 53. № 5. P. 524–538.
11. *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. P. 6409–6418.
12. *Hedlin M.A.H., de Groot-Hedlin C.D., Forbes J.M., Drob D.P.* Solar terminator waves in surface pressure observations // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 5213–5219.
13. *Каллистратова М.А., Петенко И.В.* Содарное зондирование атмосферного пограничного слоя: Обзор работ ИФА РАН им. А.М. Обухова // *Изв. РАН. ФАО.* 2018. Т. 54. № 3. С. 283–300.
14. *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.
15. *Kallistratova M.A., Petenko I.V., Kouznetsov R.D., Kuznetsov D.D., Lyulyukin V.S., Perepelkin V.G.* Kelvin-Helmholtz billows in rising morning inversions // *Turbulence Atmosphere and Climate Dynamics, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2019. V. 231. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/231/1/012025>
16. *Petenko I.V., Bezverkhniy V.A.* Temporal Scales of Convective Coherent Structures Derived from Sodar Data // *Meteorology and Atmospheric Physics.* 1999. V. 71. P. 105–116.
17. *Chimonas G.* Steps, waves and turbulence in the stably stratified planetary boundary layer // *Bound.-Layer Meteorol.* 1999. V. 90. P. 397–421.
18. *Смирнов С.Э.* Частотный и временной анализ эффекта восхода солнца в электрическом поле приземного слоя атмосферы // *Вестник КРАУНЦ.* 2016. Физ.-мат. науки. Т. 4. № 15. С. 86–91.
19. *Gossard E.E., Hooke W.H.* *Waves in the Atmosphere,* New York: Elsevier, 1975. 456 pp.
20. *Lighthill J.* *Waves in Fluids.* Cambridge: Cambridge University Press. 1978. 504 p.
21. *Григорьев Г.И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере земли (обзор) // *Изв. вузов. РАДИОФИЗИКА.* 1999. Т. 42. № 1. С. 3–24.
22. *Чунчuzов И.П., Куличков С.Н.* Распространение инфразвуковых волн в анизотропной флуктуирующей атмосфере. М.: ГЕОС, 2020. 260 с.
23. *Chunchuzov I.P.* On a Possible Generation Mechanism for Nonstationary Mountain Waves in the Atmosphere // *J. Atm. Sci.* 1994. V. 51. № 15. P. 2196–2206.

## Wave Disturbances of Atmospheric Pressure and Wind Speed in the Troposphere Associated with the Solar Terminator

I. P. Chunchuzov<sup>1, \*</sup>, S. N. Kulichkov<sup>1</sup>, O. E. Popov<sup>1</sup>, V. G. Perepelkin<sup>1</sup>, D. V. Zaitseva<sup>1</sup>, and V. M. Somsikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017 Russia

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi ave., 71, Alma-Ata, 050040 Kazakhstan

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

The main characteristics (coherences, phase velocities, propagation directions, characteristic periods and amplitudes) of wave disturbances in the field of pressure and wind speed in the troposphere caused by the solar terminator (ST) moving relative to the Earth are studied. The coherent analysis of pressure variations mea-

sured by infrasound microbarographs of stations IS26 (Germany), IS37 (Norway), IS43 (Russia) making a triangle with the sides about 2000 km in size was used to detect wave disturbances from the ST. With such a large-sized triangle it is possible to isolate acoustic-gravity waves of high coherence with CT azimuths and propagation velocities at the background of much slower internal gravity waves from meteorological fronts. Wind speed and atmospheric pressure fluctuations were measured with sodars and microbarographs located in the Moscow region and composing a small triangle with side lengths from 7 to 60 km. The distributions of the number of signal arrivals over azimuths and horizontal phase speeds are obtained. An explanation is given for the presence of dominant azimuths and phase speeds of internal gravity waves at the small triangle.

**Keywords:** solar terminator, internal gravity waves, sodars, pressure and wind velocity fluctuations, sunrises and sunsets