# МОНИТОРИНГОВЫЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
# MONITORING, EXPERIMENTAL AND EXPEDITIONARY RESEARCH

УДК 551.46.0

DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.355

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИНФРАГРАВИТАЦИОННЫХ МОРСКИХ ВОЛН В ДИАПАЗОНЕ ОТ 20 ДО 300 С

С.В. Яковенко, В.А. Швец, С.С. Будрин

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

*ser_mail@poi.dvo.ru*

**Аннотация.** В работе подтверждена сильная взаимосвязь пространственных свойств инфраграватационных волн и характеристик волн зыби. Показано, что уровень энергии инфраграватационных волн зависит от географических условий и местных особенностей. При обработке большого массива данных по вариациям гидросферного давления, полученных в ТОИ ДВО РАН с помощью лазерно-интерференционных донных измерительных систем, обнаружено, что поверхностные ветровые волны и зыбь в окрестностях мыса Шульца Японского моря усиливают амплитуды инфраграватационных волн с периодами от 20 до 300 с. То есть, установлено соответствие возрастания амплитуды ветровых волн и зыби возрастанию амплитуды инфраграватационных волн. Замечено, что это правило работает и в обратном порядке, т.е. снижение амплитуды ветровых волн и зыби соответствует снижению амплитуды инфраграватационных волн. При этом рост амплитуды инфраграватационных волн сопровождается возрастанием периода ветрового волнения. Данные инфраграватационные волны распространяются в виде волновых цугов, границы которых практически не меняются со

## REGIONAL FEATURES OF INFRAGRAVITY SEA WAVES IN THE RANGE FROM 20 TO 300 SECONDS

Sergey V. Yakovenko, Vyacheslav A. Shvets, Sergey S. Budrin

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

*ser_mail@poi.dvo.ru*

**Abstract.** The work confirms the strong relationship between the spatial properties of infragravitational waves and the characteristics of swell waves. It is shown that the energy level of infragravitational waves depends on geographical conditions and local features. It was found that surface wind waves and swell in the vicinity of Cape Schulz in the Sea of Japan enhance the amplitudes of infragravitational waves with periods from 20 to 300 s. That is, the correspondence between the increase in the amplitude of wind waves and swell and the increase in the amplitude of infragravitational waves has been established. In this case, the increase in the amplitude of infragravitational waves is accompanied by an increase in the period of wind waves. These infragravitational waves propagate in the form of wave trains, the boundaries of which practically do not change with time, while the period of individual waves inside the trains can change, however, the nature and parameters of these changes do not depend on the characteristics of the waves that generated them. At the same time, it was found that infragravitational waves are subject to a change in their spectral structure if they are affected by local oscillatory processes. Thus, in the Vityaz Bay, infragravitational waves have side maxima in the spectrum, due to the modulation effect of the seiche

временем, при этом период отдельных волн внутри цугов может меняться, однако характер и параметры этих изменений не зависят от характеристик породивших их волн. В то же время обнаружено, что инфрагравитационные волны подвержены изменению своей спектральной структуры в случае влияния на них местных колебательных процессов. Так, в бухте Витязь инфрагравитационные волны имеют в спектре боковые максимумы, обусловленные модуляционным воздействием сейшевого колебательного процесса бухты. Периоды инфрагравитационных и ветровых волн, регистрируемых в бухте Витязь, могут быть промодулированы также приливно-отливными колебаниями, характеристики которых, очевидно, зависят от местных условий. Отмечено также, что спектральные максимумы, регистрируемых в бухте инфрагравитационных волн, имеют дискретную структуру, обусловленную модуляционным воздействием более низкочастотных волн.

**Ключевые слова:** инфрагравитационные морские волны; ветровые морские волны; лазерный измеритель вариаций гидросферного давления; волны зыби; период ветровой волны; связь инфрагравитационных волн и волн зыби.

oscillatory process of the bay. The periods of infragravitational and wind waves recorded in Vityaz Bay can also be modulated by tidal oscillations, the characteristics of which obviously depend on local conditions.

