

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 551.465.7

DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.346

ИНФРАЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ВНЕТРОПИЧЕСКИМИ ЦИКЛОНАМИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

В.А. Чупин, Е.С. Гусев

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток,
Россия*

chupin@poi.dvo.ru

INFRASOUND OSCILLATIONS CAUSED BY EXTRATROPICAL CYCLONES IN THE SEA OF JAPANE

Vladimir A Chupin, Egor S. Gusev

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
FEB RAS, Vladivostok, Russia*

chupin@poi.dvo.ru

Аннотация. Выполнен краткий обзор работ авторов, выполнивших анализ обширной базы данных микродеформаций земной коры, в результате которого выявлено, что в общем фоне колебаний присутствуют микросейсмы сигнала верхней части инфразвукового диапазона (5–12 Гц) в периоды прохождения мощных тропических циклонов в акватории Японского моря. При обработке экспериментальных данных определены некоторые зависимости в появлении этих сигналов, а также локализованы области генерации в Японском море инфразвуковых колебаний при прохождении определенных тайфунов. Так как акватория Японского моря в холодное время года также подвергается влиянию циклонов, возникающих во внетропической области земного шара и временами достигающих значительной силы, было обработаны данные берегового лазерного деформографа, ведущего непрерывную запись, во время одного из таких событий, произошедшего в ноябре 2020 года. В результате исследования натурных данных берегового лазерного деформографа были обнаружены микросейсмы колебаний в верхней части инфразвукового диапазона, имеющие явную двухчастотную составляющую и проявляющиеся в момент развития циклона в северо-западной и центральной части Японского моря. Выполнено описание методики выполнения измерений

Abstract. A brief review of the works of the authors, who performed the analysis of an extensive database microdeformations of the Earth's crust. As a result of the analysis of experimental data, it was revealed that in the general background of oscillations there are microseisms signals in the high-frequency infrasound range (5–12 Hz) during the periods of the passage of powerful tropical cyclones in the Sea of Japan. As a result of the study of the coastal laser strainmeter data, microseisms of oscillations in the upper part of the infrasound range with a distinct dual-frequency component were detected and manifested during the extratropical cyclone development in the northwestern and central part of the Sea of Japan. The methods for measuring microdeformations of the Earth's crust by a stationary two-coordinate coastal laser strainmeter and their processing are described. It is determined that the development of infrasound oscillations does not depend on local meteorological conditions. A brief synoptic analysis of the development of a cyclonic vortex in the Sea of Japan is performed in the article. The detected infrasound signals develop when a certain wind strength is reached along an extended atmospheric front in the Sea of Japan and fade quickly enough during the beginning of rapid displacement of the atmospheric front to the central part of the Sea of Japan with accelerating inflow of cold air masses from the north. The character of the manifestation of infrasound signals during the

микродеформаций земной коры стационарным двухкоординатным береговым лазерным деформографом и проведения их обработки. Определено, что развитие инфразвуковых колебаний не зависит от местной метеорологической обстановки. В статье выполнен краткий синоптический анализ развития циклонического вихря в Японском море. Обнаруженные инфразвуковые сигналы развиваются при достижении определенной силы ветра вдоль протяжённого атмосферного фронта в Японском море и достаточно быстро затухают в период начала быстрого смещения атмосферного фронта в центральную часть Японского моря при ускоряющемся поступлении холодных воздушных масс с севера. Характер проявления инфразвуковых сигналов при прохождении внетропического циклона отличается от подобных проявлений при более сосредоточенном воздействии тропических циклонов.

Ключевые слова: внетропические циклоны; инфразвуковые колебания; лазерный деформограф, микродеформации земной коры; ветер; Японское море.

