

УДК: 551.596.1

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ "ГОЛОСА МОРЯ" ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ИНФРАЗВУКА

© 2019 г. В.Г. Перепелкин*, И.П. Чунгузов, С.Н. Куличков,
О.Е. Попов, И.А. Репина

*Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН
Россия, 119017 Москва, Пыжевский пер., 3*

* E-mail: vitaliper54@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2018 г.

После доработки 24.09.2018 г.

Работа посвящена изучению условий возникновения "голоса моря" в инфразвуковом диапазоне и определению его параметров по данным измерений в акватории Черного моря, проведенным в 2011 г. и 2016 г., и в акватории Охотского моря – в 2017 г. Было проведено сравнение различных параметров (средние корреляции, спектры акустических приходов, направления и фазовые скорости) высокочастотного инфразвука (1–10 Гц), зарегистрированного в ходе экспериментов в Качивели (Крым) в 2011 и 2016 годах. Подробно исследована ветровая обстановка в акватории Черного моря в период проведения измерений, а также условия распространения акустических волн вдоль направления их приходов. В обоих случаях было обнаружено наличие атмосферных вихрей в направлении прихода инфразвука, вызвавших поворот скорости ветра над поверхностью моря. В наблюдениях 2011 года к генерации инфразвука привело взаимодействие двух разнонаправленных атмосферных вихрей над морем, а в 2016 году – вихрь к западу от пункта регистрации. Обсуждается возможность генерации микробаром и "голоса моря" из-за поворота скорости ветра, вызывающего нелинейное взаимодействие поверхностных волн, распространяющихся в противоположных друг к другу направлениях, и образование их 2-й гармоники в виде стоячей поверхностной волны. Из анализа профилей скорости и направления ветра вдоль трассы прихода инфразвука, а также полей акустического давления, рассчитанных методом параболического уравнения по профилям C_{eff} в направлении распространения инфразвука, были определены наиболее вероятные области его генерации. В обоих случаях эти области совпали с зонами, в которых скорость ветра падает до нуля, а направление ветра изменяется на противоположное.

Приведен пример одновременной регистрации с одного направления инфразвука в частотном диапазоне микробаром (0.2–0.3 Гц) и более высокочастотного "голоса моря" со средней частотой 5.5 Гц.

Ключевые слова: голос моря, микробаромы, инфразвуковые волны, морское волнение

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351553183-97>

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию условий возникновения "голоса моря" и является продолжением работы авторов [1]. Основная проблематика изучения инфразвука, генерируемого морской поверхностью, была подробно освещена во введении к работе [1], поэтому здесь мы ограничимся кратким ее изложением.

В литературе выделяют два вида инфразвука, источник которого связан с морским волнением: микробаромы и "голос моря". Микробаромами называется низкочастотный инфразвук

с характерными периодами в 3–10 секунд и спектральным максимумом на периоде 5 с (частота 0.2 Гц). Предполагается, что источником микробаром является непосредственно морская поверхность [2–5]. Один из механизмов генерации микробаром связан с нелинейным встречным взаимодействием поверхностных гравитационных волн на морской поверхности. Образующаяся в результате этого взаимодействия стоячая поверхностная волна подобно поршню излучает инфразвуковые волны, как в атмосфере, так и в глубины океана, которые, достигая дна океана, генерируют сейсмические волны (микросейсмы). Данный механизм впервые

был предложен в статье [2], где было показано, что генерация микросейсм происходит за счет нелинейного эффекта второго порядка при взаимодействии поверхностных гравитационных волн примерно одинаковой частоты и противоположно направленных друг к другу. Различные модификации механизма генерации микробаром стоячими волнами на морской поверхности представлены в работах [3–5].

Спектр излучаемого инфразвука достаточно узкий и локализован около удвоенной частоты спектра морских волн. Доминантная частота морских волн, как правило, имеет значения около 0.1 Гц. Таким образом, частота генерируемых этими волнами микробаром близка к 0.2 Гц, что было подтверждено экспериментами [6].

С морским волнением связан и так называемый "голос моря" – высокочастотный инфразвук в диапазоне от единицы до десяти и более герц. Первые экспериментальные исследования "голоса моря" были выполнены академиком В. В. Шулейкиным [7–8] в 30-х гг. XX века. Традиционно в качестве механизма возникновения "голоса моря" рассматривается обтекание волн ветровым потоком, приводящее к генерации вихрей [9, 10].

Наконец, немаловажную роль для интерпретации данных измерений играет изучение метеорологических условий распространения инфразвука от источника до приемных устройств. Так, микробаромы могут распространяться на сотни и тысячи километров благодаря тому, что они захватываются стратосферным и термосферным акустическими волноводами. В [11] приведен пример одновременной регистрации микробаром с двух противоположных направлений – из Атлантики и восточного Средиземноморья. Эта регистрация стала возможной из-за наличия двух волноводов на высотах верхней стратосферы (30–50 км) и нижней термосферы (около 90 км) [11].

В октябре 2016 г. нами были проведены новые исследования "голоса моря" на побережье Черного моря. Одновременно с этим анализировались данные ветровой обстановки над Черным морем во время проведения измерений. Целью настоящей работы является сравнение и анализ общих метеорологических условий для возникновения и распространения "голоса моря", обнаруженного в разные периоды времени, а также выявление участков поверхности моря, являющихся наиболее вероятным источником генерации инфразвука. Для решения этих задач

мы использовали как данные о ветровой обстановке над Черным морем, так и дополнительные данные о профилях ветра и температуры для расчета полей акустического давления во время проведения экспериментов. Кроме того, мы дополнили настоящий анализ некоторыми результатами регистрации инфразвуковых сигналов в сентябре 2017 г. на побережье Охотского моря. Эти данные приведены в приложении к настоящей работе.

1. ОРГАНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Эксперименты 2011 и 2016 гг. проводились на базе Экспериментального отделения Морского гидрофизического института (МГИ) в районе поселка Качивели (Крым) с 11 по 17 октября 2011 г и с 8 по 14 октября 2016 г. Организация обоих экспериментов: тип использованных приемных микрофонов, расположение датчиков на измерительной площадке и методика предварительной обработки данных – практически полностью совпадала. Ее подробное описание можно найти в работе [1].

Расположение микрофонов для эксперимента 2016 г. в Качивели показано на схеме (рис. 1а). Лабораторный корпус, вокруг которого были размещены приемные микрофоны, расположен на склоне горы (рис. 1б). К северу идет более пологий подъем, переходящий далее в Крымскую ялу (высота около 1 км), к югу крутой спуск ($> 30^\circ$) до берега моря (≈ 100 м). Преимуществом данной схемы являлось существенное ослабление акустических помех с северного направления, недостатком – невозможность увеличить размер приемной антенны ввиду отсутствия ровной горизонтальной поверхности необходимого размера.

Все измерительные микрофоны были снабжены специально разработанными усилителями и "антиалиасинговыми" фильтрами с частотами среза 150 Гц. Чувствительность микрофонов 4189 и 4155 составляла около 4 В/Па. Оцифровка данных осуществлялась блоком АЦП L-Card E14–140 на частоте 1000 Гц, но при дальнейшей обработке данные прореживались до частоты 64 Гц.

Для построения карт скорости и направления ветра на акватории Черного моря использовались данные реанализа, адаптированные на

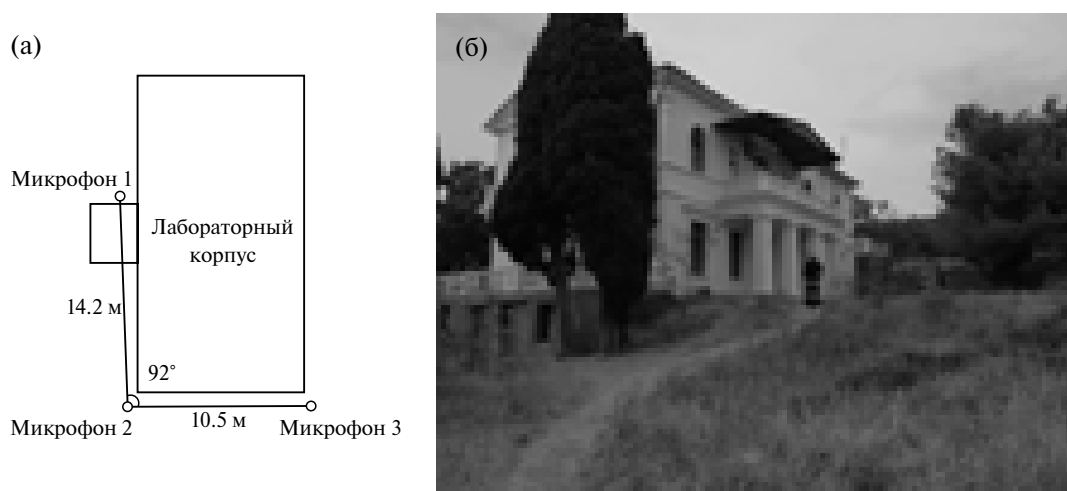


Рис. 1. а – Схема расположения приемных микрофонов вокруг здания лаборатории на территории филиала морского гидрофизического института в Кацивели, б – фотография лабораторного корпуса, виден рельеф местности в его окрестности.

