

УДК 534.2

© В. А. Чупин*, 2023

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Приморский край, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

*chupin@poi.dvo.ru

МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ КАК ИНДИКАТОР ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Статья поступила в редакцию 09.03.2023, после доработки 23.06.2023, принята в печать 30.08.2023

Аннотация

Представлены результаты регистрации микросейсмических колебаний в диапазоне частот инфразвуковых волн, выполненные в периоды активного влияния тропических циклонов на акваторию Японского моря. Данные получены береговым лазерно-интерференционным измерительным комплексом, состоящим из двухкоординатного лазерного деформографа и лазерного нанобарографа. На конкретном примере с использованием данных дистанционного зондирования показано слишком раннее прекращение сопровождения тайфуна мировыми метеорологическими агентствами при том, что циклон сохраняет свою вихревую структуру и энергетические характеристики. Показана динамика изменения характеристик инфразвуковых микросейсмических колебаний, которые зависят от траектории перемещения тайфунов и длительности их воздействия на акваторию моря. Приведены обобщенные результаты по некоторым группам тайфунов, имеющих похожие траектории перемещения, в результате чего максимальные амплитуды микросейсмических инфразвуковых колебаний проявляются на разных частотах. При прохождении в 2022 году тайфуна 5-й категории вблизи измерительного полигона был зарегистрирован микросейсмический сигнал, формирующийся при взаимодействии атмосферного вихря в тыловой части циклона с полем волн зыби. В результате регистрации наземными дистанционными методами определенных характеристик микросейсмических сигналов генерирующихся при прохождении тайфунов возможно использовать информацию для определения параметров перемещения тропических циклонов.

Ключевые слова: микросейсмические колебания, микросейсм, тропические циклоны, тайфуны, лазерный деформограф

© V. A. Chupin*, 2023

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch RAS, 690041, Vladivostok, Baltijskaya Street, 43, Russia
*chupin@poi.dvo.ru

MICROSEISMIC OSCILLATIONS AS AN INDICATOR OF TROPICAL CYCLONES

Received 09.03.2023, Revised 23.06.2023, Accepted 30.08.2023

Abstract

The paper presents the results of recording microseismic oscillations in the frequency range of infrasonic waves performed during the periods of active influence of tropical cyclones on the water area of the Sea of Japan. The data were obtained by a coastal laser-interference measuring complex consisting of a two-axis laser strainmeter and a laser nanobarograph. A case study using remote sensing data shows that the world meteorological agencies stopped tracking the typhoon too early, while the cyclone retains its vortex structure and energy characteristics. The dynamics of changes in the characteristics of infrasound microseismic oscillations, which depend on the trajectory of typhoons and the duration of their impact on the sea area, is shown. Generalised results are given for some groups of typhoons having similar trajectories of movement, as a result of which the maximum amplitudes of microseismic infrasonic oscillations are manifested at different frequencies. During the passage of a category 5 typhoon in 2022, a microseismic signal formed by the interaction of the atmospheric vortex in the rear part of the cyclone with the field of quicksand waves was registered near the measuring site. As a result of registration by ground-based remote sensing methods of certain characteristics of microseismic signals generated during the passage of typhoons, it is possible to use the information to determine the parameters of tropical cyclone movement.

Keywords: microseismic oscillations, microseisms, tropical cyclones, typhoons, laser strainmeter

Ссылка для цитирования: Чупин В.А. Микросейсмические колебания как индикатор тропических циклонов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 3. С. 9–17. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-1

For citation: Chupin V.A. Microseismic Oscillations as an Indicator of Tropical Cyclones. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 3, 9–17. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-1

1. Введение

На планете Земля происходит множество разнообразных катастрофических явлений, ежегодно наносящих значительный экономический ущерб. В число таких явлений входят тропические циклоны (тайфуны), зарождающиеся вблизи теплых экваториальных вод и перемещающиеся в северную часть земного шара, охватывая в зависимости от траектории своего движения различные населенные островные и материковые территории. Исследования разномасштабных процессов, возникающих в результате взаимодействия мощных циклонических вихрей с поверхностью Земли, связан с интересом уменьшения вероятного воздействия тайфунов через физические процессы.