Введение

В 2018 году при исследовании натурных данных микродеформаций земной коры, полученных двухкоординатным лазерным деформографом, авторами были обнаружены мощные микросейсмические колебания в диапазоне инфразвуковых волн, имеющих частоту от 7 до 9 Гц [Долгих, Гусев, Чупин, 2018]. Появление инфразвукового процесса происходило на фоне перемещения тайфуна (тропического циклона) Лайонрок над акваторией Японского моря. В литературе содержится очень мало информации о натурных исследованиях подобных колебаний. Сам процесс образования таких волн был открыт ещё в первой половине XX века как атмосферный процесс, возникающий во время штормовых метеорологических условий, и его открытие носило случайный характер [Шулейкин, 1935]. На явление генерации инфразвука обратили внимание и дали

passage of an extratropical cyclone differs from similar manifestations during a more concentrated impact of tropical cyclones.

Keywords: extratropical cyclones; infrasound oscillations; laser strainmeter; microdeformations of the Earth crust; wind; Sea of Japan.

ему название «голос моря», а в зарубежной научной среде явление получило название микробаромы (microbaroms) [Beniof, Gutenberg, 1939]. В дальнейшем исследования генерации такого сигнала во многом носили теоретический характер, поскольку в основу появления сигнала «голоса моря» был положен процесс его генерации стоячими волнами. Генерация стоячих волн происходит в результате появления ветровых волн различного направления в области действия циклонического вихря. Одни из недавних исследований показали, что область их генерации относится преимущественно к тыльной части циклона и не связано с центральной областью циклона [Табулевич и др., 2001]. Изучение стоячих волн контактными методами практически невозможно, поскольку они генерируются высокоэнергетическими циклоническими вихрями, перемещающимися в открытом море, а их наблюдение обычно

заключалось в достаточно редких свидетельствах капитанов кораблей, случайно оказавшихся в области генерации стоячих морских волн. Поэтому метод наземного дистанционного зондирования может стать новым источником получения знаний об инфразвуковых процессах.

После выявления соответствующих микросейсмических колебаний в записях деформографа, авторами было сделано предположение о неслучайности открытия и что в период прохождения других тайфунов в акватории Японского моря возникают такие же инфразвуковые колебания, позволяющие в дальнейшем получить новые данные о передвижении циклонических вихрей и прогнозирования областей, опасных для мореплавания. Авторы имея в наличии обширную базу данных микродеформаций земной коры на юге Приморского края за последнее десятилетие, провели её анализ в периоды прохождения крупнейших тайфунов в акватории Японского моря, область влияния которых либо затрагивала территорию Приморского края, либо носило косвенный характер воздействия, перемещаясь вблизи дальневосточного побережья. Действительно, было обнаружено, что в периоды перемещения мощных циклонических вихрей в Японском море береговые лазерные деформографы регистрируют микросейсмические инфразвуковые колебания в диапазоне частот в разных случаях от 5 до 12 Гц, имеющие разнообразную амплитудно-частотную характеристику. Анализ зарегистрированных данных позволил определить, что генерация этих колебаний никак не связана с местными гидрометеорологическими условиями в районе станции наблюдения, так как в некоторых случаях изменение скорости и направления ветра до минимальных значений не отражалось на принимаемом инфразвуковом сигнале. Но в то же время регистрируемые колебания «голоса моря» совпадали с приходом волн зыби из области их генерации с естественным временным запаздыванием, зависящим от времени распространения морских волн и, соответственно, началом генерации первичных микросейсмических колебаний. Детальный

анализ нескольких периодов генерации инфразвуковых колебаний «голоса моря» двухкоординатным береговым лазерным, составляющим в некоторых случаях более двух суток, позволил выявить зависимости изменения направления от источника прихода сигнала и пеленговать основную область его генерации [Долгих и др., 2021].

Акватория Японского моря в течение года подвергается в том числе и воздействию циклонов, формирующихся во внетропических широтах, что преимущественно происходит в холодное полугодие. Ветер при передвижении этих циклонов через Приморский край также часто достигает штормовых значений. После получения убедительного доказательства генерации инфразвуковых колебаний тайфунами, авторы исследовали, присутствуют ли в данных лазерных деформографов микросейсмические колебания верхней части инфразвукового диапазона при влиянии внетропических циклонов на территорию Приморского края.

