

DOI: 10.18721/JPM.12110

УДК 534.2

РЕГИСТРАЦИЯ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ТАЙФУНОВ ЛАЗЕРНЫМИ ДЕФОРМОГРАФАМИ

В.А. Чупин, Г.И. Долгих, Е.С. Гусев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

В статье приводится описание натуральных наблюдений мощных инфразвуковых возмущений в диапазоне «голоса моря» (7 – 9 Гц), вызванных прохождением тропических циклонов (тайфунов) в юго-восточном районе Дальневосточного федерального округа России и акватории Японского моря. Регистрация каждого события выполняется с помощью лазерно-интерференционного измерительного комплекса, стационарно расположенного на юге Приморского края. Проанализированы динамические спектрограммы наблюдаемых событий и прослежена их связь с метеорологическими явлениями, такими как ветер и морские волны. При использовании спутниковых данных найдена взаимосвязь распределения области влияния тайфунов в регионе с наблюдаемым инфразвуковым возбуждением. Сделаны выводы о взаимосвязи проявления микросейсм «голоса моря» с возникновением первичных и вторичных микросейсм, а также хорошей корреляцией между исчезновением микросейсм «голоса моря» и соответствующим прекращением первичных микросейсм. Установлено отсутствие зависимости уровня сигнала от скорости ветра в области расположения измерительного полигона.

Ключевые слова: инфразвуковая волна, лазерный деформограф, тайфун, голос моря

Ссылка при цитировании: Чупин В.А., Долгих Г.И., Гусев Е.С. Регистрация инфразвуковых возмущений тайфунов лазерными деформографами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 117–127. DOI: 10.18721/JPM.12110

RECORDING TYPHOONS' INFRASONIC DISTURBANCES BY LASER STRAINMETERS

V.A. Chupin, G.I. Dolgikh, E.S. Gusev

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok, Russian Federation

In the paper, the field studies of powerful infrasonic disturbances in the range of “voice of the sea” (7 – 9 Hz) caused by tropical cyclones (typhoons) in the southeastern region of the Far Eastern Federal District (Russia) and the water area of the Sea of Japan have been presented. Event monitoring was carried out using the laser-interference measuring complex located permanently in the South of Primorski Krai. The dynamic spectrograms of the observable events were analyzed and their connection with various meteorological phenomena, such as wind and sea waves, was followed. Using the satellite data, a connection between the distribution of the area of typhoons influence in the region and the observed infrasound excitation was found. The conclusions were drawn regarding the correlation between the exhibition of the “voice of the sea” microseisms and the initiation of primary and secondary microseisms, as well as the one between the “voice of the sea” microseisms' disappearance and the corresponding end of primary microseisms. No dependence of the signal level on the wind speed in the area of the measuring range location was established.

Keywords: infrasonic wave, laser strainmeter, typhoon, voice of sea

Citation: V.A. Chupin, G.I. Dolgikh, E.S. Gusev, Recording typhoons' infrasonic disturbances by laser strainmeters, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (1) (2019) 117–127. DOI: 10.18721/JPM.12110

Введение

На морской экспериментальной станции (МЭС) «Мыс Шульца» Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН) ведется постоянное исследование целого комплекса показателей сейсмоакустико-гидрофизического цикла. Регистрируются вариации деформации земной коры (с помощью берегового лазерного деформографа), вариации атмосферного давления (с помощью лазерного нанобарографа), вариации гидросферного давления (используется специальный лазерный измеритель) и вариации скорости ветра (на метеостанции). При обработке синхронных экспериментальных данных, полученных при такой регистрации, было обнаружено, что в прибрежной области Приморского края наблюдается низкочастотное сейсмоакустическое возмущение в диапазоне 7–9 Гц (частотная полоса так называемого «голоса моря»).

Возбуждение сейсмического сигнала в данном диапазоне частот связано с прохождением тропических циклонов в окрестности измерительного полигона. Эти природные явления существенно влияют на жизнедеятельность Дальневосточного региона Российской Федерации.

Впервые на существование голоса моря – высокочастотного инфразвука (от единиц до десяти и более герц) было указано в работе [1]. В качестве механизма возникновения указанного феномена рассматривается обтекание больших океанских волн ветровым потоком. Альтернативный механизм возникновения этого инфразвука предлагается в работе [2], где рассматривается акустический шум от морских волн, разбивающихся о скалистые берега. В статье [3] высказано предположение об общей генерации инфразвука стоячими поверхностными волнами и, как следствие, – стратификации свойств атмосферы, таких как скорость ветра и температура, на наблюдаемые параметры инфразвуковых волн. Такие стоячие волны образуются в результате нелинейного взаимодействия между прогрессивными поверхностными волнами.

Множеством авторов, в том числе авторами статьи [4], регистрировались первичные и вторичные микросейсмы, возникающие в результате действия прогрессивных и стоячих морских волн на океанское дно. Механизм генерации вторичных микро-

сейсм, т. е. колебаний земной поверхности малой амплитуды, период которых равен полупериоду прогрессивных морских волн, был описан в работе [5]. Подобный акустический сигнал в атмосфере был назван микробаромами [6], теория возникновения которых была разработана в работах [7–9]. Микробаромы и вторичные микросейсмы образуются в результате нелинейных эффектов, возникающих при взаимодействии двух встречных прогрессивных морских волн с удвоенным периодом. В работе [10] анализируются экспериментальные данные, относящиеся к штормам; они дают основания заключить, что микробаромы и вторичные микросейсмы имеют один источник. В работе [11] впервые сообщается о регистрации деформационных возмущений, вызванных прохождением тайфуна и лежащих в частотном диапазоне голоса моря.