Впервые мощные микросейсмические инфразвуковые колебания в диапазоне частот 7–9 Гц, зарегистрированные береговыми лазерными деформографами, были выявлены в 2018 году при исследовании архивных данных вариаций микродеформаций земной коры [1]. Данные микросейсмические колебания регистрировались в период перемещения тайфуна Лайонрок в северной и северо-восточной частях акватории Японского моря. При исследовании научных источников было обнаружено незначительное количество исследований подобных сигналов. Это исследования сигналов, генерируемых в атмосфере. Первая информация о регистрации атмосферных колебаний в данном диапазоне частот появилась в первой половине XX века. Регистрация колебаний происходила на судне во время сильного шторма и его открытие носило случайный характер [2]. Новое явление генерации инфразвука назвали «голос моря», а в публикациях на английском языке данное явление и все остальные с более низкими частотами получило название микробаромы (microbaroms) [3]. Такие исследования в основном проводят с применением точечных микробарографов или их комплексом с измерением сигналов, распространяющихся в атмосфере [4, 5]. Исследования процессов генерации сигнала «голос моря» в основном носили теоретический характер, и в теорию генерации сигнала «голос моря» был положено несколько разных механизмов его генерации [6, 7]. Эти теории описывают несколько различающихся процессов генерации инфразвуковых колебаний. Их генерация может происходить в результате взаимодействия ветрового потока с движущимися гребнями морских волн, появления ветровых волн различного направления в области действия циклонического вихря и возникновения области стоячих волн. Одно из более ранних исследований показало, что область генерации инфразвуковых колебаний должна относиться преимущественно к тыльной части циклона и не связана с центральной областью циклона [8]. При обработке натурных данных микродеформаций земной коры, полученных лазерными деформографами за прошлое десятилетие, этот факт был подтвержден [9]. Также по результатам обработки многочисленных архивных данных, полученных лазерными деформографами, было выяснено, что диапазон частот, в котором проявляются данные инфразвуковые колебания, может находиться в достаточно широком диапазоне, занимающем полосу от 6 до 12 Гц. Изучение таких областей контактными методами практически невозможно, поскольку они генерируются высокоэнергетическими циклоническими вихрями, перемещающимися в открытом море. Экспериментальный же метод регистрации инфразвуковых сигналов разнонаправленными устройствами, измеряющими различные сейсмические колебания, получил хорошее подтверждение. Следовательно, метод бесконтактного дистанционного зондирования, основанный на применении лазерных деформографов, является дополнительным источником получения знаний об инфразвуковых процессах.

После регистрации микросейсмических колебаний «голос моря» было сделано предположение, что подобные инфразвуковые сигналы могут генерироваться в периоды прохождения других тайфунов в акватории Японского моря. Исследования другие периоды влияния тайфунов позволит в дальнейшем получить новые данные о передвижении циклонических вихрей и прогнозирования областей, опасных для мореплавания. При исследовании обширной базы данных микродеформаций земной коры на юге Приморского края за последние 20 лет, проведен анализ присутствия инфразвуковых сигналов в периоды прохождения крупнейших тайфунов в акватории Японского моря, область влияния которых либо непосредственно распространялась на территорию Приморского края, либо носила косвенный характер воздействия, перемещаясь вблизи дальневосточного побережья. Было обнаружено, что в периоды перемещения тайфунов в Японском море береговые лазерные деформографы регистрируют микросейсмические инфразвуковые колебаний в диапазоне частот в разных случаях от 5 до 12 Гц и имеющих отличающуюся амплитудно-частотную характеристику. Детальный анализ периодов генерации инфразвуковых колебаний «голос моря» двухкоординатным береговым лазерным, составляющим в некоторых случаях более двух суток, позволил выявить зависимости изменения направления от источника прихода сигнала и исследовать перемещение области генерации относительно измерительного комплекса. При этом была показана возможность определения зон генерации микросейсм «голоса моря» в Японском море [10]. Эти исследования показали, что зоны генерации этих микросейсм находятся в областях генерации первичных микросейсм, расположенных вблизи прибойной зоны.

Далее покажем некоторые особенности проявления микросейсмических колебаний «голос моря» при влиянии тайфунов в Японском море.

2. Лазерно-интерференционный измерительный комплекс

В Приморском крае Российской Федерации несколько десятилетий непрерывно работает уникальный лазерно-интерференционный комплекс, выполняющий высокоточные измерения вариаций атмосферного давления и геофизических деформационных процессов [11]. Измерительный комплекс включает в состав лазерный нанобарограф и двухкоординатный береговой лазерный деформограф. Синхронная работа измерительных систем, регистрирующих колебательные процессы в соседних геосферах в диапазоне частот условно от 0 Гц и выше, позволяет найти и определить источники возбуждения этих процессов.

Лазерный нанобарограф был создан для исследований взаимосвязи между процессами в атмосфере, литосфере и гидросфере. В качестве датчика-измерителя атмосферного давления был использован блок анероидных коробок, применяемый в обычных стрелочных барометрических приборах. Однако для регистрации перемещения незакрепленного конца блока, с целью увеличения чувствительности, использовались лазерно-интерференционные методы.

Точность измерения вариаций атмосферного давления составляет величину, примерно равную 50 мкПа. Фоновые сейсмоакустические шумы не влияют на измеряемые параметры вариаций атмосферного давления лазерно-интерференционным нанобарографом. Его применение позволяет исключать процессы баро-деформационного взаимодействия при обработке данных лазерного деформографа.