Метод исследования

Получение экспериментальных данных микродеформаций земной коры проводится на базе сейсмоакустико-гидрофизического комплекса, расположенного на юге Приморского края в Хасанском районе. Уникальность приборного комплекса заключается в том, что его расположение в зоне перехода геосфер «атмосфера – гидросфера – литосфера» позволяет исследовать появление, развитие и затухание природных процессов, генерирующихся в одной из сред и их трансформации в другие среды. На схеме, приведённой на рисунке 1, положение комплекса обозначено красным кругом. Береговой двухкоординатный лазерный деформограф, входящий в состав измерительного комплекса, состоит из двух лазерных деформографов неравноплечего типа, установленных в помещениях, максимально изолированных от атмосферного воздействия, на глубине 3–5 м от поверхности земли практически перпендикулярно друг другу (92°), что позволяет в определенных случаях применять лазерный деформограф для определения направления на

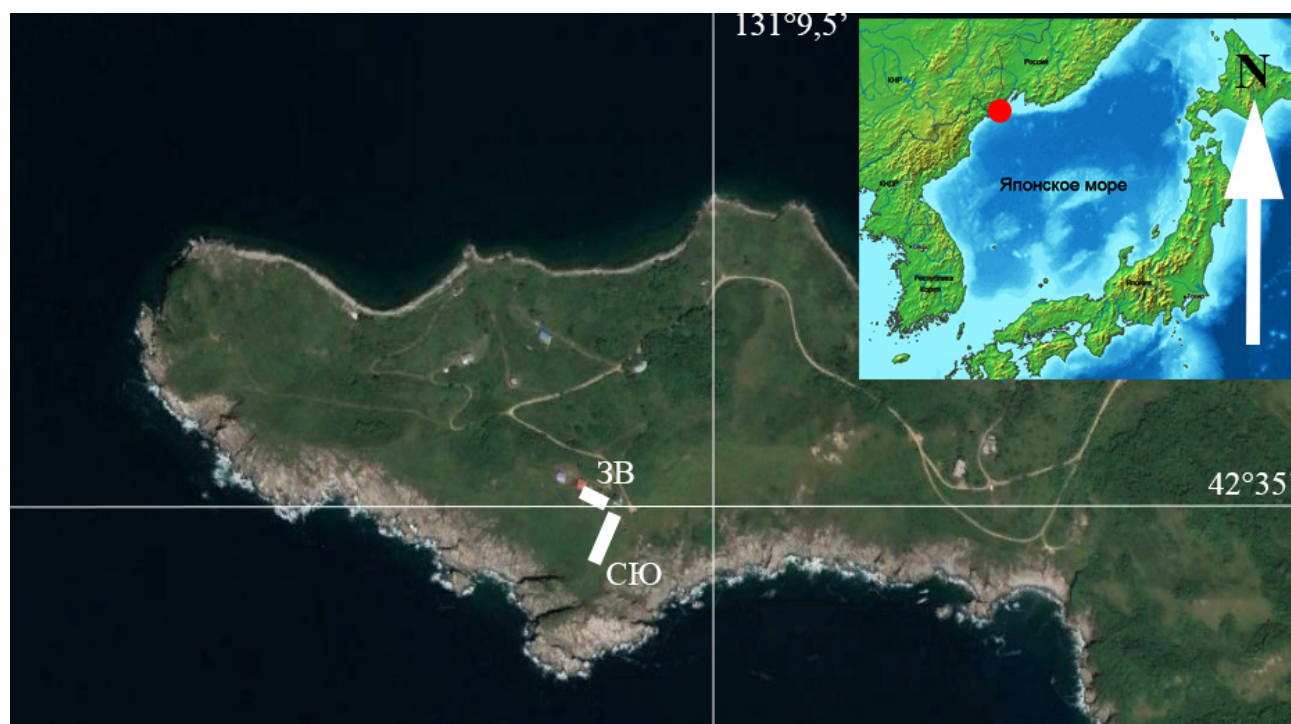


Рисунок 1. Схема расположения двухкоординатного лазерного деформографа на побережье Японского моря.