В связи с серьезной угрозой, которую представляют собой описанные природные явления, существует острая необходимость в проведении всесторонних исследований физики возникновения подобных процессов, а также изучения их динамических особенностей.

Измерительный комплекс и перечень экспериментальных данных

В настоящей статье рассматриваются как наши собственные экспериментальные данные, так и полученные японскими исследователями. Собраны и изучены следующие сведения:

исследования Японского метеорологического агентства о движении тропических циклонов за 2010 – 2018 гг. [12];

снимки с японского спутника Himawari-8 [13], позволяющие с точностью до 1 ч визуально проследить область распределения циклонического вихря;

результаты наших измерений с помощью лазерного деформографа;

экспериментальные данные с нашей метеостанции.

Регистрация вариаций деформации земной коры с помощью лазерных деформографов была произведена с аппаратно-программного комплекса, расположенного на полигоне ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца». Комплекс был развернут с целью изучения природы возникновения, развития и трансформации колебаний и волн звукового и инфразвукового диапазонов, их взаимо-



действия друг с другом и с неоднородностями геосфер различных масштабов [14].

Два лазерных деформографа находились на мысе Шульца Японского моря. Координаты объектов были $42,58^\circ$ с.ш. и $131,157^\circ$ в.д. Эти два устройства располагались так, что представляли собой двухкоординатный лазерный деформограф с (почти) взаимно перпендикулярными измерительными плечами [15]. Каждый лазерный деформограф собран по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона с использованием частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера. Один из них имел длину измерительного плеча 52,5 м и был ориентирован под углом 18° (198°) к линии север-юг; другой имел соответствующую длину 17,5 м и ориентирован под углом 110° (290°) к этой линии. Первый находился на глубине 3–5 м от поверхности Земли в гидротермоизолированном помещении, на высоте 67 м над уровнем моря, а второй – на удалении 70 м от первого на глубине 3–4 м от поверхности Земли в подобном помещении. Угол между измерительными плечами лазерных деформографов составлял 92° . Применяемые методы интерферометрии позволяют регистрировать изменение длины l измерительного плеча каждого лазерного деформографа с точностью $\Delta l = 0,01$ нм в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц. При этом чувствительность лазерного деформографа с длиной плеча $l = 52,5$ м составляет $\Delta l / l \approx 0,2 \cdot 10^{-12}$, а лазерного деформографа с длиной плеча $l = 17,5$ м – примерно $0,6 \cdot 10^{-12}$.

На метеорологической станции измеряются температура и влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра. Данные по вариациям

указанных величин регистрируются с дискретностью 1 Гц.

Результаты измерений лазерных деформографов и с метеостанции поступают в лабораторное помещение, где выполняется предварительная обработка (фильтрация и децимация) полученных данных, затем информация записывается на твердые носители программно-вычислительного комплекса с последующей организацией базы экспериментальных данных.

Первоначально был проведен анализ базы данных тайфунов, проходящих в северо-западной части Тихого океана и оказавших непосредственное влияние на дальневосточный регион России. В качестве характерных примеров этого влияния нами были выбраны четыре тайфуна. Названия исследуемых тайфунов и интервалы времени их действия приведены в таблице. На основе данных Японского метеорологического агентства была составлена комплексная карта траекторий движения рассматриваемых тайфунов (рис. 1), с обозначением полусуточных интервалов времени их движения по японскому стандартному времени JST (Japan Standard Time), которое соответствует UTC+09, т. е. смещению +9 ч относительно всемирного координированного времени (UTC – Universal Time Coordinated).

Траектории выбранных тайфунов, как следует из рисунка, проходили вблизи измерительного полигона и вызывали генерацию наблюдаемого сейсмоакустического возмущения в диапазоне «голоса моря». Снимки с японского спутника Himawari-8 использовались для визуального отслеживания места расположения «глаз» тайфунов, их передних фронтов и «хвостов».

Таблица

Использованные временные интервалы обработки данных наблюдений за тайфунами

| Обозначение | Название тайфуна | Период времени |
|-------------|------------------|---------------------------|
| B | Болавен | 28.08. 2012 – 31.08. 2012 |
| S | Санба | 17.09. 2012 – 20.09. 2012 |
| M | Матмо | 26.07. 2014 – 27.07. 2014 |
| Ch | Чан-Хом | 12.07. 2015 – 15.07. 2015 |