Двухкоординатный лазерный деформограф является основным сейсмическим измерительным инструментом комплекса для изучения процессов микродеформаций земной коры. Прибор может в любом частотном диапазоне регистрировать колебательные процессы, распространяющиеся в верхнем слое земной коры за счет неограниченного динамического диапазона. Двухкоординатный лазерный деформограф в свою очередь состоит из двух измерительных компонент с длинами измерительных плеч 52,5 метров и 17,5 метров. Составляющие измерительные компоненты установлены в подземных помещениях, максимально изолированных от атмосферного воздействия. Они расположены под углом 92° друг к другу и позволяют в определенных случаях применять их для исследования области прихода полезного сигнала с помощью метода амплитудной модуляции этого сигнала на разнонаправленных компонентах лазерного деформографа.

3. Регистрация и анализ микросейсмических колебаний «голос моря»

Траектории тайфунов в точности не повторяются. По траектории перемещения тайфуны делятся на две группы. Первая группа уходит на материк и над ним заполняется. Вторая группа тайфунов относится к большинству тропических циклонов, возникающих в Тихом океане, имеющих обратную ветвь перемещения, обладающей параболическими характеристиками. Часть тайфунов, достигая материка не заполняются, а поворачивают на северо-восток и перемещаются к берегам Японии или пересекают Корейский полуостров, при этом активно воздействуя на акваторию Японского моря. При этом после пересечения циклоническими вихрями продолжительного участка суши, будь это материковая часть Китая при перемещении тайфуна Чабя в июне-июле 2022 г. или территория Корейского полуострова (тайфуны Данас, 2019 г., Чан-Хом 2015 г.), потерявший силу тропический циклон вновь набирает силу в результате подпитки значительно нагревающимися в летний период поверхностями морей северо-западной части Тихого океана. При этом ведущие метеорологические агентства перестают определять тропический циклон как тайфун, переводя его в разряд тропического циклона до ураганной силы и не принимая во внимание его увеличивающуюся мощность даже на кратковременный период времени.

Покажем это на примере прохождения тайфуна Чан-Хом в период с 13 июля 2015 г. Метеорологические агентства прекратили сопровождение тайфуна Чан-Хом в 00:00 13 июля 2015 г. переводя его в разряд внетропического циклона. На рис. 1 приведена траектория перемещения тайфуна Чан-Хом до перевода его в разряд тропической депрессии.

Хотя при входе тайфуна на Корейский полуостров тайфун Чан-Хом и начал терять свою энергию, тем не менее еще находясь над акваторией Желтого моря уже появилось первое влияние его восточным крылом на акваторию Японского моря. На основании метеорологических баз данных GFS и WAVEWATCH III глобальных систем прогноза погоды можно восстановить перемещение области циклона в районе Японского моря с целью отслеживания изменения инфразвукового сигнала, регистрируемого лазерным деформографом, связанного с этим перемещением.



Рис. 1. Траектория перемещения тайфуна Чан-Хом до снижения его категории до тропического шторма

Fig. 1. Trajectory of Typhoon Chan-Hom before it was downgraded to a tropical storm

Развивая тему прекращения отслеживания циклонического вихря метеоагентствами, показанного на рис. 1, покажем, что несмотря на распад структуры облачной системы вихря тайфуна, в атмосфере не прекращается перемещение воздушных масс в направлении области низкого атмосферного давления в приповерхностном слое. На рис. 2, а показан спутниковый снимок Himawari-8 [12] тайфуна Чан-Хом в то время, когда его разряд был понижен до тропической депрессии. Вихревая структура циклона на спутниковом снимке наглядно присутствует, при этом облачность в южной части циклона рассеялась. Рис. 2, б, построенный на основании метеорологических баз данных GFS и WAVEWATCH III [13], демонстрирует область сильного ветра в приповерхностной области западной и центральной частях Японского моря, продолжающаяся вплоть до южного побережья Приморского края. Красным кругом на рисунке обозначено расположение лазерно-интерференционного измерительного комплекса.

При перемещении области пониженного давления «бывшего» тайфуна в северо-восточном направлении вдоль побережья Приморского края соответственно происходит смещение области сильного ветра в том же направлении что и было зарегистрировано при исследовании возможности определения местоположения области генерации микросейсмических сигналов «голос моря» [13].

На примере этого же тайфуна приведем последовательность проявления исследуемого микросейсмического сигнала при перемещении этого тайфуна вдоль побережья Приморского края.