Figure 1. Schematic of the location of a two-axis laser strainmeter on the coast of the Sea of Japan.

источник какого-либо колебания. Лазерный деформограф, имеющий длину измерительного плеча 52,5 м ориентирован под углом 18° к линии меридиана (СЮ), а деформограф с длиной измерительного плеча 17,5 м имеет ориентацию под углом 110° к линии меридиана (ЗВ).

Основной интерференционный узел 52,5-метрового лазерного деформографа установлен на оптическом столе, соединённым с массивным бетонным монолитом высотой около 3 м, который в нижней части жёстко соединён с твёрдыми породами мыса Шульца. Угловой отражатель 52,5-метрового лазерного деформографа также жёстко крепится на бетонном блоке, соединённым с гранитной скалой. Каждая компонента двухкоординатного лазерного деформографа измеряет изменение длины рабочего плеча между основным интерференционным узлом и угловым отражателем. Принцип измерения смещения состоит в измерении набега фазы луча лазера с помощью интерференционных методов. Применяемые методы интерферометрии позволяют регистрировать изменение длин измерительных плеч каждого лазерного

деформографа с предельной точностью до 1 пм. Амплитудно-частотная характеристика данных лазерных деформографов такова, что в интересующем нас диапазоне частот, генерируемых тайфунами сигналов (1–15 Гц), можно проводить измерения с максимальной чувствительностью.

Классическая длительность одного синхронного файла записи данных лазерно-интерференционных систем составляет один час при частоте дискретизации 1000 Гц. На первом шаге обработки экспериментальных данных лазерных деформографов несколько файлов объединяются в один файл, длительность которого составляет до несколько суток, в зависимости от необходимого периода исследования. С целью уменьшения объёма объединённого файла данных и исключения возможного влияния энергоёмких высокочастотных спектральных гармоник, недопущения эффекта наложения, объединённый файл с помощью программного обеспечения собственной разработки подвергается обработке низкочастотным фильтром Хэмминга длиной 1 500 с граничной частотой 50 Гц, с дальнейшим

прореживанием до частоты Найквиста, равной 25 Гц, при частоте квантования 50 Гц.

Наличие в открытом доступе современных баз данных с архивными погодными данными земного шара, как например Global Forecast System ¹ (Глобальная система прогнозов), позволяет исследовать архивные данные характера формирования атмосферных вихрей в конкретном регионе, исследовать их динамику и делать соответствующие выводы о возможности формирования областей, в которых происходит генерация исследуемых инфразвуковых сигналов.

Натурные данные, синоптический анализ и обсуждение результатов

При перемещении мощных тропических циклонов в акватории Японского моря, преимущественно вдоль северного меридионального направления, первоначально происходит генерация волн зыби, величина которых тем больше увеличивается, чем больше происходит воздействие на водную поверхность. В результате существования в циклоне круговых ветров, циклон перемещается в зону формирования волн зыби и своей тыловой частью начинает воздействовать на морскую поверхность ветром другого направления. В результате возникновения интерференции волн происходит формирование области с генерацией инфразвуковых колебаний в диапазоне от 5 до 12 Гц [Dolgikh, Chupin, Gusev, 2020], совпадающих по времени прихода первичных микросейсм, генерируемых прогрессивными морскими волнами в месте наблюдения.

18–19 ноября 2020 года на юг Дальнего Востока Российской Федерации обрушился сильнейший ледяной шторм, когда произошёл мощнейший выход атмосферного слоя с положительной температурой в сторону холодной воздушной массы.