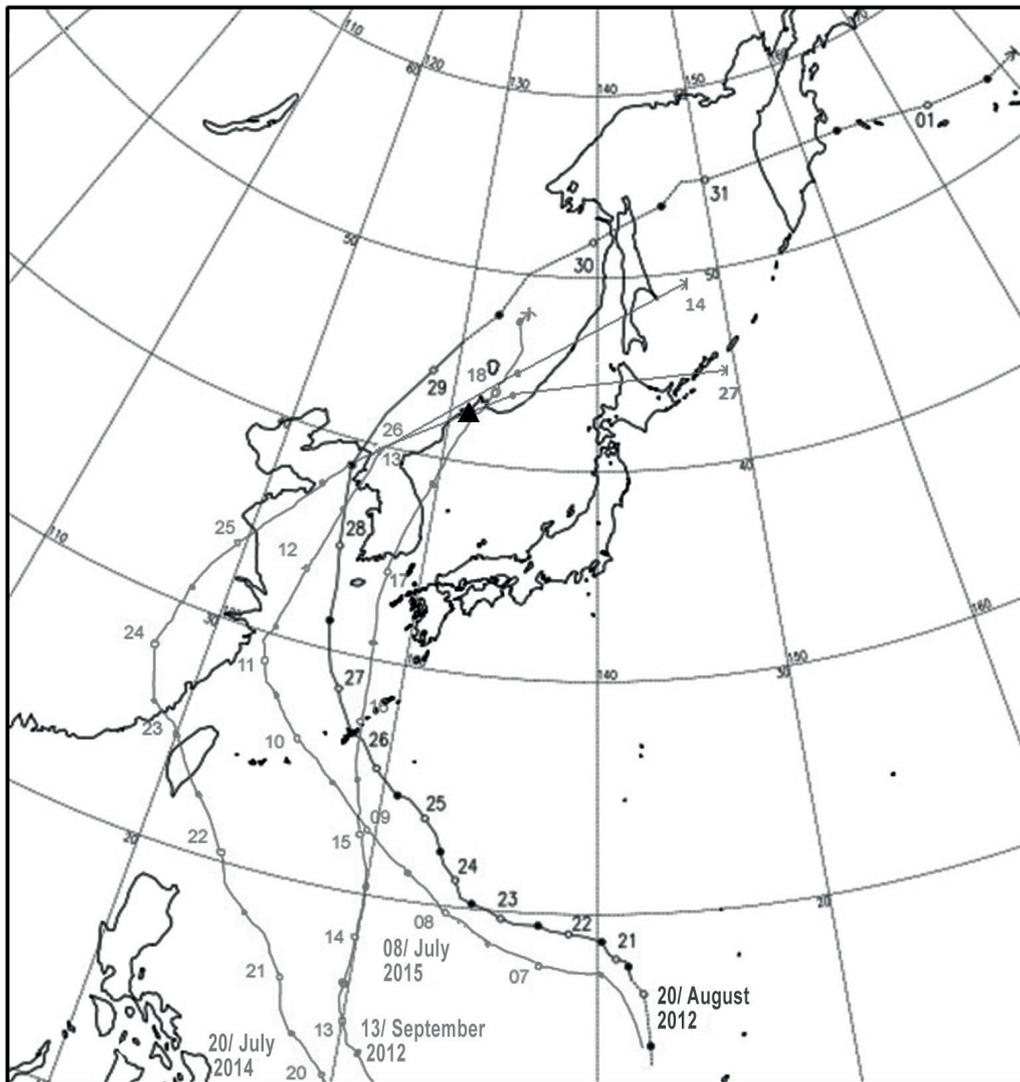


Рис. 1. Комплексная карта траекторий движения рассматриваемых тайфунов, составленная нами на основе данных Японского метеорологического агентства. Обозначены полусуточные интервалы времени движения тайфунов по японскому стандартному времени JST, цифры соответствуют датам регистрации (см. таблицу и пояснения в тексте); треугольником обозначено местоположение измерительного полигона

Экспериментальные данные и их анализ

В ходе выполнения работ использовались данные с одного лазерного деформографа как наиболее репрезентативные, а также результаты измерений вариации величины скорости ветра, полученные на метеостанции. После обработки информации с лазерного деформографа, поступившей за указанные интервалы наблюдений, были получены спектрограммы диапазона «голос моря» (рис. 2). Кроме того, были получены спектрограммы диапазона микросейсм, вызванных воздействием на дно морских

ветровых волн и волн зыби (рис. 3). На рис. 4 приведены данные по изменению скорости ветра в рассматриваемые интервалы наблюдений. Далее представлен детальный анализ информации, приведенной для каждого тайфуна на рис. 1 – 4. Используются также снимки с японского спутника Himawari-8.

Тайфун Болавен (В). Согласно данным лазерного деформографа, 28 августа 03:25 (далее везде время всемирное координированное (UTC)) возникает шум в диапазоне 1,0–2,5 Гц, а также узкополосные колеба-

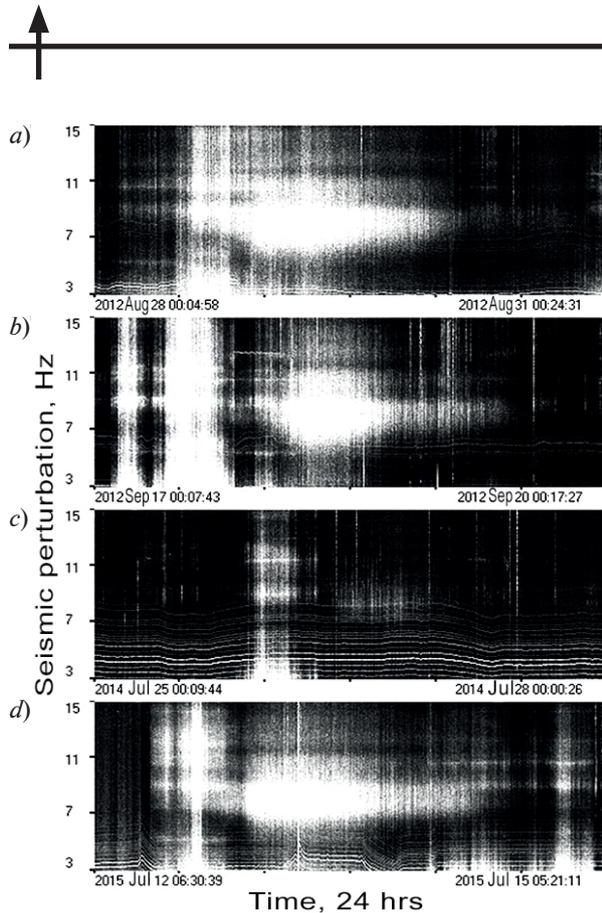


Рис. 2. Спектрограммы (динамика сейсмоакустических возмущений) диапазона «голос моря», полученные с помощью берегового лазерного деформографа, для тайфунов В (a), S (b), М (c), Ch (d) (см. таблицу)