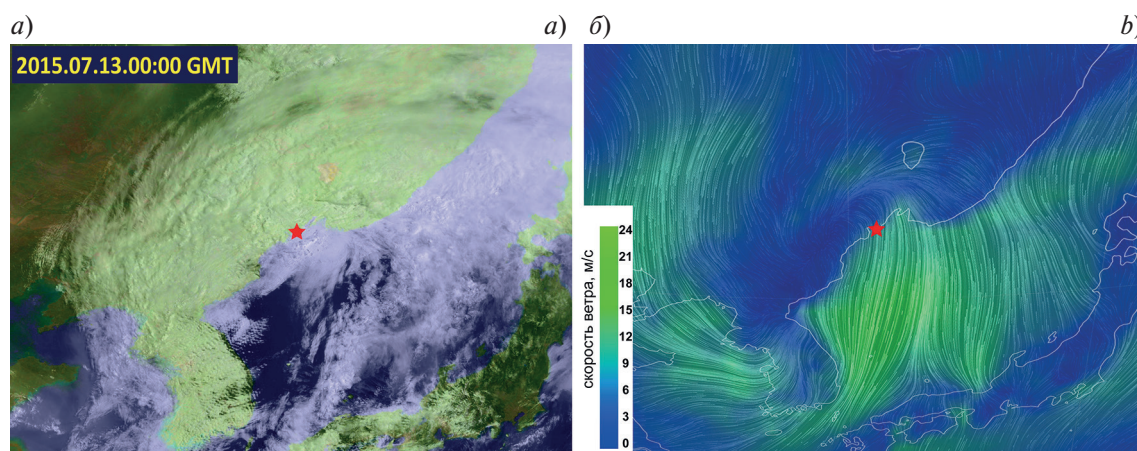


Рис. 2. Сравнение спутникового снимка облачности и поля скорости ветра в приповерхностной области атмосферы при прохождении тайфуна Чан-Хом 13 июля 2015 г.

Fig. 2. Comparison of satellite image of cloud cover and wind speed field in the near-surface region of the atmosphere during the passage of Typhoon Chan-Hom on July 13, 2015

На рис. 3 показана динамическая спектрограмма микросейсмического сигнала «голос моря» регистрировавшегося береговым лазерным деформографом в течение более чем 37 ч. Также на рисунке стрелками показаны участки сигнала, где были выделены максимальные амплитуды спектральных составляющих.

На последовательных изображениях, показанных на рис. 4, с интервалом 6 ч приведена последовательность спектров микросейсмического сигнала генерирующегося при перемещении тайфуна Чан-Хом в акватории Японского моря. Сигнал с периодичностью 6 ч был разложен на спектры с временем накопления 200 с. Цифровое обозначение каждого рисунка спектра (1–6) соответствует положению на динамической спектрограмме рис. 3.

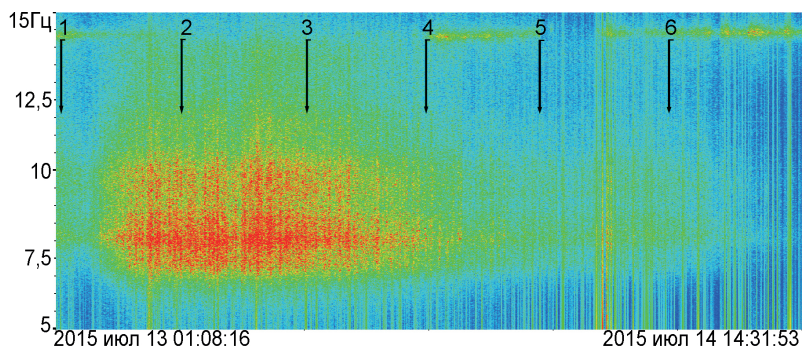


Рис. 3. Динамическая спектрограмма берегового лазерного деформографа при перемещении тайфуна Чан-Хом вблизи измерительного полигона

Fig. 3. Dynamic spectrogram of the coastal laser strainmeter as Typhoon Chan-Hom moves near the measuring range