сетку 0.10 с применением прогностической мезомасштабной модели SKIRON. [12].

Для определения расчетных полей акустического давления вдоль трассы источник–приемники использовались профили $C_{eff}(z)$, рассчитанные по данным радиозондирования проводимых в период регистрации инфразвука аэрологическими станциями Самсун (2011 г.) и Туапсе (2016 г.). Кроме того, в 2016 г. для расчета профиля C_{eff} мы использовали данные Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – <http://www.ecmwf.int/>).

Для интерпретации экспериментальных данных использовалась как описанная в работе [1] методика, так и метод РМСС, реализуемый с помощью разработанной в ИФА программы троюка. Этот метод подробно описан в работах [13, 14], мы же использовали несколько модифицированную версию, описанную ниже.

Записи сигналов микрофонов треугольной антенны предварительно пропускаются через набор полосовых фильтров. В нашем случае использовался набор из 10 фильтров, в диапазонах частот 1–10 Гц. Далее записи каждого микрофона по каждой частотной полосе делятся на кадры с большим перекрытием между соседними кадрами. Например, в нашем случае длина кадра выбиралась равной 100 с, а сдвиг между последовательными кадрами составлял 5 с. Для каждого частотного поддиапазона и соответствующих по времени кадров вычислялись максимумы парных корреляционных

функций, задержки между приходами сигнала на микрофоны треугольной антенны, соответствующие положению этих максимумов, а также, по трем парным задержкам, азимуты прихода и фазовые скорости приходящих сигналов.

В процессе разработки программы "троюка" мы сформулировали три критерия отбора данных:

1. Согласованность данных (consistency), определяемая по близости к нулю суммы задержек на трех парах микрофонов треугольной антенны, что является признаком прохождения волны через треугольную антенну. На практике задавалось граничное значение параметра $consistency = \frac{|t_{12} + t_{23} + t_{31}|}{\sqrt{t_{12}^2 + t_{23}^2 + t_{31}^2}}$ от 0.1 до 0.3 (для малых

треугольников), где t_{12} , t_{23} и t_{31} временные задержки сигналов на трех парах микрофонов треугольной антенны, соответствующие максимумам их взаимных корреляционных функций.

2. Граничные значения для рассчитанной фазовой скорости. В приведенных расчетах мы использовали значения от 250 м/с до 450 м/с.

3. Граничные значения азимута прихода, которые позволяют выделить акустические приходы только с интересующих нас направлений.

Примеры описанной здесь обработки представлены на рис. 2 и будут обсуждаться в следующем разделе настоящей работы.

Существенным недостатком анализа, приведенного в работе [1], является отсутствие в экс-

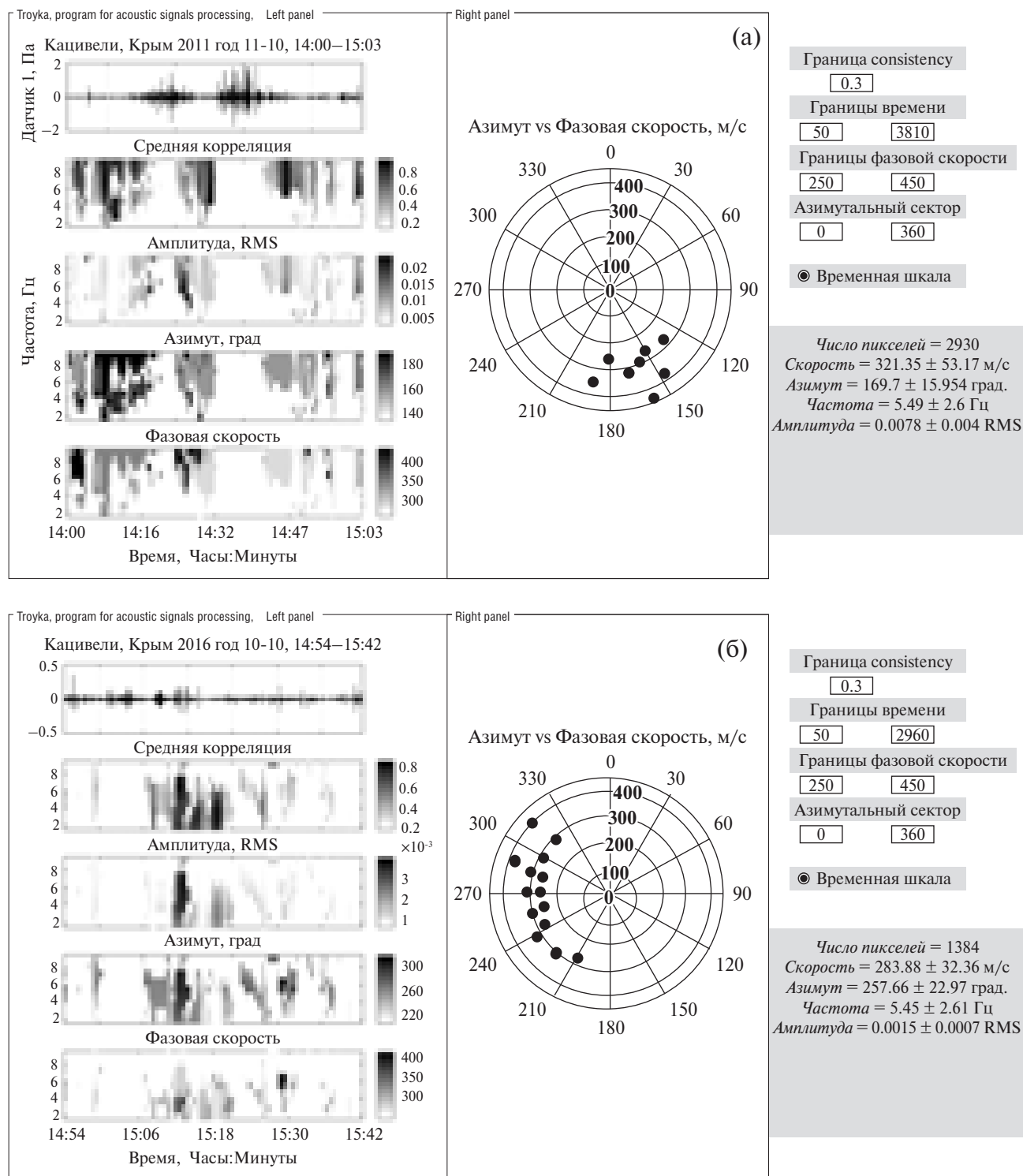


Рис. 2. Сравнение результатов обработки методом РМСС (troyka) данных 2011 (а) и 2016 г (б), на диаграммах слева показаны (сверху вниз): средний максимум трех парных корреляционных функций, средняя амплитуда, азимут и фазовая скорость, справа показана зависимость фазовой скорости (ρ) от направления прихода волны (θ). Цифры справа вне графиков показывают граничные значения параметра consistency, времени, фазовой скорости и азимута, ниже выведены средние значения скорости, азимута, частоты и амплитуды для данных условий отбора. Время в заголовке указано по GMT.