ния с центральными частотами около 5,3, 9,1 и 10,7 Гц. «Глаз» тайфуна находится в Желтом море и выходит на Корейский полуостров. На мысе Шульца регистрируется южный/юго-западный ветер со скоростью 1 – 2 м/с.

После появления шума его диапазон постепенно расширяется до значений 1,0–4,5 Гц, с ростом уровней сигналов, и достигает своего максимума в 14:53 (28 августа). Наблюдается усиление колебаний с центральными частотами 9,1 и 10,7 Гц. Тайфун выходит на Приморский край (Россия); его мощный хвост теперь расположен на севере Желтого моря; разреженные же хвосты тайфуна расположены над Японским морем. На мысе Шульца ветер сменяется на юго-восточный, приобретая скорость 14 – 16 м/с.

До 19:26 28 августа уровень шума в диапазоне 1,0 – 4,5 Гц сохраняется постоянным. Но теперь происходит периодическое

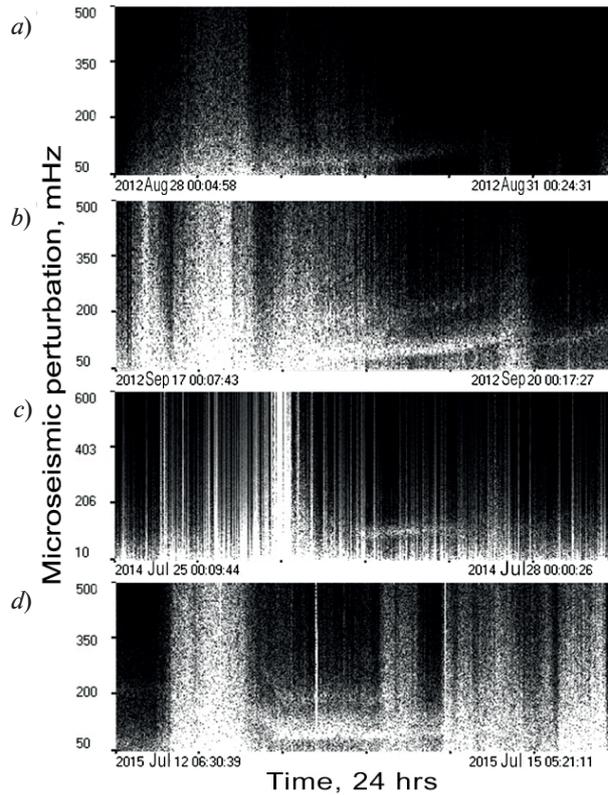


Рис. 3. Спектрограммы (зависимости колебаний морского волнения от времени) диапазона микросейсм, вызванных воздействием на дно морских ветровых волн и волн зыби, полученные с помощью берегового лазерного деформографа, для тайфунов В (a), S (b), М (c) и Ch (d) (см. таблицу)

усиление-ослабление интенсивности сигналов с теми же центральными частотами (9,1 и 10,7 Гц). Основная же, центральная часть тайфуна почти ушла из Приморского края на территории Китая и Хабаровского края. Остается лишь небольшой хвост тайфуна на юге Приморского края и северо-востоке Японского моря. На мысе Шульца регистрируется юго-восточный ветер со скоростью 16 – 18 м/с.

До 22:10 28 августа уровень шума падает, его частотный диапазон 1,0 – 4,5 Гц сужается обратно к значениям 1,0 – 2,5 Гц. Падает уровень колебаний с центральными частотами 9,1 и 10,7 Гц, однако возникают мощные колебания в частотном диапазоне 6,5 – 9,3 Гц с центральной частотой порядка 8,0 Гц (в дальнейшем мы будем их называть микросейсмами «голоса моря»). Север Приморского края, Китай и Хабаровский край находятся под действием тайфуна. Хвосты тайфуна оказываются на