17 ноября 2020 года в 00:00 через южное Приморье прошёл тёплый атмосферный фронт, во время которого произошла смена направления ветра на юго-восточное. Над юго-восточным

Китаем и в акватории Жёлтого моря в это время сформировался циклон, начавший смещаться в восточном направлении.

18 ноября 2020 года после 05 часов (UTC) на записях лазерного деформографа обнаружили проявления аномальных сигналов (рисунок 2), стабильно развивающихся и варьирующихся в двух соседних диапазонах частот. Один из сигналов изменяется в диапазоне частот от 8 до 10 Гц, имея при этом центральную частоту с максимальной амплитудой на частоте 8,65 Гц, и второй сигнал, имеющий несколько меньшую интенсивность в диапазоне от 10 до 11,8 Гц с максимальной амплитудой частоты 11,1 Гц, которые более чем в три раза превышают общий фон сигнала. На рисунке также представлены показания скорости ветра и температуры на метеостанции морской экспериментальной станции «м. Шульца». Появление инфрагравитационных сигналов не коррелирует с изменением скорости ветра на станции наблюдения. При этом не получилось измерить весь ряд изменения скорости ветра в связи с обледенением ультразвуковых датчиков измерения параметров ветра.

Особенностью проявления инфрагравитационных сигналов стало отсутствие чёткой корреляции с проявлением первичных микросейсм, которые генерируются морскими волнами, развивающимися из внутренней части залива Петра Великого, что является особенностью этого времени года.

Проведем краткий анализ движения воздушных масс в приповерхностном слое атмосферы применительно к месторасположению измерительного комплекса.

18.11.2020 00:00: через сутки после формирования циклона в Китае, с речных долин в северной части залива Петра Великого усиливается северный ветер со средней скоростью 8–9 м/с, разворачивающийся вдоль побережья материка вплоть до Корейского залива к северо-восточному направлению.

¹Earth :: a global map of wind, weather and ocean conditions. [Электронный ресурс]. URL: <https://earth.nullschool.net> (дата обращения: 20.12.2021).