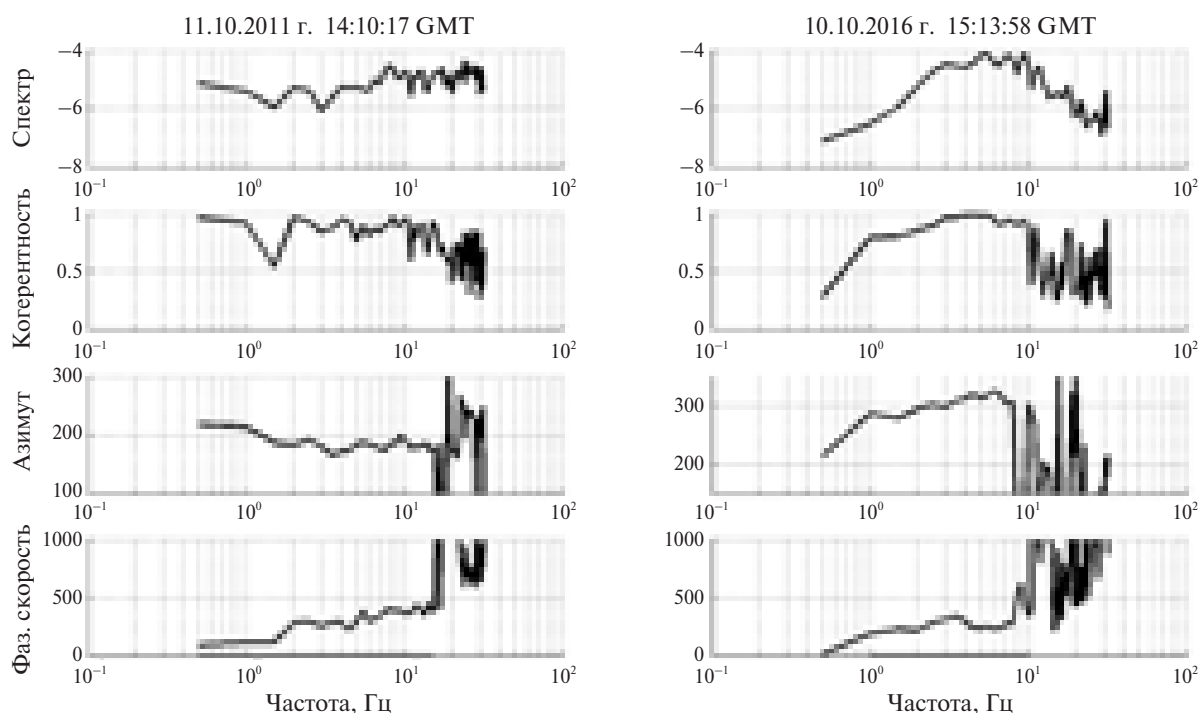


Рис. 3. Сравнение спектров инфразвуковых сигналов, зафиксированных в 2011 и 2016 гг. Сверху вниз: спектральная плотность, когерентность, спектр азимута и спектр фазовой скорости. В левом столбце показаны результаты обработки сигнала, зарегистрированного 11 октября 2011 г. в 14:10:17 GMT, в правом – результаты обработки сигнала, зарегистрированного 10 октября 2016 г. в 15:13:58 GMT. Внизу каждого столбца черной жирной линией отмечен диапазон частот, на котором сумма фаз сигналов от трех пар микрофонов близка к нулю.

перименте 2011 г. низкочастотных микрофонов, что не позволило исследовать акустические сигналы на частотах микробаром 0.2–0.3 Гц. В ходе эксперимента 2016 г. в Кацивели мы предприняли попытку обнаружить акустический сигнал на частотах микробаром (0.2 Гц). Для этого использовались датчики акустического давления (V&K № 4193) с нижним порогом частоты 0.1 Гц. Записи, полученные с помощью этих датчиков, обрабатывались в двух частотных диапазонах: в диапазоне частот от 1 до 10 Гц эта обработка дублировала аналогичную обработку записей микрофонов V&K № 4187, в дополнение к этому была проведена обработка в диапазоне частот от 0.1 до 1 Гц. Параметры приходов в частотном диапазоне 1–10 Гц в целом совпали с аналогичными параметрами, полученными при стандартной обработке записей микрофонов V&K № 4187. Однако в низкочастотном диапазоне от 0.1 до 1 Гц приходы волнового сигнала вообще не были обнаружены, что, по-видимому, было связано с недостаточной апертурой используемой треугольной антенны (10–15 м). Эти результаты мы здесь не приводим.

3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЗА 2011 И 2016 ГГ.

В 2016 г. записи приходов инфразвукового сигнала были получены в период от 05:00 10 октября до 02:00 11 октября (время по GMT). На рис. 2 показаны примеры обработки отдельных фрагментов сигналов 2011 (рис. 2а) и 2016 (рис. 2б) гг. Направление приходов меняется с южного (2011 г.) на западное (2016 г.), в то же время разброс направлений приходов волн близок (16° в 2011 г. и 23° в 2016 г.). Также близки между собой средние частоты приходящих сигналов (5.5 Гц в 2011 и 5.45 Гц в 2016 гг.).

Мы сравнили спектры различных параметров приходящей волны и аналогичные спектры, зарегистрированные нами в 2011 г. (рис. 3). Частотный диапазон и величина спектров сигнала, когерентности и фазовой скорости оказалась близкой в обоих случаях, в то же время направление прихода изменилось на западное. Кроме того, функция когерентности для случая измерений 2016 г. испытывает резкий спад на частотах ниже 1 Гц. В обоих случаях также наблюдается рост фазовой скорости с увеличением частоты от 1 до 10 Гц.

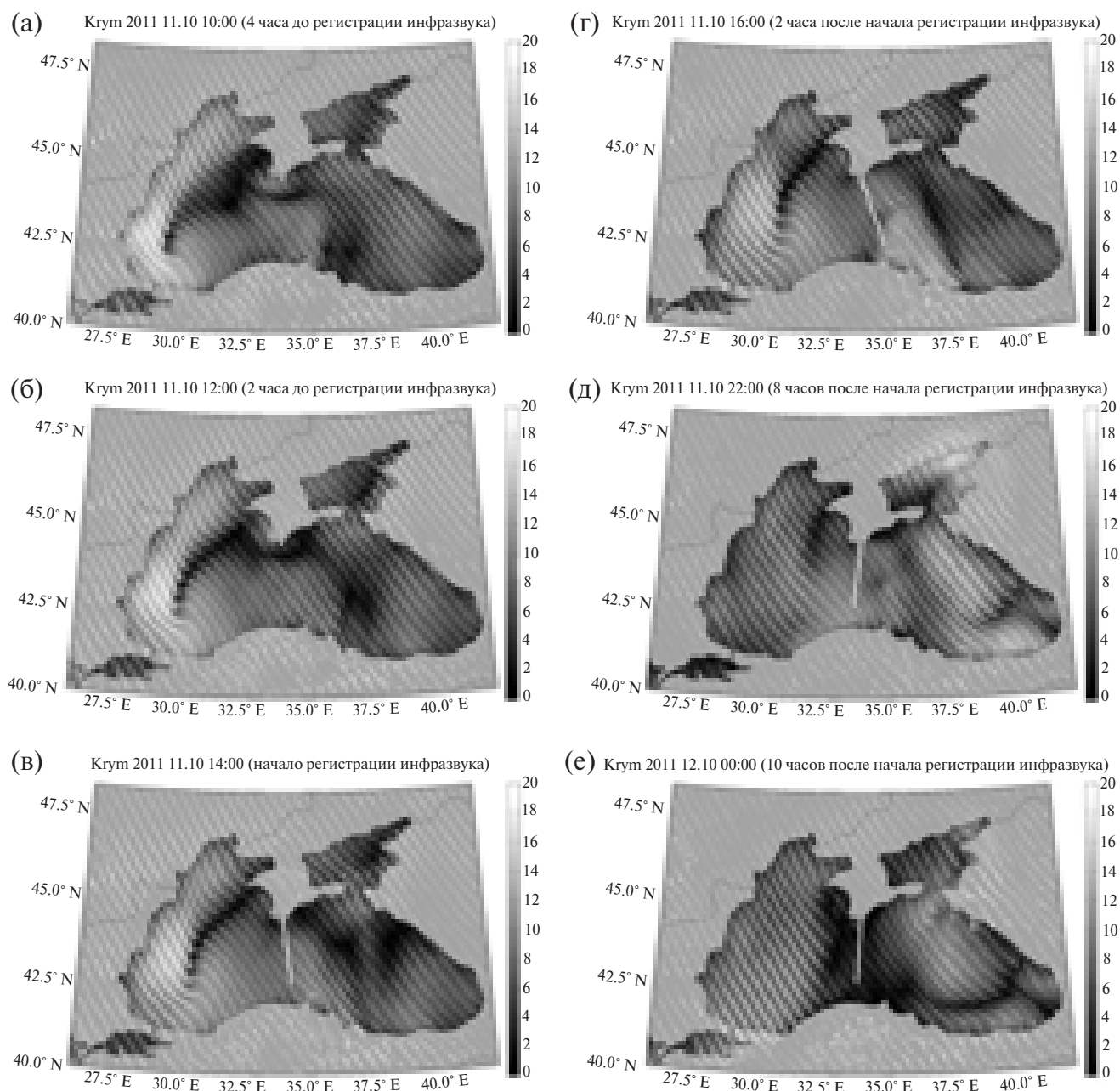


Рис. 4. 11–12 октября 2011 г. Карты ветровой обстановки на высоте 10 м над Черным морем, непосредственно перед началом регистрации и в период регистрации инфразвука: а – за 4 часа до начала регистрации инфразвука, б – за 2 часа, в – начало регистрации инфразвука, г – через 2 часа после начала регистрации, д – через 8 часов, е – через 10 часов после начала регистрации (случай максимальной интенсивности регистрируемого инфразвука). Белой линией показано направление прихода инфразвука.