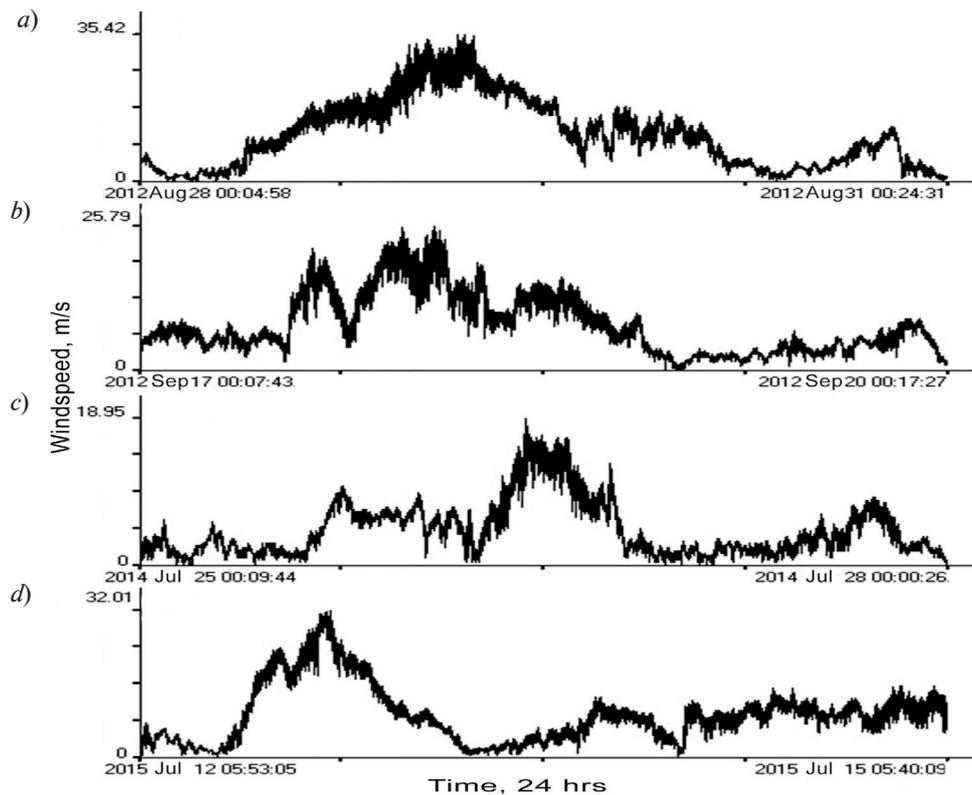


Рис. 4. Изменение скорости ветра в зависимости от времени. Экспериментальные данные получены на метеостанции для тайфунов В (a), S (b), М (c) и Ch (d) (см. таблицу)

востоке и северо-востоке Японского моря. Но через Корейский полуостров в Японское море проникает мощный передний фронт очередного тайфуна, «глаз» которого находится над Тайванем. На мысе Шульца дует юго-восточный ветер со скоростью 20 – 25 м/с.

Наибольший размах по частотному диапазону микросейсмы голоса моря достигли в 06:00 29 августа (6,5 – 9,5 Гц, белое ядро). В это время тайфун бушует над Китаем, Монголией, Хабаровским краем. Приморский же край почти целиком оказывается вне зоны его действия. Небольшие хвосты тайфуна наблюдаются у берегов Японии и на севере Японского моря. На мысе Шульца регистрируется максимальный юго-восточный ветер со скоростью 33 м/с.

29 августа в 18:00 не наблюдается основного ядра микросейсма голоса моря. Приморский край находится вне зоны тайфуна; то же для Японского моря. На юге же Желтого моря наблюдается глаз нового тайфуна, передний фронт которого проходит над Корейским полуостровом. На мысе Шульца дует западный ветер со скоростью 8 – 10 м/с.

В диапазоне 1,0 – 2,5 Гц низкочастотный шум не регистрируется. Интенсивность колебаний в диапазоне 6,5 – 9,3 Гц падает со временем, их частотный диапазон также сужается до значений 7,5 – 8,5 Гц. К моменту 23:30 30 августа указанные колебания затухают почти полностью. Тайфун находится в Охотском море. На мысе Шульца дует северо-западный ветер со скоростью 2 – 4 м/с.

Лазерный деформограф уверенно регистрировал первичные и вторичные микросейсмы. Первичные микросейсмы с периодом около 12 с начали регистрироваться прибором примерно с 23:00 28 августа, далее их период постепенно уменьшался до 5 с (20:30 30 августа). Вторичные микросейсмы с периодом около 6 с уверенно регистрировались лазерным деформографом примерно в то же время (23:00 28 августа). Период и интенсивность вторичных микросейсм постепенно снижались, и их регистрация практически прекращалась с 00:30 30 августа. До этого момента их период составлял около 4 с, тогда как период первичных микросейсм был равен примерно 8 с.



Таким образом, момент возникновения мощных колебаний в частотном диапазоне 6,5 – 9,3 Гц почти совпадает со временем прихода мощных первичных микросейсм. Период и мощность первичных микросейсм снижаются и едва регистрируются прибором уже в 20:30 30 августа. Несколько позже (23:30) практически не регистрируются колебания в диапазоне 7,5 – 8,5 Гц. Следует отметить, что диапазон скорости местного ветра за этот же период наблюдений (28 августа 22:10 – 30 августа 23:30), т.е. за период возникновения и исчезновения микросейсм голоса моря, возрастает от 20 – 25 до 32 – 33 м/с, а затем постепенно падает до 2 – 4 м/с. При этом 29 августа в 6:00 наблюдается наибольший размах микросейсм голоса моря по частотному диапазону. В этот же период наблюдений в районе мыса Шульца регистрируются только хвосты тайфуна.