**Keywords:** infra-gravity sea waves; wind sea waves; laser mesurer of the hydrosphere pressure variations; swell waves; wind wave period; relation between infragravity waves and swell waves.

## Введение

На сегодняшний день известно [Munk, 1949; Yoshida, 1950; Nishida, Kobayashi, Fukao, 2000; Nishida, Kobayashi, Fukao, 2002], что морские инфрагравитационные волны возникают в результате отражения от берега ветровых волн и зыби, а также в открытом океане в результате нелинейного взаимодействия ветровых волн и зыби. В этом случае можно говорить об инфрагравитационных волнах, находящихся в частотном диапазоне, соответствующем периодам от 20–30 с до 8–10 мин, распространяющихся как от берега, так и к берегу. Помимо этого, установлена связь их высоты с высотой породивших их ветровых волн [Holman, 1981; Guza, Thornton, 1985; Oltman-Shay, Howd, Birkemeier, 1989; Contardo, Symonds, 2013; Inch et al., 2017]. Доказан вклад инфрагравитационных волн в такие явления, как «разрывные течения» и волновые нагоны [Symonds, Ranasinghe, 2000], а также в формирование разнообразных береговых и прибрежных форм рельефа [Plant et al., 2004; Sánchez-Badorrey, Losada, 2006]. В сейсмологии колебания давления, вызванные инфрагравитационными волнами, были идентифицированы в качестве важного источника микросейсмического шума на дне океана [Webb, 1992]. В последнее время также предполагается, что инфрагравитационные волны являются источником свободных колебаний Земли [Rhie, Romanowicz, 2004; Tanimoto, 2005]. Таким образом, изучая особенности возникновения, развития и трансформации инфрагравитационных морских волн мы можем ответить на ряд вопросов, в том числе ответить на


Yakovenko S.V., Shvets V.A., Budrin S.S. Regional features of infragravity sea waves in the range from 20 to 300 seconds. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2021, vol. 3, iss. 4, pp. 355–372. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.355.

вопрос о происхождении «инфрагравитационного шума Земли».

Большинство подобных работ проводится в прибрежной или прибойной зонах. Установлена сильная взаимосвязь пространственных свойств инфрагравитационных волн и направления распространения волн зыби. Показано, что уровень энергии инфрагравитационных волн зависит от географических условий. Помимо этого, доказано [Longuet-Higgins, Stewart, 1960; Elgar et al., 1992], что в прибойной зоне вклад энергии гравитационных морских волн (ветровых волн и волн зыби) в энергию инфрагравитационных волн в несколько раз выше, чем на более глубокой воде.

Тем не менее, несмотря на то что в данном направлении проводится большое количество исследований, многие вопросы до сих пор изучены недостаточно и требуют уточнений. Например, как и какие прогрессивные волны (ветровые, зыбь) возбуждают инфрагравитационные волны, есть ли зависимость от периодов ветровых волн? Каков механизм возбуждения инфрагравитационных волн и существует ли зависимость вариаций основных параметров инфрагравитационных волн (период и амплитуда) от вариаций амплитуд и периодов ветровых волн и так далее. С появлением новой высокочувствительной широкополосной измерительной техники стало возможным провести более тщательное исследование свойств инфрагравитационных волн, ответить на некоторые выше поставленные вопросы на основе анализа высококачественных экспериментальных данных.