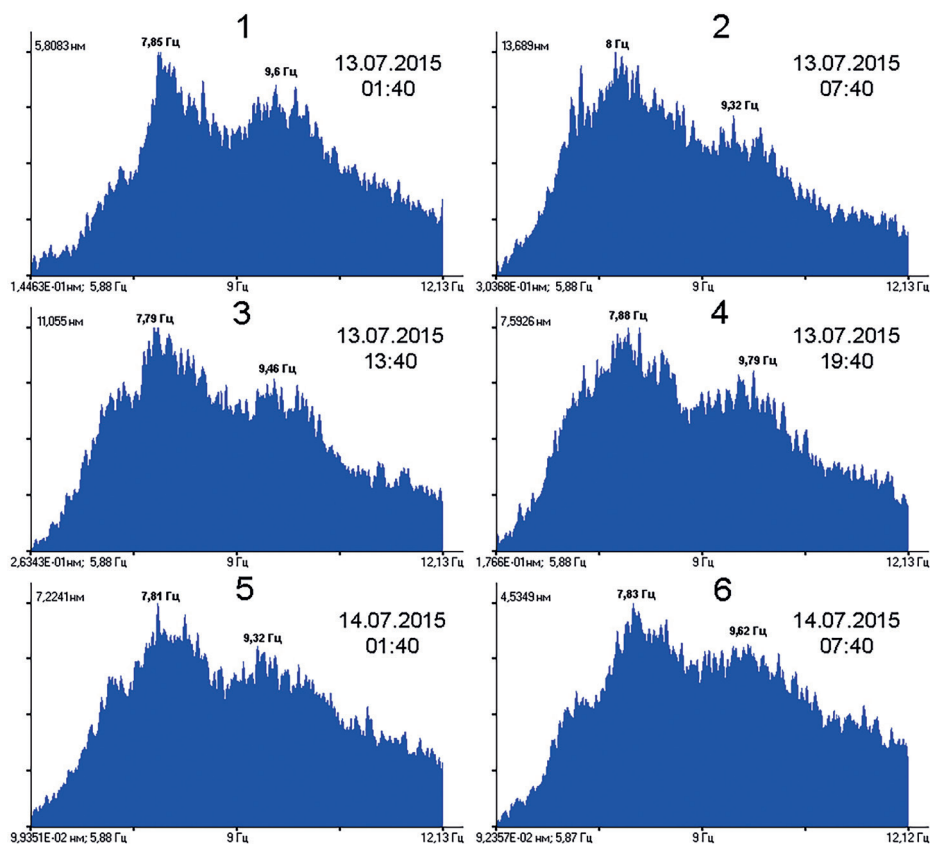


Рис. 4. Последовательные спектры сигнала лазерного деформографа в диапазоне частот «голос моря», соответствующие временным отметкам, изображенным на рис. 3

Fig. 4. Sequential spectra of the laser strainmeter signal in the “voice of the sea” frequency range corresponding to the timestamps shown in fig. 3

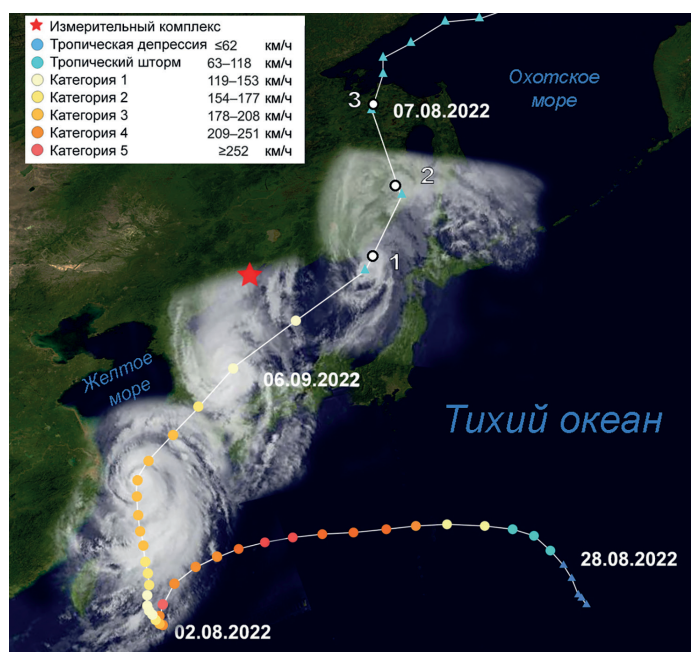
Регистрируемый сигнал находится в диапазоне от 6 до 12 Гц. При этом в спектре присутствует две области с максимальной амплитудой, особенно хорошо идентифицируемые в периоды развития и затухания сигнала. Одна область сигнала с максимальной амплитудой находится в диапазоне 7,5–8,5 Гц, а вторая область, имеющая меньшую амплитуду, находится в диапазоне 9–10 Гц. Максимальная амплитуда сигнала составила около 14 нм с максимумом на частоте 7,8 Гц.

Как показали исследования данных 2012–2022 гг., во время перемещения ряда тайфунов в акватории Японского моря, лазерными деформографами регулярно регистрировались микросейсмы «голос моря». При этом микросейсмический сигнал проявляется в достаточно широкой полосе частот и характеризуется разными частотами с максимальной амплитудой, зависящим от скорости ветра, возникающего в вихре тропического циклона, а также от траектории его перемещения.

Так, в работе [14] было показано, что ширина спектра регистрируемых микросейсмических колебаний «голос моря» может составлять от 1,5 до 4,5 Гц. При этом некоторые тайфуны, перемещающиеся в акватории Желтого моря вдоль западного побережья Корейского полуострова, выходят своим центром в материковую часть (2012, 2015 гг.). Такие циклоны, казалось бы, начинают заполняться и не должны нести значительной угрозы, но как было показано выше, над поверхностью моря возникает сильный южный ветер, направленный в область пониженного давления. Такие тропические вихри, воздействующие на акваторию Японского моря восточной частью своего вихря, вызывают микросейсмические колебания с максимальной амплитудой сигнала в районе 7,8 Гц. Тайфуны, пересекающие Корейский полуостров в его южной и центральной частях, полностью выходят в акваторию Японского моря. В таких случаях центр тропического циклона перемещается по акватории Японского моря. Такие тайфуны полностью воздействуют своей вихревой структурой на северо-западную часть Японского моря и смещаются вдоль побережья Приморского края в северо-восточном направлении (2018, 2019 гг.). Микросейсмические колебания, регистрирующиеся в период прохождения таких тайфунов, имеют максимальные амплитуды на частоте около 8,3 Гц. В этом ряду тайфунов можно выделить тайфун Санба (2012 г.). Он отклонился от северо-восточного направления и своим центром вышел в район г. Владивостока, заполнившись впоследствии в материковой части Приморского края. В этом случае в период влияния этого тайфуна на акваторию Японского моря регистрировались микросейсмические колебания с максимальной амплитудой на частоте около 8,4 Гц.