3. КАРТЫ СКОРОСТЕЙ И НАПРАВЛЕНИЙ ВЕТРОВ НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ В ПЕРИОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ИНФРАЗВУКА

На рис. 4 и 6 показаны карты скоростей и направлений ветра над Черным морем в 2011 г. (рис. 4) и 2016 г. (рис. 6), как во время регистрации инфразвука, так и за несколько часов до на-

чала регистрации. Средние азимуты приходов инфразвука, рассчитанные программой *trouka*, нанесены на эти карты в виде белой линии. В обоих случаях отмечаются нестандартные ветровые неоднородности именно в направлении прихода инфразвука. Для наблюдений 2011 г. это столкновение двух разнонаправленных атмосферных вихрей над морем в непосредственной близости от места проведения акустических

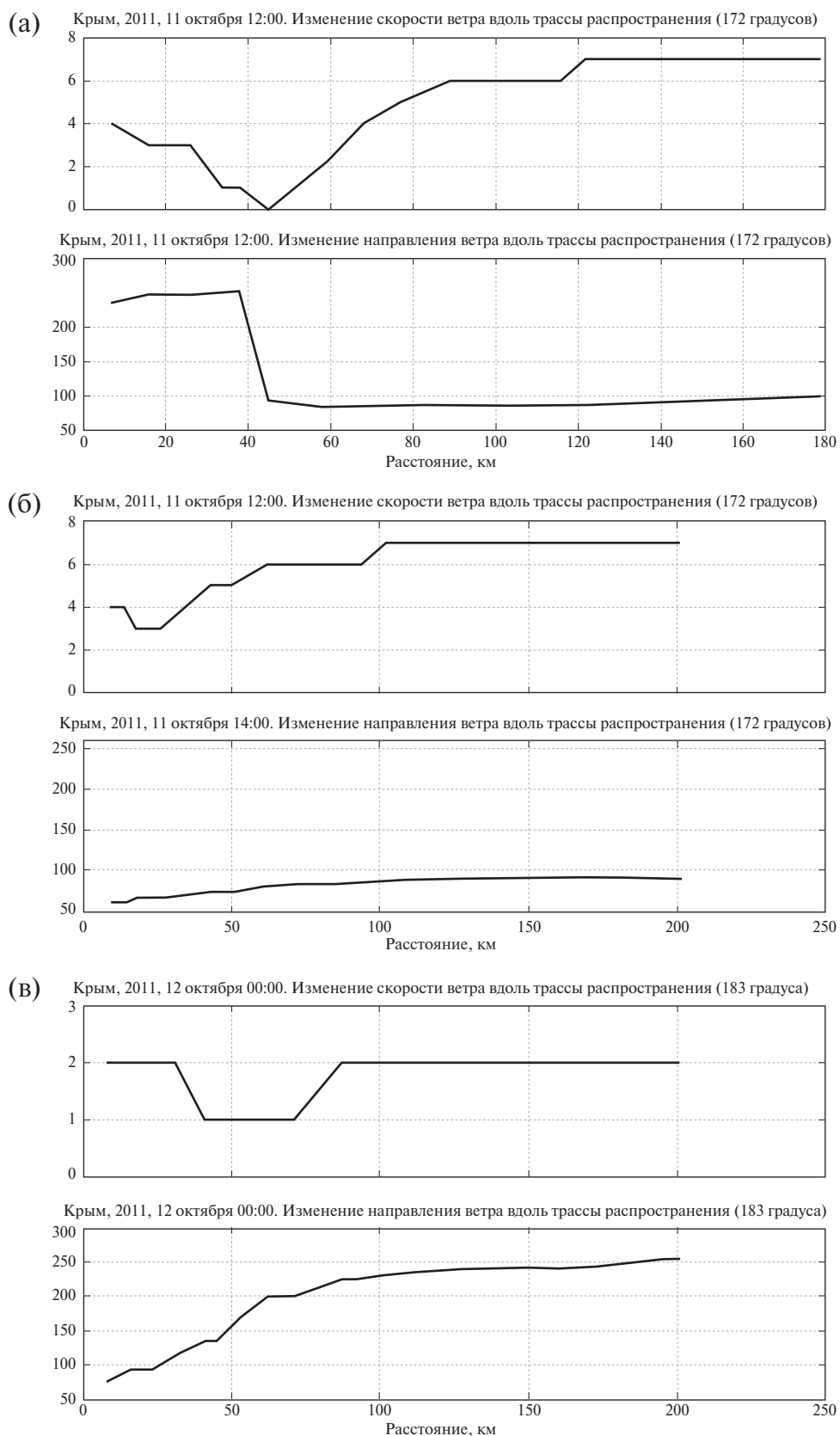


Рис. 5. 2011 год. Изменение скорости (верхний график) и направления (нижний график) ветра вдоль трассы прихода инфразвуковой волны. а – За два часа до начала приема инфразвукового сигнала (соответствует карте ветра на рис. 4б), б – начало регистрации инфразвука (рис. 4в), в – случай максимальной интенсивности инфразвукового сигнала (рис. 4е).

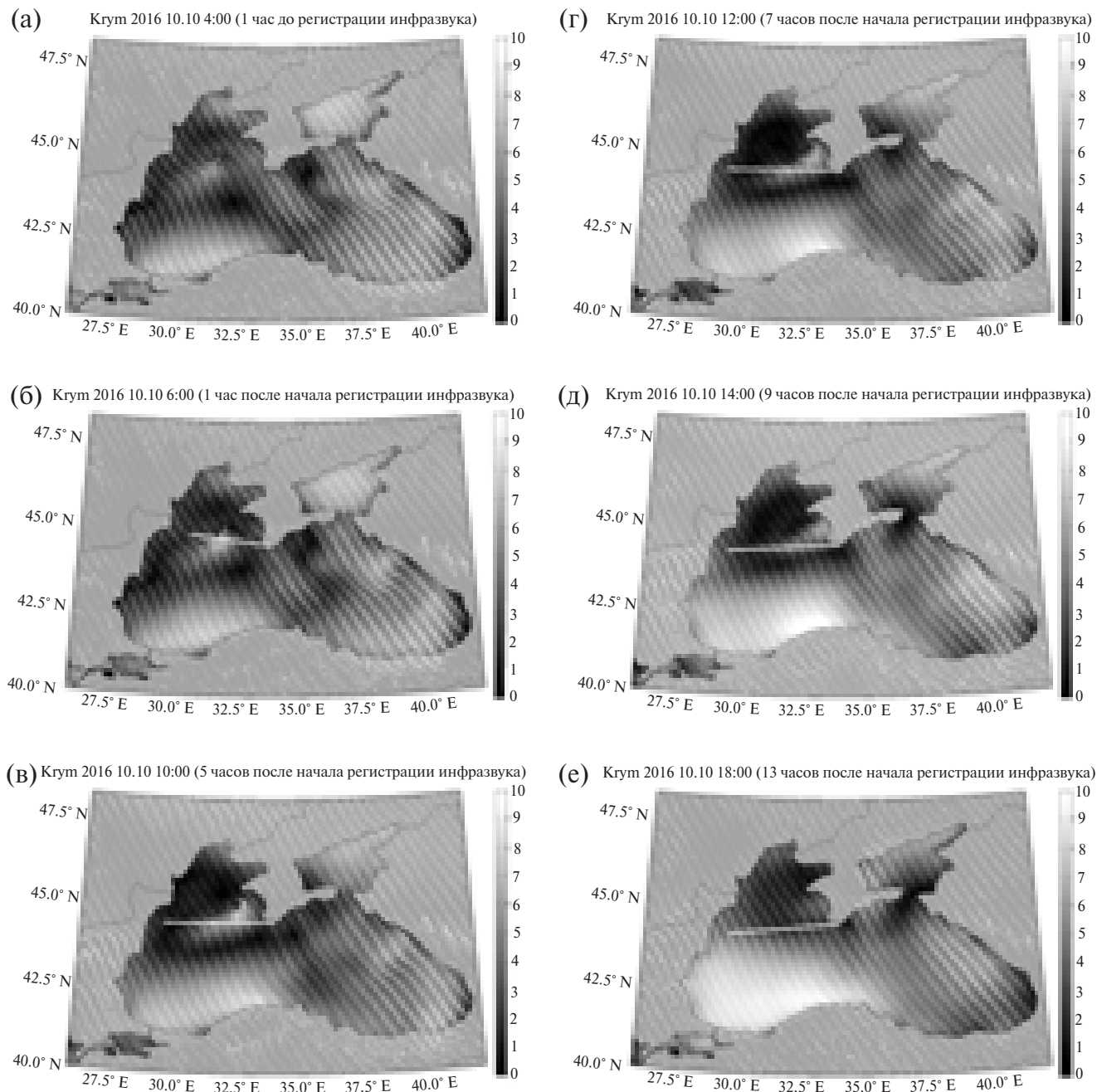


Рис. 6. 10 октября 2016 г. Карты ветровой обстановки на высоте 10 м над Черным морем, непосредственно перед началом регистрации и в период регистрации инфразвука: а – за 1 час до начала регистрации инфразвука, б – через час после начала регистрации, в – через 5 часов после начала регистрации, г – через 7 часов, д – через 9 часов, е – через 13 часов после начала регистрации (случай максимальной интенсивности регистрируемого инфразвука). Черной линией показано направление прихода инфразвука.