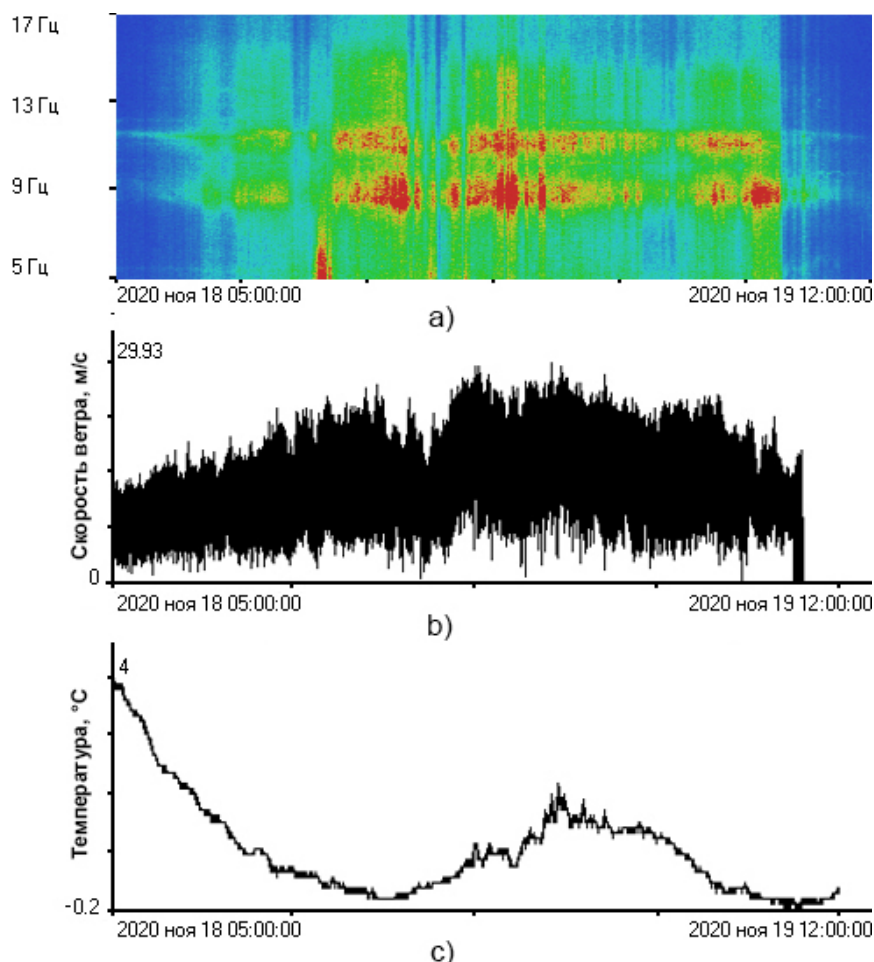


Рисунок 2. а) динамическая спектрограмма данных лазерного деформографа; б) скорость ветра на морской экспериментальной станции «м. Шульца»; в) температура воздуха на морской экспериментальной станции «м. Шульца».

Figure 2. a) dynamic spectrogram of laser strainmeter data; b) wind speed at "Shultz cape" station; c) air temperature at "Schultz cape" station.

Через всю ширину Японского моря простирается стационарный атмосферный фронт, имеющий протяжение по всей ширине Японского моря от Корейского полуострова до острова Хоккайдо. Минимальное расстояние от станции наблюдения до атмосферного фронта составляет около 200 км.

18.11.2020 12:00: северо-восточный ветер постепенно усиливается вдоль линии атмосферного фронта и достигает средней скорости 12 м/с вдоль всего северо-западного побережья Японского моря.

18.11.2020 18:00: в акватории Японского моря продолжает сохраняться линия атмосферного фронта, при этом продолжается усиление северо-восточного ветра до 16 м/с, а с южной части атмосферного фронта также

усиливается ветер южного направления, дующий со средней скоростью до 13 м/с перпендикулярно линии атмосферного фронта.

18.11.2020 21:00: в северо-западной части Японского моря в районе бухты Кёнсонман формируется мощный циклонический вихрь, имеющий диаметр не более 80 км. Но в результате его влияния, скорость ветра вдоль линии существующего атмосферного фронта увеличилась до 18 м/с. При этом к 00:00 19.11.2020 циклон незначительно увеличился в диаметре и сместился в восточном направлении, продолжая затягивать с севера холодные массы воздуха. В течение 12 часов, когда воздушные циклонические массы, находившиеся ранее в Жёлтом море, постепенно пересекают Корейский полуостров, циклонический вихрь растягивается

вдоль всей линии атмосферного фронта. При этом скорость ветра с обеих сторон атмосферного фронта достигает средней скорости до 18 м/с во встречных направлениях. Как показывают данные метеостанции, ветер в районе измерения имел высокую шквалистость, достигая максимальных значений скоростей до 30 м/с.

На рисунке 3 показана модель циклона во время его максимального развития при прохождении в акватории Японского моря.

19.11.2020 после 11:00 усиливается поступление холодных воздушных масс с Охотского моря и атмосферный фронт смещается в восточную часть Японского моря, удаляясь от измерительного комплекса.

В результате того, что в течение двух суток в Японском море господствовал атмосферный фронт, вдоль которого формировались ветра встречного направления северо-восточного с

северной стороны атмосферного фронта и южного, юго-западного направлений с южной стороны атмосферного фронта, в записях лазерного деформографа наблюдалось развитие интенсивности микросейсмических инфразвуковых колебаний. Во время их обнаружения при влиянии в регионе мощного внетропического циклона, появление колебаний происходит стихийно и практически мгновенно, без видимых зон развития, максимальной активности и затухания согласно данным деформографов, в отличие от инфразвуковых колебаний, наблюдаемых при прохождении тайфунов, где подобные зоны ярко выражены. Скорее всего это связано с тем, что ветер постепенно усиливаясь в протяженной области акватории Японского моря создает зоны генерации инфразвуковых колебаний.