Отдельно было отмечено перемещение тайфуна Талим (2017 г.), траектория перемещения которого отличалась от группы тайфунов, рассмотренной ранее. Тайфун совершил резкий разворот еще в акватории Восточно-Китайского моря и перемещался своим центром вдоль западного побережья Японского архипелага. При этом регистрировался микросейсмический сигнал с шириной спектра около 3 Гц и максимальной амплитудой на частоте 8,8 Гц.

В 2022 году на территорию Приморского края активное влияние оказал тайфун Хиннамнор. Этот тайфун стал первым тропическим циклоном 5-й категории. При этом в течение продолжительного времени невозможно было спрогнозировать траекторию его передвижения вследствие её неустойчивости. На рис. 5



приведена траектория перемещения тайфуна Хиннамнор, совмещенная со спутниковыми изображениями в видимом диапазоне, сделанными метеорологическим спутником Himawari-8 [12].

В соответствии с имеющимися данными траектория центра тропического шторма Хиннамнор прошла через юго-восточную часть Корейского п-ова с выходом на центральную часть Японского моря. При перемещении в северо-восточном направлении по акватории Япон-

Рис. 5. Траектория тайфуна Хиннамнор, совмещенная с изображениями, сделанными спутником “Himawari-8” в видимом диапазоне

Fig. 5. Trajectory of Typhoon Hinnamnor, combined with images taken by Himawari-8 satellite in the visible range

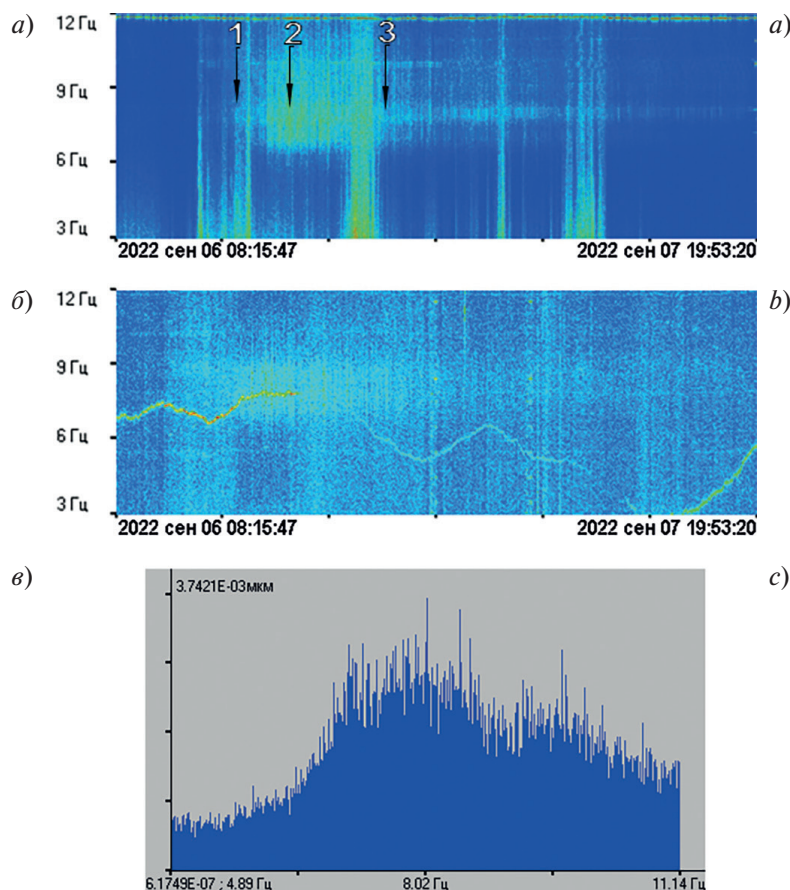


Рис. 6. Динамические спектрограммы в диапазоне инфразвуковых волн «голос моря»: *a* — лазерный деформограф «север-юг» 52,5 м; *b* — лазерный деформограф «запад-восток» 17,5 м; *в* — спектр участка записи лазерного деформографа «север-юг» в период максимального проявления сигнала в 19:00

Fig. 6. Dynamic spectrograms in infrasound wave range “voice of the sea”: *a* — laser strainmeter “north-south” 52,5 m; *b* — laser strainmeter “west-east” 17,5 m; *c* — spectrum of the recording section of the laser strainmeter “north-south” during the period of maximum signal manifestation at 19:00

ского моря менее чем за сутки он вышел к восточному побережью Приморского края, нанеся большой экономический ущерб восточной части дальневосточного региона России. При этом тайфун практически не оказал активного влияния на область расположения измерительного комплекса. На рис. 6 приведены динамические спектрограммы, полученные при обработке данных двухкоординатного лазерного деформографа. Цифрами 1–3 на рис. 5 и 6 обозначены временные отметки нахождения атмосферного центра вихря во время генерации сигнала «голос моря». В соответствии с этими обозначениями можно проследить динамику регистрируемого сигнала на стадии развития и затухания.