Тайфун Санба (S). 17 сентября в 02:20 усиливается шум, что приводит к возрастанию всех спектральных компонент и расширению отдельных частотных диапазонов. Так, диапазон от 1,0 – 2,5 Гц постепенно расширяется до диапазона 1,0 – 4,5 Гц. Наблюдаются колебания в узких частотных диапазонах с центральными частотами 9,1, 10,7 и 11,3 Гц. В 11:00 того же дня глаз тайфуна вышел на юг Корейского полуострова. Передний фронт тайфуна занимает весь Корейский полуостров, Приморский край, север и северо-запад Японского моря, остров Сахалин, Охотское море с выходом на Камчатку. При падении уровня шума интенсивность данных возмущений падает и почти пропадает 17 сентября в 07:15. В 07:00 глаз тайфуна выходит на север Корейского полуострова. На мысе Шульца регистрируется северо-восточный ветер со скоростью 6 – 8 м/с (2:20).

17 сентября в 08:20 появляется шум с центральной частотой 5,3 Гц. Глаз тайфуна локализуется на шельфе Японского моря, у побережья Южной Кореи. Передний фронт тайфуна покрывает Приморский край, остров Сахалин, Охотское море, Камчатку, северную и западную части Японского моря. На мысе Шульца дует северо-восточный ветер со скоростью 5–6 м/с.

17 сентября 20:00 основная область тайфуна перемещается на Хабаровский край, Китай, Монголию, север и центральную часть Приморского края. Глаз тайфуна покинул юг Приморского края. В центре Японского моря наблюдается хвост тай-

фуна; на шельфе Корейского полуострова остается только его небольшой хвост. На мысе Шульца поднимается северо-восточный ветер со скоростью 13 – 16 м/с.

17 сентября в 22:35 возникают шум в диапазоне 1,0 – 4,5 Гц и колебания в узких полосах с центральными частотами 5,3, 9,1 и 10,7 Гц. Слабо проявляются колебания с центральной частотой 11,3 Гц. Тайфун «освободил» почти весь Приморский край. Глаз тайфуна расположился на Сахалине. В центре Японского моря находится его хвост, и небольшой хвост наблюдается у побережья Корейского полуострова. На мысе Шульца бушует северо-восточный ветер со скоростью 20 – 23 м/с.

18 сентября, примерно в 00:10, возникают микросейсм голоса моря; частотный диапазон в его максимуме регистрируется в диапазоне от 6,0 до 9,5 Гц с центральной (по интенсивности) частотой 8 Гц. Колебания микросейсм голоса моря сильно затухают к 18:00 18 сентября и слабо прослеживаются до 10:00 19 сентября (их центральная частота составляет около 8,5 Гц). Местоположения глаза тайфуна и его переднего фронта почти не изменяются, а его хвост находится в центре Японского моря. При этом вдоль побережья Корейского полуострова с выходом на мыс Шульца простирается слабый хвост тайфуна. В Желтом море наблюдается небольшая атмосферная депрессия, которая через север Корейского полуострова достигает юга Приморского края. На мысе Шульца бушует северо-восточный ветер со скоростью 18 – 21 м/с (00:10), а затем дует северо-западный, со скоростью 6 – 9 м/с (18 сентября, 18:00) и северный, со скоростью 3 – 4 м/с (19 сентября, 10:00).

18 сентября в 18:00 снижается интенсивность центральной части микросейсм голоса моря. Хвост тайфуна покрывает север Корейского полуострова, южные берега Приморского края, Японское море вблизи Кореи; в дальнейшем этот хвост распадается, образуя вихрь. Через остров Хоккайдо на север и затем на остров Сахалин распространяется передний фронт нового тайфуна.

19 сентября в 10:00 микросейсм голоса моря практически не регистрируются.

17 сентября, примерно в 23:30, возникают мощные первичные микросейсм с периодом около 12 с и вторичные микросейсм с периодом около 6 с. Затем их период уменьшается. Примерно в 03:50 19 сентября на записи лазерного деформографа плохо

прослеживались вторичные микросейсмы. При этом их период упал до 4,2 с, а период первичных микросейсм в это время составил примерно 8,5 с. Амплитуда первичных микросейсм сильно уменьшилась на записи лазерного деформографа в 07:30 19 сентября. При этом их период стал равным около 7,5 с.

Таким образом, время возникновения микросейсм голоса моря (18 сентября 00:10) почти совпало со временем прихода первичных микросейсм с максимальным периодом 12 с (17 сентября 23:30). Вторичные микросейсмы характеризуются максимальным периодом в 6 с. На мысе Шульца скорость ветра составила около 18 – 21 м/с. Микросейсмы голоса моря сильно затухают к 18:00 18 сентября. Скорость ветра к этому времени падает до 6 – 9 м/с. Окончательно затухают микросейсмы голоса моря к 10:00 19 сентября. На мысе Шульца скорость ветра падает до 2 – 3 м/с. К 7:30 19 сентября частота первичных микросейсм понижается до 7,5 Гц, и они плохо прослеживаются. Вторичные микросейсмы не наблюдаются.

Тайфун Матмо (М). На спектрограммах инфразвуковых возмущений, генерируемых этим тайфуном, мы наблюдаем самые слабые проявления исследуемых сигналов в низкочастотном диапазоне, которые начали развиваться 26 июля 2014 года около 10:00 и имели примерно одинаковую интенсивность в течение всего временного промежутка его проявления. Центр тайфуна в этот период находился в Японском море ближе к острову Хоккайдо на широте 45° с.ш. Пиковая частота составляла 7,8 Гц. Полное затухание возмущений произошло 26 июля в 23:00.

Тайфун Чан-Хом (Ch). 11 июля, в 15:00, возникает шум в диапазоне 1,0 – 2,5 Гц. Глаз тайфуна находится на юге Желтого моря, его передний фронт занимает Корейский полуостров и выходит на юг Приморского края. На мысе Шульца дует южный ветер со скоростью 6–8 м/с.