измерений (рис. 4а и 4б). Направление прихода инфразвука в целом совпадает с направлением от центра этого столкновения. В 2016 г. мы отметили наличие ветрового вихря (рис. 6а–д) к западу от пункта регистрации. И опять направление прихода инфразвука соответствует направлению от центра вихря к пункту измерений.

Для более детального анализа мы построили графики изменения скорости и направления ветра вдоль трассы прихода инфразвукового сигнала (рис. 5 – 2011 г. и рис. 7 – 2016 г.). На рис. 5б показаны профили скорости и направления ветра вдоль трассы прихода инфразвука соответствующие началу регистрации инфразвука и карте ветра на рис. 4в. И скорость, и направле-

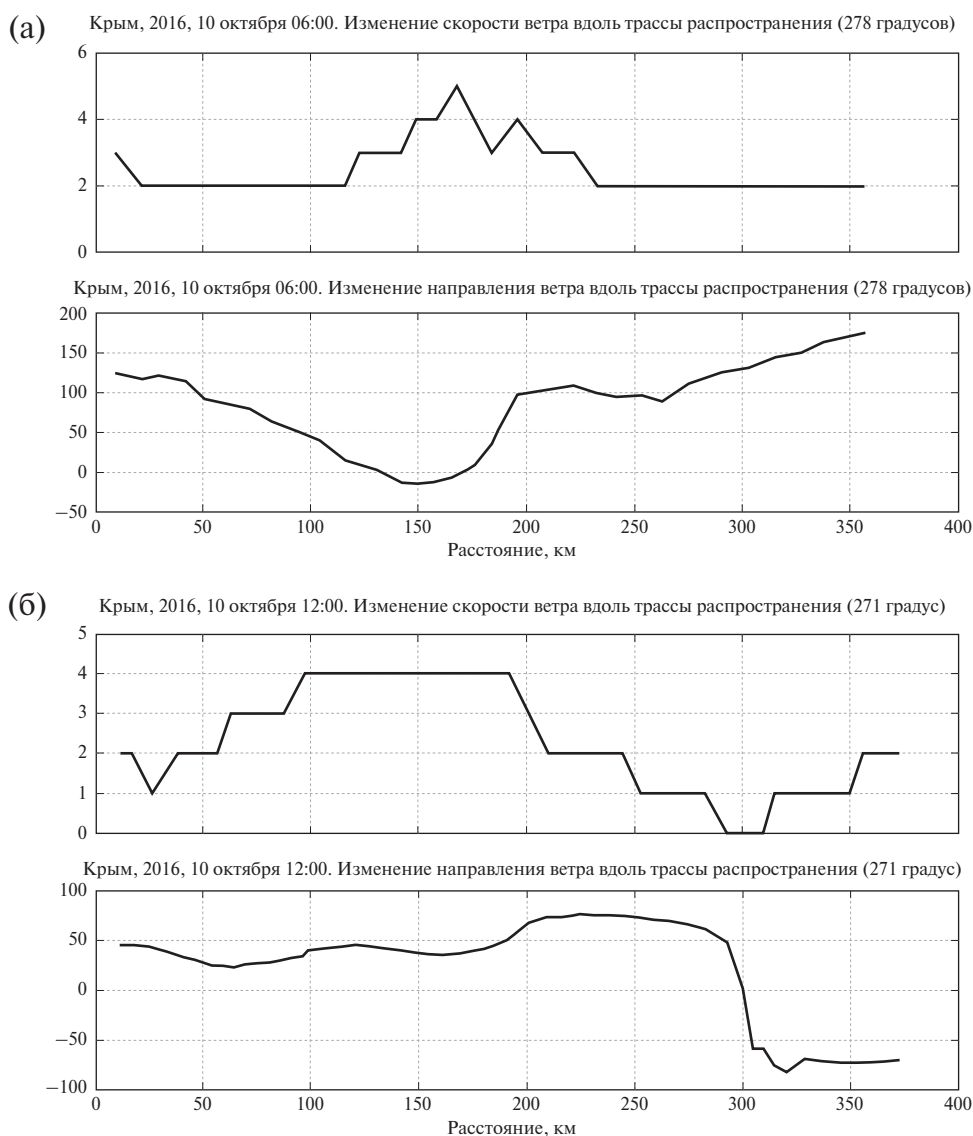


Рис. 7. 2016 г. Изменение скорости (верхний график) и направления (нижний график) ветра вдоль трассы прихода инфразвуковой волны. а – Через час после начала приема инфразвукового сигнала (соответствует карте ветра на рис. 6б), б – через 7 часов после начала приема инфразвука (рис. 8г).

ние ветра меняются плавно и не слишком сильно. Однако еще за 2 часа до начала регистрации (рис. 5а и карта ветра на рис. 4б) ситуация была существенно другой. Мы видим, что на расстоянии около 45 км вдоль трассы прихода (здесь за направление принималось направление сигнала, соответствующее времени начала регистрации инфразвука) направление ветра меняется на 150° , а скорость ветра падает до нуля, после чего снова начинает возрастать. Наконец, на рис. 5в (соответствует карте ветра на рис. 4е) показаны профили для случая максимальной интенсивности инфразвукового сигнала. И здесь мы снова видим уменьшение скорости ветра (на расстоянии 40–70 км вдоль трассы) и значительное

($150\text{--}160^\circ$), хотя и более плавное, изменение направления ветра.

На рис. 7 показаны аналогичные профили скорости и направления ветра для наблюдений 2016 г. Профили на рис. 7а соответствуют началу приема инфразвукового сигнала (карта ветра на рис. 6б), а профили, приведенные на рис. 7б, соответствуют примерно середине временного периода приема инфразвукового сигнала (карта ветра на рис. 6г). Увеличение скоростей ветра на расстояниях 120–230 км (рис. 7а) или 60–220 км (рис. 7б) от пункта регистрации соответствуют пересечению трассы распространения инфразвука траекторией движения атмосферного вихря. Изменение направления