В начале своего развития около 17:00 06 сентября 2022 г. пиковая частота сигнала составляла 8,19 Гц. В это время тайфун уже перемещается по акватории Японского моря с местоположением центра на расстоянии 250 км от измерительного полигона. Максимального значения амплитуда сигнала достигает уже через два часа. В 19:00 лазерные деформографы регистрирует сигнал с пиковой частотой 8,02 Гц. Временем затухания сигнала можно считать период 00:00–01:00 07 сентября, до которого амплитуда сигнала постепенно уменьшалась. Максимальный уровень амплитуды регистрируемого сигнала составлял до 3 нм. Максимально зарегистрированный уровень амплитуды микросейсмического сигнала «голос моря» по результатам первого наблюдения составил 16 нм в 2016 году.

Совместный анализ рисунков показывает, что микросейсмический сигнал «голос моря» регистрируется лазерным деформографом, когда тайфун полностью находится над акваторией Японского моря и уже

начал активное влияние на восточную часть Приморского края. В тоже время в тыловой части атмосферного вихря формируется поле волн зыби, взаимодействие которого с изменяющимся направлением ветра активной тыловой части тайфуна генерирует исследуемый микросейсмический сигнал.

Как показали исследования, фон микросейсмических колебаний при влиянии тайфунов на акваторию Японского моря может иметь разные характеристики частот и амплитуды сигнала при разной общей длительности.

4. Заключение

В ходе многолетних натурных измерений с помощью берегового лазерно-интерференционного измерительного комплекса получены уникальные данные микросейсмических колебаний в диапазоне частот от 6 до 12 Гц, возникающих в результате влияния мощных тропических циклонов на акваторию Японского моря. Используя методы обработки спутниковых данных и методов прогностического моделирования, с помощью сейсмоакустического метода можно исследовать вариации характеристик микросейсмических сигналов «голос моря», а также исследовать перемещение областей их генерации по изменениям амплитуды сигналов разнонаправленных лазерных деформографов. Для сравнения с ранее полученными данными показан результат регистрации микросейсмических инфразвуковых сигналов при влиянии на регион тайфуна Хиннамор. В результате исследования характеристик микросейсмических колебаний определено, что микросейсмические колебания «голос моря» могут генерироваться в разных полосах частот, которые также могут иметь разную ширину, и разные частоты, имеющих максимальную амплитуду. Вариации этих параметров зависят от траекторий перемещения тропических циклонов и времени их воздействия на акваторию Японского моря.

Финансирование

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем «Обоснование системы климатического мониторинга дальневосточных морей и разработка методов мониторинга экстремальных погодно-климатических явлений, связанных с океаном, на основе стационарных и мобильных измерительных комплексов, а также мультисенсорного спутникового зондирования» (№ 122122300025-8) (обработка и интерпретация данных) и «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана» (№ AAAA-A20-120021990003-3) (сопровождение измерительного комплекса).

Funding

The work was supported in part by the State Assignments under Grant № 122122300025-8 «Justification of the system of climatic monitoring of the Far Eastern seas and development of methods for monitoring of extreme weather and climatic phenomena associated with the ocean, based on stationary and mobile measuring complexes, as well as multi-sensor satellite sensing» (data processing and interpretation) and “Investigation of fundamental bases of generation, development, transformation and interaction of hydroacoustic, hydrophysical and geophysical fields of the World Ocean” (AAAA-20-120021990003-3) (support of the measuring system).

Литература

1. Долгих Г.И., Гусев Е.С., Чупин В.А. Деформационные проявления «голоса моря» // Доклады академии наук. 2018. Т. 481, № 1. С. 95–98. doi:10.31857/S086956520000060–9
2. Шулейкин В.В. О голосе моря // Доклады академии наук. 1935. Т. 3, № 6. С. 259–263.
3. Benioff H., Gutenberg B. Waves and currents recorded by electromagnetic barographs // Bulletin of the American Meteorological Society. 1939. Vol. 20, No. 10. P. 421–428.
4. Stopa J.E., Cheung K.F., Garcés M.A., Badger N. Atmospheric infrasound from nonlinear wave interactions during Hurricanes Felicia and Neki of 2009 // Journal of Geophysical Research. 2012. Vol. 117. P. 12017. doi:10.1029/2012JC008257
5. Ponomarev E.A., Sorokin A.G., Tabulevich V.N. Microseisms and infrasound: a kind of remote sensing // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1998. Vol. 108. P. 339–346. doi:10.1016/S0031-9201(98)00113-7
6. Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Чунгузов 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. doi:10.7868/S0002351515050107
7. Перепелкин В.Г., Чунгузов И.П., Куличков С.Н., Попов О.Е., Репина И.А. Анализ условий возникновения «голоса моря» по данным измерений инфразвука // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 1. С. 83–97. doi:10.31857/S0002-351555183-97