12 июля, в 14:00, шум в диапазоне 1,0–2,5 Гц усиливается и расширяется до диапазона 1,0 – 4,5 Гц. Глаз тайфуна покрывает север Корейского полуострова, а его передний фронт (вихрь) простирается от севера Желтого моря до Китайской народной республики, Хабаровского и Приморского краев, центра Японского моря и через южные острова Японии проходит в Тихий океан. На мысе Шульца

дует юго-восточный ветер со скоростью 10 – 12 м/с.

12 июля, в 14:30, продолжается шум в частотном диапазоне 1,0 – 4,5 Гц. Возникают колебания с центральными частотами 5,3, 9,1 и 10,7 Гц. На мысе Шульца усиливается юго-восточный ветер до скорости 15 – 19 м/с.

12 июля, в 17:20, глаз тайфуна находится на юге Приморского края. Японское море вдоль побережья Корейского полуострова не затрагивается тайфуном. На мысе Шульца бушует юго-восточный ветер со скоростью 17 – 20 м/с.

13 июля, в 02:50, возникают мощные микросейсмы голоса моря в частотном диапазоне от 7 до 9 Гц (других колебаний не наблюдается). Далее частотный диапазон микросейсм голоса моря быстро расширяется до диапазона 6 – 11 Гц (13 июля, 06:00). 14 июля, в 10:00, частотный диапазон микросейсм голоса моря сужается до 7 – 9 Гц и исчезает в 10:00. Глаз тайфуна расположен на севере Приморского края, тогда как центр, юг и запад Японского моря находятся вне зоны тайфуна. Хвост тайфуна простирается по дуге Желтое море – Корейский полуостров – центр Приморского края – восточная часть Японского моря – Японские острова и уходит на юг в Тихий океан. На мысе Шульца дует юго-восточный ветер со скоростью 9 – 11 м/с.

14 июля, в 04:20, возникают слабые сигналы с центральными частотами 9,1 и 10,7 Гц. Хвост тайфуна расположен на севере Приморского края, тогда как юг Приморского края лежит вне зоны тайфуна. На мысе Шульца дует северо-западный ветер со скоростью 9 – 11 м/с.

14 июля, в 23:18, окончательно пропадает слабый фон микросейсм голоса моря. Тайфун покинул Приморский край и Японское море. Вдоль Корейского полуострова, в Японском море, простирается незначительная атмосферная депрессия. На мысе Шульца регистрируется северо-восточный ветер со скоростью 8 – 11 м/с.

15 июля, в 03:45, пропадают сигналы с центральными частотами 9,1 и 10,7 Гц, однако время от времени сигналы с центральными частотами 9,1 Гц появляются вновь. Атмосферная ситуация остается практически неизменной. На мысе Шульца дует северо-восточный ветер со скоростью 10 – 14 м/с.

13 июля, примерно в 03:00, с помощью лазерного деформографа регистрируются



первичные микросейсмы с периодом около 7,2 с и вторичные с периодом около 3,7 с. Их периоды постепенно растут со временем, и 13 июля, примерно в 05:30, эти значения составляют, соответственно, 10,5 и 5,3 с. Они уверенно регистрируются деформографом, и их периоды остаются неизменными до 20:00 13 июля. Затем в шумах исчезают вторичные микросейсмы, а первичные с периодом около 10 с прослеживаются до 04:30 14 июля. К этому времени их период немного снижается до 9,3 с.

Таким образом, время возникновения микросейсм голоса моря (13 июля 02:50) почти совпадает со временем прихода первичных микросейсм с максимальным периодом 7,2 с (13 июля 03:00). Вторичные микросейсмы характеризуются периодом 3,7 с. На мысе Шульца скорость ветра составляет примерно 9 – 11 м/с. Далее частотный диапазон микросейсм голоса моря быстро расширяется до 6 – 11 Гц (13 июля, 06:00), что связано с ростом периодов первичных и вторичных микросейсм. Периоды этих микросейсм к 05:30 13 июля, достигли значений 10,5 и 5,3 с, соответственно. Вторичные микросейсмы не регистрируются уже примерно в 20:00 13 июля. Первичные микросейсмы уверенно

регистрируются лазерным деформографом до 04:30 14 июля. Микросейсмы голоса моря пропадают примерно в 10:00 14 июля.

Заключение

Анализ информации, полученной нами для каждого тайфуна, а также снимков с японского спутника Himawari-8 позволил нам сформулировать следующие выводы.

Время регистрации микросейсм голоса моря лазерным деформографом почти точно (с учетом сложности визуального определения по спектрограммам) совпадает со временем регистрации первичных и вторичных микросейсм этим же прибором.

Исчезновение микросейсм голоса моря коррелирует с исчезновением первичных микросейсм и плохо коррелирует с исчезновением вторичных микросейсм.