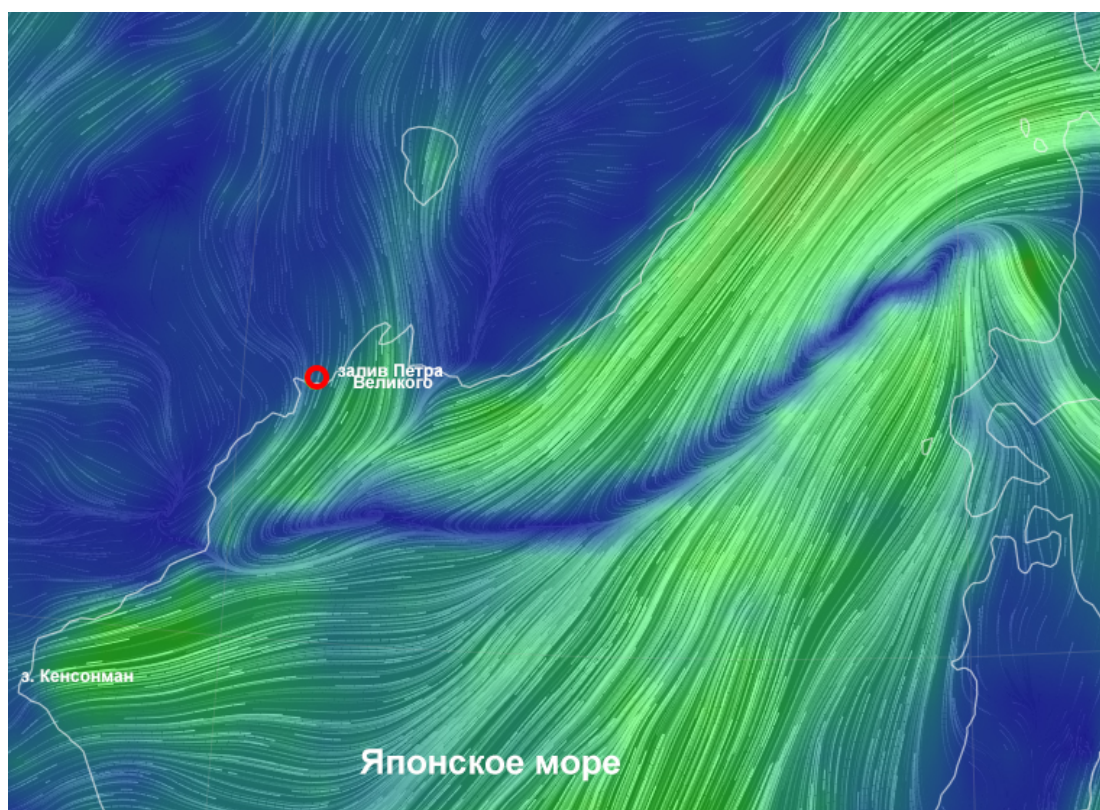


Рисунок 3. Схема развития внетропического циклона в Японском море 19.11.2020.

Красным кругом обозначено местоположения измерительного комплекса.

Figure 3. Schematic of the extratropical cyclone development in the Sea of Japan on 19.11.2020.

The red circle indicates the location of the measuring facility.