8. *Semenov A.G.* On “Voice of Sea” Generation Mechanism // *International Journal of Geosciences*. 2013. Vol. 4, No. 1. C. 116–128. doi:10.4236/ijg.2013.41012
9. Долгих Г.И., Чупин В.А., Гусев Е.С., Овчаренко В.В. Пеленг зон генерации микросейсм «голоса моря» // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501, № 2. С. 226–230. doi:10.31857/S2686739721120033
10. *Dolgikh G., Chupin V., Gusev E.* Microseisms of the “Voice of the Sea” // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2020. Vol. 17, No. 5. C. 750–754. doi:10.1109/LGRS.2019.2931325
11. *Dolgikh G.I., Valentin D.I., Batyushin G.N.* et al. Seismoacoustic hydrophysical complex for monitoring the atmosphere-hydrosphere-lithosphere system // Приборы и техника эксперимента. 2002. Т. 45, № 3. Р. 120–122.
12. Himawari 8 Data Archive, GMS/GOES9/MTSAT Data Archive for Research and Education. URL: <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/archive-e.html> (дата обращения: 15.02.2023)
13. Earth: A Global Map of Wind, Weather and Ocean Conditions. [Online]. URL: <https://earth.nullschool.net> (дата обращения: 15.02.2023).
14. *Dolgikh G.I., Chupin V.A., Gusev E.S., Timoshina G.A.* Cyclonic Process of the “Voice of the Sea” microseism generation and its remote monitoring // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. P. 3452. doi:10.3390/rs13173452

References

1. *Dolgikh G.I., Gusev E.S., Chupin V.A.* The Nature of the “Voice of the Sea”. *Doklady Earth Sciences*. 2018, 481(1), 912–915. doi:10.1134/S1028334X18070048
2. *Shuleikin V.V.* On Sea Voice. *Doklady of USSR Acad. Sci.* 1935, 3, 259.
3. *Benioff H., Gutenberg B.* Waves and currents recorded by electromagnetic barographs. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1939, 20, 10, 421–428.
4. *Stopa J.E., Cheung K.F., Garcés M.A., Badger N.* Atmospheric infrasound from nonlinear wave interactions during Hurricanes Felicia and Neki of 2009. *Journal of Geophysical Research*. 2012, 117, 12017. doi:10.1029/2012JC008257
5. *Ponomaryov E.A., Sorokin A.G., Tabulevich V.N.* Microseisms and infrasound: a kind of remote sensing. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1998, 108, 339–346. doi:10.1016/S0031-9201(98)00113-7
6. *Perepelkin V.G., Kulichkov S.N., Chunchuzov I.P., Repina I.A.* On experience in recording the voice of the sea in the water area of the Black Sea. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015, 51(6), 639–650. doi:10.1134/S0001433815050102
7. *Perepelkin V.G., Chunchuzov I.P., Kulichkov S.N.* et al. Analyzing conditions for the occurrence of the voice of the sea on the basis of infrasound measurements. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019, 55(1), 73–85. doi:10.1134/S0001433819010079
8. *Semenov A.G.* On “Voice of Sea” Generation Mechanism. *International Journal of Geosciences*. 2013, 4(1), 116–128. doi:10.4236/ijg.2013.41012
9. *Dolgikh G.I., Chupin V.A., Gusev E.S., Ovcharenko V.V.* Finding the location of generation zones of “voice of the sea” microseisms. *Doklady Earth Sciences*. 2021, 501(2), 1087–1090. doi:10.1134/S1028334X21120035
10. *Dolgikh G., Chupin V., Gusev E.* Microseisms of the “Voice of the Sea”. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2020, 17, 5, 750–754. doi:10.1109/LGRS.2019.2931325
11. *Dolgikh G.I., Valentin D.I., Batyushin G.N.* et al. Seismoacoustic hydrophysical complex for monitoring the atmosphere-hydrosphere-lithosphere system. *Instruments and Experimental Techniques*. 2002, 45, 3, 401–403. doi:10.1023/A:1016031925259
12. Himawari 8Data Archive, GMS/GOES9/MTSAT Data Archive for Research and Education. URL: <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/archive-e.html> (accessed on 15.02.2023).
13. Earth: A Global Map of Wind, Weather and Ocean Conditions. [Online]. URL: <https://earth.nullschool.net> (accessed on 15.02.2023).
14. *Dolgikh G.I., Chupin V.A., Gusev E.S., Timoshina G.A.* Cyclonic Process of the “Voice of the Sea” microseism generation and its remote monitoring. *Remote Sensing*. 2021, 13, 3452. doi:10.3390/rs13173452

Об авторе

ЧУПИН Владимир Александрович, РИНЦ Author ID: 142439, ORCID ID: 0000-0001-5103-8138, Scopus Author ID: 7004931608, WoS Researcher ID: G-8803-2016, chupin@poi.dvo.ru