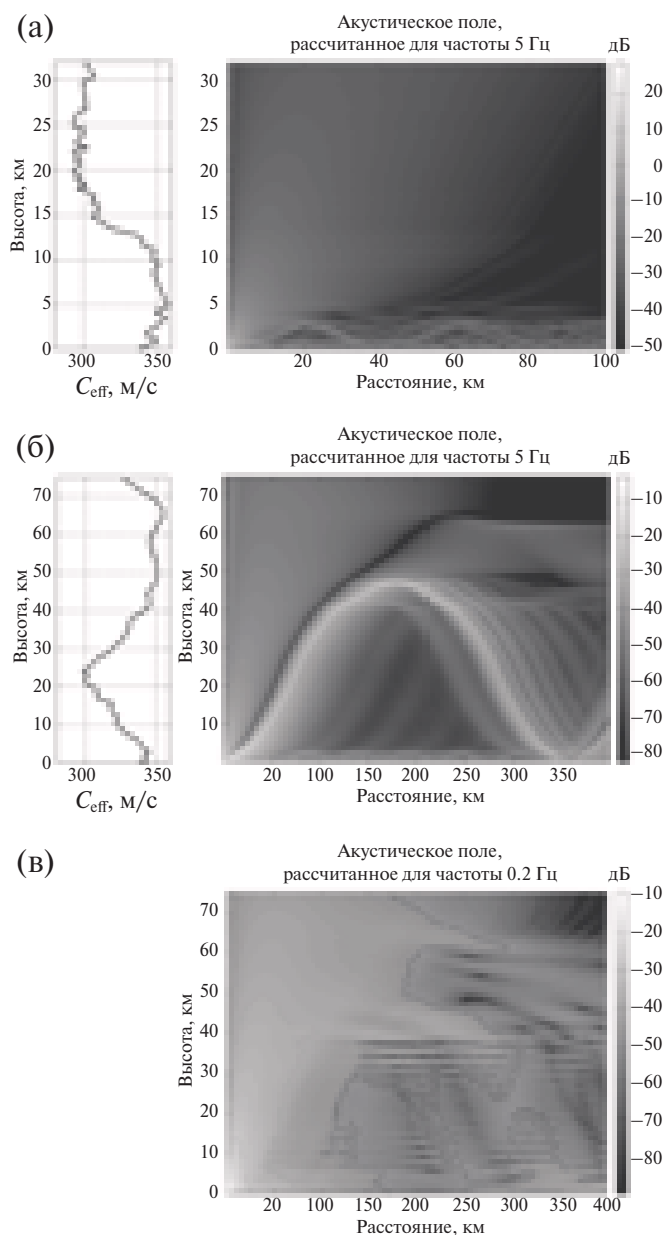


Рис. 8. а — Слева: профиль эффективной скорости звука для направления 0° по данным радиозондирования от 12 октября 2011 г. на метеостанции Самсун. Справа: акустическое поле, рассчитанное по этому профилю методом параболического уравнения для частоты сигнала 5 Гц.
 б — Слева: профиль эффективной скорости звука для направления 90° по данным Европейского Центра среднесрочных прогнозов погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <http://www.ecmwf.int/>). Справа: акустическое поле, рассчитанное по этому профилю методом параболического уравнения для частоты сигнала 5 Гц.
 в — Акустическое поле, рассчитанное по тому же самому профилю (рис. 8б) методом параболического уравнения для частоты сигнала 0.2 Гц.

ветра наблюдается как перед, так и после прохождения вихря (рис. 7а). Однако по мере приближения вихря к побережью Крыма, передний фронт вихря размывается, и, хотя некоторое усиление ветра еще присутствует, но изменение направления практически не заметно (рис. 7б). Зато отчетливо заметен поворот ветра в тылу вихря (примерно в 300 км от пункта приема инфразвука). Кроме того, на расстояниях от 300 до 350 км от пункта приема присутствует "мертвая зона", где скорость ветра приближается к нулю. К анализу профилей скорости и направления ветра мы вернемся при обсуждении результатов нашего исследования, но прежде исследуем условия распространения инфразвука в период его регистрации.

4. УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФРАЗВУКА

На рис. 8а (2011 г.) и 8б (2016 г.) показаны профили $C_{\text{эфф}}$, соответствующие направлениям распространения инфразвука (0° в 2011 г. и 90° в 2016 г.) и поля акустического давления в направлении источник – приемные микрофоны, рассчитанные по профилям $C_{\text{эфф}}$ методом параболического уравнения. Расчет проводился для частоты сигнала источника 5 Гц. В 2011 г. (рис. 8а) приповерхностный акустический волновод захватывает область в 40 км к югу от пункта регистрации до приемных микрофонов; в 2016 г. (рис. 8б) имеется волновод для акустических волн на расстоянии примерно 350 км от приемников. Данный волновод частично присутствует и для волн частотой 0.2 Гц (рис. 8в), однако на 0.2 Гц длина волны порядка 1.5 км, поэтому в приповерхностный волновод попадает только слабая по амплитуде первая волноводная мода. Мы рассчитали ослабление амплитуды сигнала вдоль трассы волновода для частот 0.2 и 5 Гц, которое составляет на расстоянии 350 км 23 дБ (14 раз по давлению). При этом захват звуковой энергии приводным акустическим волноводным каналом на частоте 0.2 Гц слабый, поскольку ширина канала меньше длины волны. Уровень компоненты звукового поля на частоте 0.2 Гц, отраженной на высотах стратосферы, намного ниже, чем звуковое поле в приводном канале на частоте 5 Гц. Кроме того, необходимо учесть влияние ветровых помех в точке приема, которые значительно возрастают с уменьшением частоты (по оценкам, уровень ветровых помех на частоте 0.2 Гц увеличивается на 26 дБ по отношению к помехе на частоте 5 Гц).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде всего отметим некоторые общие черты, характерные для ветровой обстановки в акватории Черного моря во время регистрации инфразвукового сигнала или непосредственно перед ней.

Во-первых, в обоих случаях отсутствуют сильные ветра со скоростью более 10 м/с. Так, на картах за 2011 г. (рис. 5), значительные ветра отмечены лишь в юго-западной части моря и в направлении, отличном от направления на источник инфразвука. Во время измерений 2016 г. сильные ветра также отсутствовали во всей акватории Черного моря (рис. 7). Это говорит о том, что в наших случаях нельзя считать причиной возникновения инфразвука обтекание волновых гребней и впадин сильным ветром, как это было предложено в [9, 10].

Во-вторых, в обоих случаях в акватории Черного моря наблюдались локальные ветровые вихри, направление на которые совпадало с направлением прихода инфразвуковых сигналов (рис. 4а, б и ба–д). Кроме того, была зарегистрирована временная задержка между образованием вихрей и приходом инфразвука. Окончание инфразвукового сигнала также запаздывает по отношению к исчезновению вихревых структур (рис. 4в–е, рис. 6е).

Это привело нас к предположению, впервые высказанному в [1], что источником инфразвука в данных случаях является не генерация вихрей при обтекании волн ветром, а взаимодействие разнонаправленных поверхностных волн, генерируемых при повороте скорости ветра в атмосферном вихре над морем. В 2011 г. такие волны генерировались в ходе столкновения двух разнонаправленных атмосферных вихрей (рис. 4а, б), в 2016 г. происходило взаимодействие волн, генерируемых вихрем в западной части акватории Черного моря и фоновыми волнами, генерируемыми преобладающим ветром вдали от области вихря.

Анализируя профили скорости и направления ветра вдоль трассы инфразвуковой волны, можно приблизительно определить зону генерации инфразвука. Так, для наблюдений 2011 г. эта зона была расположена в 40–50 км к югу от пункта измерений (рис. 5а, в). Аналогичный анализ для наблюдений 2016 года (рис. 7б) показывает, что наиболее вероятной зоной генерации инфразвука является область поворота

ветра и минимальных значений его скорости в 300–350 км к западу от пункта регистрации. Обоим зонам соответствуют волноводы на картах акустического давления (рис. 8), объясняющие возможность дальнего распространения инфразвука.

Нелинейный механизм генерации инфразвука стоячими поверхностными волнами обычно приписывается микробарам [2–6], основной спектральный пик которых соответствует частоте 0.2 Гц, т. е. удвоенной частоте поверхностных волн 0.1 Гц. Согласно полученной в [5] связи между спектром источников инфразвука и спектром морского волнения, интенсивность спектральных составляющих с частотами 1–10 Гц в регистрируемом сигнале должна быть мала по сравнению с интенсивностью основного пика микробаром на 0.2 Гц.

На практике, однако, известны случаи регистрации микробаром на необычных частотах. Например, в работе [11] описан случай регистрации микробаром с центральной частотой 0.6 Гц, пришедших из Восточного Средиземноморья. Также в работе [15], посвященной мониторингу инфразвука в Антарктике, приведены случаи одновременной регистрации микробаром и более высокочастотного сигнала частотой до нескольких десятков герц. Появление микробаром с такими частотами может быть связано с взаимодействием ветровых волн и зыби, которое может приводить к появлению вторичного максимума в спектре морского волнения [16]. Возможно также, что вклад в генерацию высокочастотных гармоник микробаром вносит нелинейность их распространения в самой атмосфере. Однако эффективность механизма генерации высокочастотного инфразвука стоячими поверхностными волнами требует дальнейшего изучения.

Хотя в ходе экспериментов в Кацивели микробаромы обнаружены не были, мы приводим в приложении отдельные результаты анализа инфразвука моря, полученные нами на побережье Охотского моря в сентябре 2017 г. В ходе этого эксперимента нам впервые удалось одновременно зарегистрировать акустические волны типа микробаром (0.275 Гц) и более высокочастотные сигналы на частоте ≈ 5.5 Гц приходящие с одного и того же направления, что может быть связано с одним и тем же источником генерации микробаром и высокочастотного инфразвука. Соответствующие результаты показаны на рис. 9 и 10.