Момент максимального значения скорости ветра не всегда совпадает во времени с достижением максимума микросейсм голоса моря.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-80011_Опасные явления) и программы «Дальний Восток».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шулейкин В.В. О голосе моря // Доклады Академии наук СССР. 1935. Т. 3. № 8. С. 259–263.
2. Garces M., Aucan J., Fee D., Caron P., Merrifield M., Gibson R., Bhattacharyya J., Shah S. Infrasound from large surf // *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33. L05611. Pp. 1–4.
3. Перепёлкин В.Г., Куличков С.Н., Чунчужов И.П., Репина И.А. Об опыте регистрации «голоса моря» в акватории Черного моря // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51. № 6. С. 716–728.
4. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Ovcharenko V.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Experimental estimate of a relation between sea wave energies and the Earth's crust microdeformations // *Acta Geophysica.* 2017. Vol. 55. No. 4. Pp. 607–618.
5. Longuet-Higgins M.S. A theory of the origin of microseism // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Ser. A. Mathematical and Physical Sciences.* 1950. Vol. 243. No. 857 Pp. 1–35.
6. Benioff H., Gutenberg B. Waves and currents recorded by electromagnetic barographs // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1939. Vol. 20. No. 10. Pp. 421–426.
7. Posmentier E.S. A theory of microbaroms // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1967. Vol. 13. Pp. 487–501.
8. Бреховских Л.М., Гончаров В.В., Куртепов В.М., Наугольных К.А. К вопросу об излучении инфразвука в атмосферу поверхностными волнами в океане // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1973. Т. 9. № 9. С. 899–907.
9. Waxler R., Gilbert K.E. The radiation of atmospheric microbaroms by ocean waves // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. Vol. 119. No. 5. Pp. 2651–2664.
10. Donn W.L., Naini B. Sea wave origin of microbaroms and microseisms // *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78. No. 21. Pp. 4482–4488.
11. Долгих Г.И., Гусев Е.С., Чупин В.А. Деформационные проявления «голоса моря» // Доклады Академии наук. 2018. Т. 148. № 1.

С. 95–98.

12. Данные Японского метеорологического агентства о движении тропических циклонов за 2010 – 2018. http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack_viewer_2010s.html.

13. Himawari 8. Data Archive. GMS/GOES9/MTSAT Data Archive for Research and Education.

<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/archive-e.html>.

14. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. Владивосток: Дальнаука, 2016. 352 с.

15. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.

Статья поступила в редакцию 14.11.2018, принята к публикации 28.11.2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧУПИН Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Российская Федерация. 690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
chupin@poi.dvo.ru

ДОЛГИХ Григорий Иванович – доктор физико-математических наук, заведующий отделом Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Российская Федерация. 690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
dolgikh@poi.dvo.ru

ГУСЕВ Егор Сергеевич – инженер Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Российская Федерация. 690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
gusev.e.s.95@gmail.com

REFERENCES

[1] V.V. Shuleykin, O golose morya [On the voice of the sea], Doklady of the USSR Academy of Sciences. 3 (8) (1935) 259–263.

[2] M. Garces, J. Aucan, D. Fee, et al., Infrasound from large surf, Geophys. Res. Lett. 33 (2006) L05611(1–4).

[3] V.G. Perepelkin, S.N. Kulichkov, I.P. Chunchuzov, I.A. Repina, On experience in recording the voice of the sea in the water area of the Black Sea, Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 51 (6) (2015) 716–728.

[4] G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh, S.N. Kovalev, et al., Experimental estimate of a relation between sea wave energies and the Earth’s crust microdeformations, Acta Geophysica. 55 (4) (2017) 607–618.

[5] M.S. Longuet-Higgin, A theory of the origin of microseism, Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A: Math. Phys. Sci. 243 (857) (1950) 1–35.

[6] H. Benioff, B. Gutenberg, Waves and currents recorded by electromagnetic barographs, Bull. Am. Meteorol. Soc. 20(10) (1939) 421–426.

[7] E.S. Posmentier, A theory of microbaroms, Geophys. J. R. Astron. Soc. 13 (1967) 487–501.

[8] L.M. Brekhovskikh, V.V. Goncharov, V.M. Kurtepov, K.A. Naugolnykh, The radiation of infrasound into the atmosphere by surface waves in the ocean, Izv. Acad. Sci. USSR, Atmos. Oceanic Phys. 9(9) (1973) 899–907.

[9] R. Waxler, K.E. Gilbert, The radiation of atmospheric microbaroms by ocean waves, J. Acoust. Soc. Am. 119 (5) (2006) 2651–2664.

[10] W.L. Donn, B. Naini, Sea wave origin of microbaroms and microseisms, J. Geophys. Res. 78 (21) (1973) 4482–4488.

[11] G.I. Dolgikh, E.S. Gusev, V.A. Chupin, The nature of the “Voice of the sea”, Doklady Earth Sciences. 481 (1) (2018) 912–915.

[12] Data of the Japan meteorological agency on the movement of tropical cyclones for 2010–2018, URL: http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack_viewer_2010s.html.

[13] Himawari 8 Data Archive, GMS/



GOES9/MTSAT Data Archive for Research and Education, URL: <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/archive-e.html>.

[14] **G.I. Dolgikh, V.E. Privalov**, Lazernaya fizika. Fundamentalnyye i prikladnyye issledovaniya [Laser physics. Fundamental

and applied research], Dalnauka, Vladivostok (2016).

[15] **G.I. Dolgikh, S.N. Kovalev, I.A. Koren, V.V. Ovcharenko**, A two-coordinate laser strainmeter, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 34 (11) (1998) 946–950.

Received 14.11.2018, accepted 28.11.2018.

THE AUTHORS

CHUPIN Vladimir A.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation
chupin@poi.dvo.ru

DOLGIKH Grigory I.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation
dolgikh@poi.dvo.ru

GUSEV Egor S.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation
gusev.e.s.95@gmail.com