Заключение

В результате исследования данных микродеформаций земной коры во время воздействия на акваторию Японского моря циклона внетропического происхождения, в данных берегового лазерного деформографа обнаружены микросейсмы колебания верхней части инфразвукового диапазона, развивающиеся практически одновременно и имеющие два частотных максимума. При проведении анализа синоптических карт во время развития циклона определено, что развитие исследуемого процесса не зависит от метеорологической обстановки в области расположения измерительного комплекса. Инфразвуковые сигналы развиваются при достижении определенной силы ветра вдоль протяжённого атмосферного фронта в Японском море и достаточно быстро затухают в период

начала быстрого смещения атмосферного фронта в центральную часть Японского моря при ускоряющемся поступлении холодных воздушных масс с севера. Характер проявления инфразвуковых сигналов при прохождении внетропического циклона отличается от подобных проявлений при более сосредоточенном воздействии тропических циклонов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания (№ АААА-А20-120021990003-3) «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

Литература

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](https://doi.org/10.31857/S086956520000060-9).

Долгих Г.И., Чупин В.А., Гусев Е.С., Овчаренко В.В. Пеленг зон генерации микросейсм «голоса моря» // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 2. С. 226–230. DOI: [10.31857/S2686739721120033](https://doi.org/10.31857/S2686739721120033).

Табулевич В.Н., Пономарев Е.А., Сорокин А.Г., Дреннова Н.Н. Стоячие океанские волны, микросейсмы и инфразвук // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 2. С. 235–244.

Шулейкин В.В. О голосе моря // Доклады Академии наук. 1935. Т. 3. № 6. С. 259–263.

Benioff H., Gutenberg B. Waves and currents recorded by electromagnetic barographs // *Bullentin of the American Meteorological Society*. 1939. Vol. 20. Iss. 10. Pp. 421–428. DOI: [10.1175/1520-0477-20.10.421](https://doi.org/10.1175/1520-0477-20.10.421).

References

Benioff H., Gutenberg B. Waves and currents recorded by electromagnetic barographs. *Bullentin of the American Meteorological Society*, 1939, vol. 20, iss. 10, pp. 421–428. DOI: [10.1175/1520-0477-20.10.421](https://doi.org/10.1175/1520-0477-20.10.421).

Dolgikh G., Chupin V., Gusev E. Microseisms of the "Voice of the Sea". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, vol. 17, iss. 5, pp. 750–754. DOI: [10.1109/LGRS.2019.2931325](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2931325).

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, vol. 501, iss. 2, pp. 1087–1090. DOI: [10.1134/S1028334X21120035](https://doi.org/10.1134/S1028334X21120035). (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Chupin V.A., Gusev E.S., Ovcharenko V.V. Peleng zon generatsii mikroiseism «golosa morya». *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*, 2021, vol. 501, iss. 2, pp. 226–230. DOI: [10.31857/S2686739721120033](https://doi.org/10.31857/S2686739721120033)).

Dolgikh G., Chupin V., Gusev E. Microseisms of the "Voice of the Sea" // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2020. Vol. 17. Iss. 5. Pp. 750–754. DOI: [10.1109/LGRS.2019.2931325](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2931325).

Dolgikh G.I., Gusev E.S., Chupin V.A. The nature of the "Voice of the Sea". *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 481, iss. 1, pp. 912–915. DOI: [10.1134/S1028334X18070048](https://doi.org/10.1134/S1028334X18070048). (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Gusev E.S., Chupin V.A. Deformatsionnye proyavleniya «golosa morya». *Doklady Akademii nauk*, 2018, vol. 481, iss. 1, pp. 95–98. DOI: [10.31857/S086956520000060-9](https://doi.org/10.31857/S086956520000060-9)).

Shuleikin V.V. O golose moray [About voice of the sea]. *Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sciences]*, 1935, vol. 3, iss. 6, pp. 259–263. (In Russian).

Tabulevich V.N., Ponomarev E.A., Sorokin A.G., Drennova N.N. Standing sea waves, microseisms, and infrasound. *Izvestiya. Atmospheric and oceanic physics*, 2001, vol. 37, iss. 2, pp. 218–226. (Russ. ed.: Tabulevich V.N., Ponomarev E.A., Sorokin A.G., Drennova N.N. Stoyachie okeanskije volny, mikroseymsy i infrazvuk. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2001, vol. 37, iss. 2, pp. 235–244).