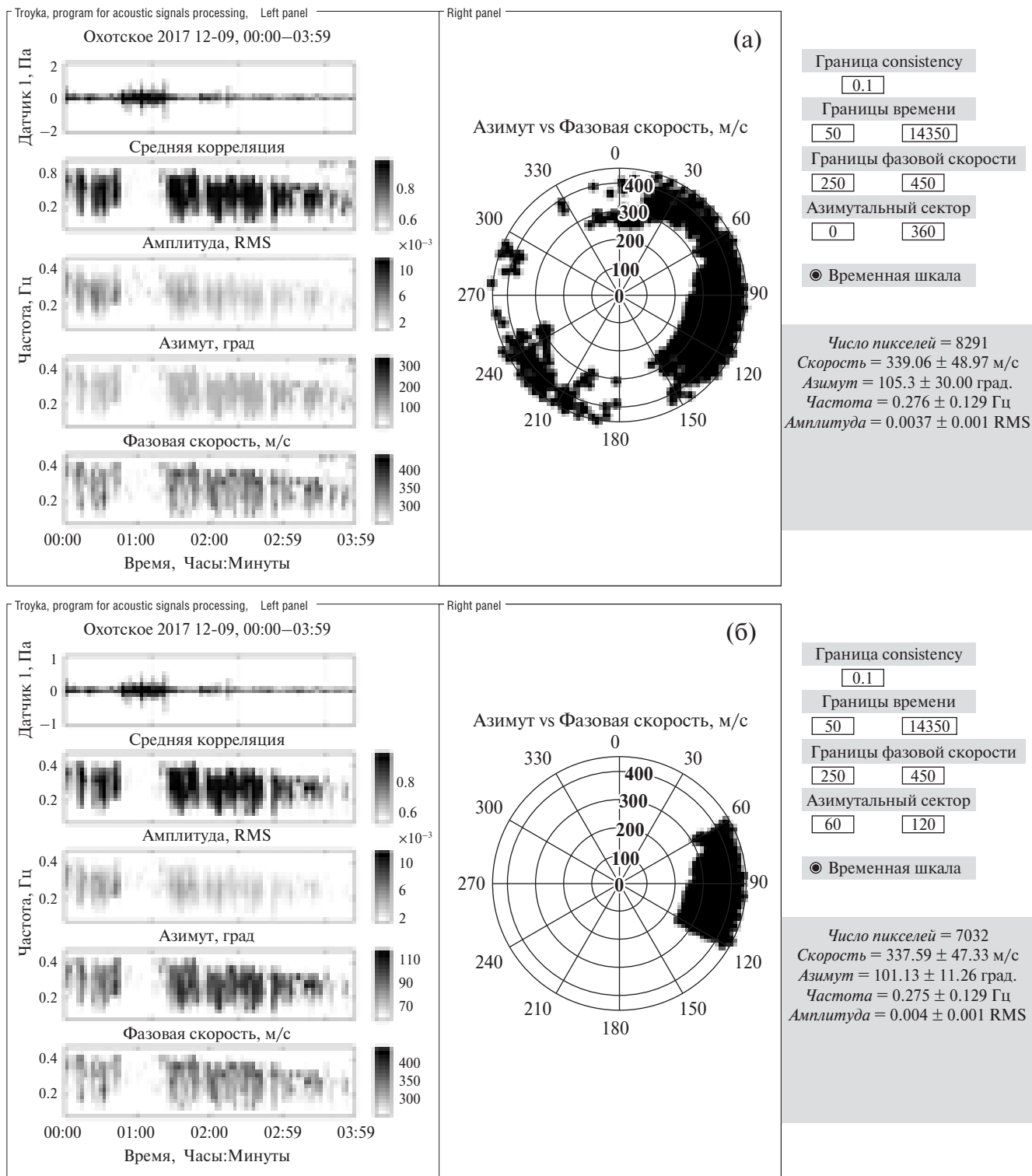


Рис. 9. Обработка методом РМСС (программа trouka) записей, полученных на побережье Охотского моря, в частотном диапазоне 0.05–0.5 Гц. Показаны: а – приходы акустических сигналов со всех направлений, б – приходы из азимутального сектора 60–120°. Слева показаны (сверху вниз): средний максимум трех парных корреляционных функций, средняя амплитуда, азимут, фазовая скорость, справа зависимость фазовой скорости (ρ) от направления прихода волны (θ). Вне графиков – граничные значения параметра consistency, времени, фазовой скорости и азимута, под ними выведены средние значения скорости, азимута, частоты и амплитуды для данных условий отбора.

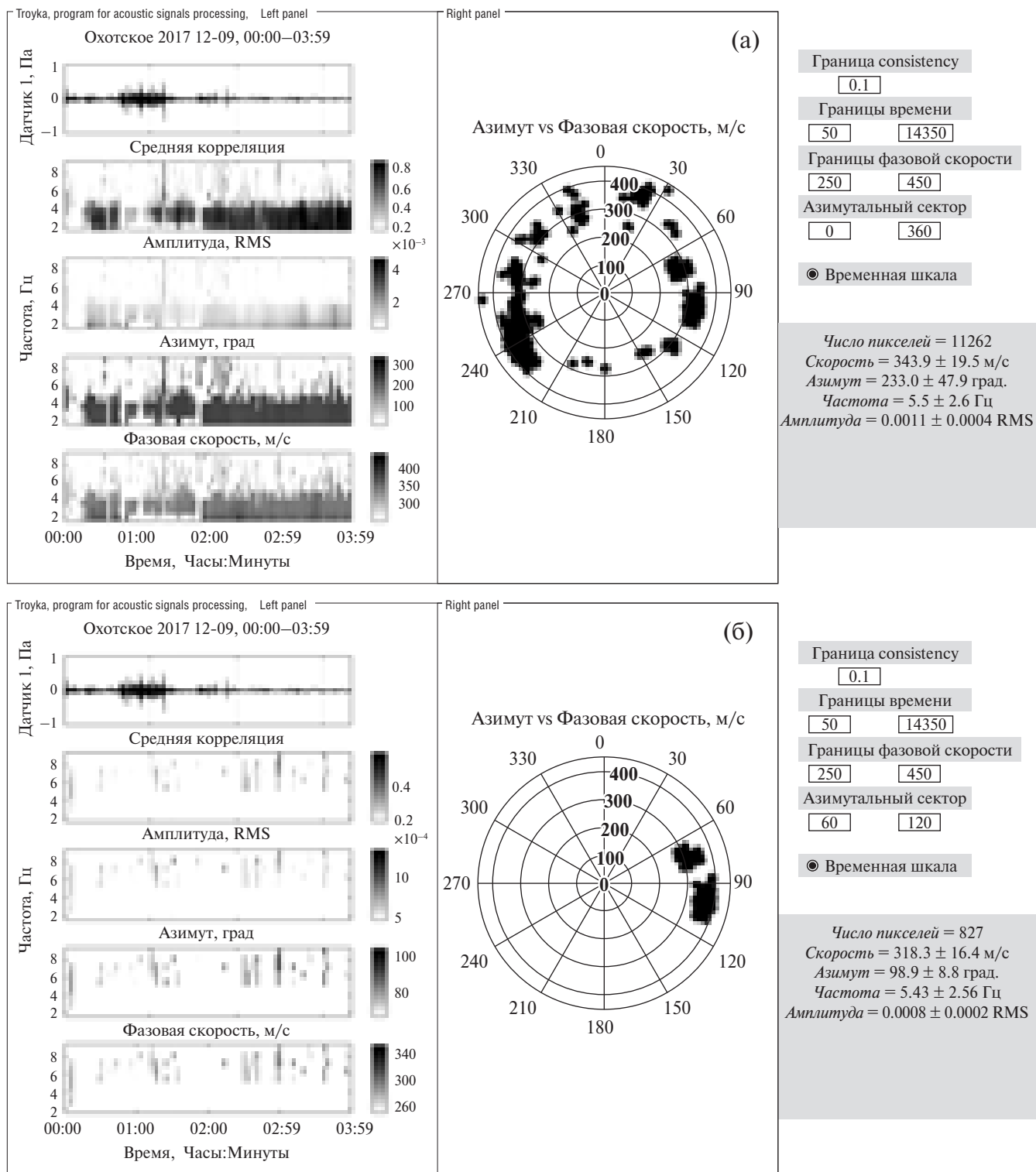


Рис. 10. Обработка методом РМСС (тройка) записей, полученных на побережье Охотского моря, в частотном диапазоне от 1 до 10 Гц. Показаны: а – приходы акустических сигналов со всех направлений, б – приходы из азимутального сектора 60–120°. Слева показаны (сверху вниз): средний максимум трех парных корреляционных функций, средняя амплитуда, азимут, фазовая скорость, справа зависимость фазовой скорости (ρ) от направления прихода волны (θ). Вне графиков – граничные значения параметра consistency, времени, фазовой скорости и азимута, под ними выведены средние значения скорости, азимута, частоты и амплитуды для данных условий отбора.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 15-05-03461 (раздел 2), 16-05-00438 (раздел 3), РФФИ №№ 18-05-00576 (разделы 1–2, 4).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Jelle Assink, любезно предоставившему нам профили ветра и температуры над Крымом по данным европейского центра прогноза погоды, а также сотрудникам Морского гидрофизического института, обеспечившим нас данными ветрового волнения в акватории Черного моря во время измерений.

ПРИЛОЖЕНИЕ:
НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ИЗМЕРЕНИЯ ИНФРАЗВУКА
НА ПОБЕРЕЖЬЕ ОХОТСКОГО МОРЯ
В СЕНТЯБРЕ 2017 ГОДА

Измерения проводились на побережье Охотского моря в сентябре 2017 г. Главными отличиями организации наблюдений от экспериментов 2011 и 2016 гг. в Качивели были, во-первых, существенно большая апертура треугольной антенны: здесь она составляла от 50 до 100 м, тогда как в Качивели антенна имела размеры 10–15 м. Кроме того, для регистрации акустических сигналов использовались новые микрофоны № 4964 фирмы Brüel&Kjær с нижним пределом частоты 0.02 Гц. Это позволило осуществлять фильтрацию записей в двух частотных диапазонах, а именно в диапазоне 0.05–0.5 Гц (микробаромы) и в стандартном диапазоне 1–10 Гц. В остальном обработка была вполне аналогична обработке данных экспериментов в Качивели.

На рис. 9 (0.05–0.5 Гц) и 10 (1–10 Гц) приведены результаты обработки записей микрофонов треугольной антенны, полученные ночью 12 сентября 2017 года. В это время к побережью приближался тайфун, который достиг места измерений примерно в 14–15 часов. Затишье перед тайфуном обеспечивало практически идеальные условия для регистрации инфразвука. По нашему предположению, данные атмосферные условия были благоприятны для генерации микробаром.

Действительно, мы видим на рис. 9а (0.05–0.5 Гц) большое число приходов акустических сигналов, весьма похожих на микробаромы, с восточных направлений (средняя частота 0.276 Гц). Около 85 % этих приходов находятся в азимутальном секторе 60–120°. Одновремен-

но, на рис. 10а (частотный диапазон 1–10 Гц) также присутствуют приходы с этого азимутального сектора. Их, конечно, гораздо меньше, поскольку большая часть приходов в этом частотном диапазоне маскируется приходами с западных и юго-западных направлений, имеющих, по-видимому, антропогенную природу.

Мы сравнили основные параметры приходов в азимутальном секторе 60–120° для частотного диапазона 0.05–0.5 Гц (рис. 9б) и для частотного диапазона 1–10 Гц (рис. 10б). Несмотря на то что в последнем случае в этом диапазоне зарегистрировано лишь около 7 % приходов, они достаточно равномерно распределены по всему временному отрезку, что свидетельствует о постоянном характере данного сигнала за время данной серии измерений. Основные осредненные параметры сигнала, приходящего из азимутального сектора 60–120° для низких частот (0.05–0.5 Гц): фазовая скорость 338 ± 47 м/с, азимут 101 ± 11 градусов, частота 0.275 ± 0.129 Гц, амплитуда 0.0037 ± 0.001 Па; для высоких частот (1–10 Гц): фазовая скорость 318 ± 16 м/с, азимут 99 ± 9 градусов, частота 5.43 ± 2.56 Гц, амплитуда 0.0008 ± 0.0002 Па.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Чунчужов И.П., Репина И.А. Об опыте регистрации "голоса-моря" в акватории Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 6. С. 716–728.
2. Longuet-Higgins M.S. A theory of the origin of microseisms // Philos. Trans. R. Soc. Lond. 1950. V. 243. P. 1–35.
3. Бреховских Л.М. Об излучении океанскими волнами инфразвука в атмосферу // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1968. Т. 4. № 4. С. 444–450.
4. Бреховских Л.М., Гончаров В.В., Куртенов В.М., Наугольных К.А. К вопросу об излучении инфразвука в атмосферу поверхностными волнами в океане // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 9. С. 899–907.
5. Waxler R., Gilbert K.E. The radiation of atmospheric microbaroms by ocean waves // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 119. P. 2651–2664.
6. Kristoffer T. Walker. Evaluating the opposing wave interaction hypothesis for the generation of microbaroms in the eastern North Pacific // J. of Geoph. Res. 2012. V. 117. CXXXXX. DOI: 10.1029/2012JC008409
7. Шулейкин В.В. О голосе моря // ДАН. 1935. 3(8). № 6. С. 259.

8. Шулейкин В.В. Физика моря. Издание 4. М.: Наука, 1968. 1083 с.
9. Андреев Н.Н. О голосе моря // ДАН. 1939. 23. № 7. С. 625.
10. Semenov A.G. On "Voice of Sea" Generation Mechanism // International Journal of Geoscience. 2013. V.4. P. 116–128.
11. Assink J.D., Waxler R., Smets P., Evers L.G. Bidirectional infrasonic ducts associated with sudden stratospheric warming events // J. of Geoph. Res. 2014. V. 119. № 3. P. 1140–1153.
12. Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A., Jovic D., Kalkaliagou O., Misirlis N., Manousakis M. The regional weather forecasting system SKIRON: An overview // Proceedings of the symposium on regional weather prediction on parallel computer environments. 1998. V. 15. P. 17.
13. Cansi Y. An automatic seismic event processing for detection and location: the PMCC method. Geophys. Res. Lett. 1995. 22. 1021–1024.
14. Le Pichon A., Cansi Y. PMCC Progressive Multi-Channel Correlation, Technical documentation, CTBTO 2003-0269/POGGIO.
15. Matsushima T., Murayama T., Ishihara Y., Kanao M., Yamamoto M., Toda S. Infrasound observations at Syowa Station, East Antarctica: Implications for detecting the surface environmental variations in the polar regions // Geoscience Frontiers. 2015. V. 6. i2. P. 285–296.
16. Badulin S.I., Korotkevich A.O., Resio D., Zakharov V.E. 2008 Wave-wave interactions in wind-driven mixed seas // Proceedings of the Rogue wave. 2008 Workshop. P. 77–85. IFREMER, Brest, France. www.researchgate.net.

Analysis of the Conditions for the Occurrence of "the Voice of the Sea" Using Infrasound Observations in Marine Waters

V.G. Perepelkin*, I.P. Chunchuzov, S.N. Kulichkov,
O.E. Popov, I.A. Repina

*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS
Pyzhevsky per., 3, Moscow, 119017, Russia*

* E-mail: vitaliper54@gmail.com

Received: 19.07.2018

Revised version received: 24.09.2018

We study the conditions for the occurrence of "the voice of the sea" in the infrasound range can occur and determine its parameters from infrasound measurements in the Black Sea water area conducted in 2011 and 2016 and in the water area of the Sea of Okhotsk in 2017. To this end, we compared the observations of different parameters (mean correlation, spectra of acoustic arrivals, direction and phase velocity) of the high-frequency infrasound (1–10 Hz), recorded in Katsiveli (Crimea) in 2011 and 2016. We performed a detailed study of the wind conditions in the Black Sea water area during the measurement period, as well as the conditions for the propagation of acoustic waves along the direction of their arrivals.

In both cases the atmospheric vortices in the direction of the arrival of infrasound were detected, which caused changes in wind velocity vector above the sea surface. The infrasound recorded in 2011 was caused by the interaction of two differently rotating atmospheric vortices over the sea. In 2016, a vortex was observed to the West from the registration point. The possibility of generating "the voice of the sea" due to the rotation of the wind velocity, which causes a nonlinear interaction of surface waves propagating in opposite directions to each other, and the formation of their 2nd harmonic in the form of a standing surface wave is discussed.

From the analysis of the wind speed and wind direction profiles along the infrasound arrival path, as well as the acoustic pressure fields calculated by the parabolic equation method for the effective sound speed profiles in the direction of infrasound propagation, the most probable areas of infrasound generation were determined. In both cases these areas coincided with the zones in which the wind speed drops to zero, and the direction of the wind changes to the opposite.

An example of simultaneous detection from one direction of the microbaroms with frequencies 0.2–0.3 Hz and "the voice of the sea" with a higher frequency of 5.5 Hz is given.

Keywords: sea voice, microbaroms, infrasound waves, sea excitement