С 2010 года по настоящее время в районе мыса Шульца Японского моря был проведен ряд экспериментов по организации длительных мониторинговых измерений флуктуаций придонного давления. В качестве измерительных устройств использовались лазерные гидрофоны и лазерные измерители вариаций гидросферного давления [Dolgikh et al., 2009]. На рисунке 1 приведены фотографии одной из таких систем. Их технические характеристики позволяют проводить измерения с точностью до 1 мПа в диапазоне частот от 0 (условно, ограничено временем измерений) до 1 000 Гц. В последние годы использовался усовершенствованный измеритель вариаций гидросферного давления, подробно описанный в [Dolgikh et al., 2020a]. Разработанный и созданный сверхчувствительный сенсор вариаций гидросферного давления на основе интерферометра Майкельсона равноплечего типа, обладающий уникальными амплитудно-частотными характеристиками, предназначен для измерения вариаций гидросферного давления с наноуровневой точностью в инфразвуковом и звуковом диапазонах в большом динамическом диапазоне. На данной установке возможно получение предельных технических характеристик при уменьшении шумов фотоэлектронной аппаратуры, компенсации температурных шумов, более точному уравниванию разности длин измерительного и эталонного плеч интерферометра, которые соответствуют следующим расчетным параметрам: 0 (условно) – 10 000 Гц, точность измерения вариаций гидросферного давления – 1,8 мкПа. Динамический диапазон измерительных установок расширен до практически неограниченного за счет применения особой цифровой системы регистрации, в состав которой входит система сброса уровня. Мгновенное значение измеряемой величины смещения определяется суммой дискретной и непрерывной составляющих.

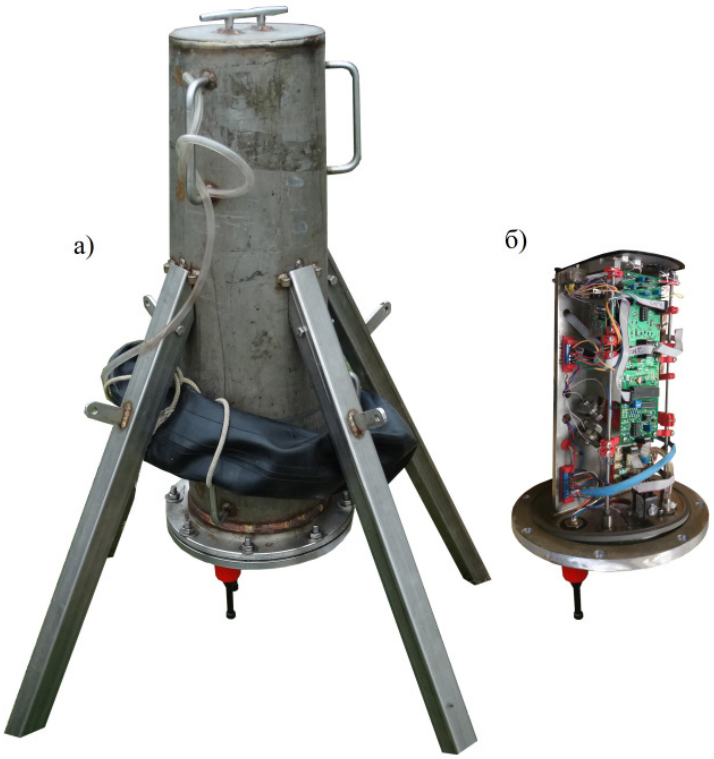



**Рисунок 1**. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы:
а) внешний вид, b) внутренний вид.
**Figure 1.** Laser mesurer of the hydrosphere pressure variations: a) external view, b) internal view.




**Рисунок 2**. Карта эксперимента.
**Figure 2.** Experiment map.

На рисунке 2 приведен фрагмент карты, на которой отмечены точки постановки лазерно-интерференционных измерительных систем. Все полученные экспериментальные данные в режиме точного времени подвергались предварительной обработке и заносились в массив базы экспериментальных данных. Основная часть работ велась в бухте Витязь залива Петра Великого в Японском море, которая расположена с северной стороны мыса Шульца. Также был проведен ряд экспериментов с южной стороны мыса. При измерениях в бухте приборы работали на глубинах от 7 до 10 м, и от 18 до 25 м – при измерениях вне ее. За 10 лет был накоплен большой объем данных, описывающих динамику изменений гидросферного давления в окрестностях мыса Шульца. Длительность непрерывных записей варьировалась от нескольких суток до десятков месяцев. Частота дискретизации от 500 до 2 000 Гц. Для исследования инфрагравитационных волн эти данные обрабатывались следующему алгоритму:

1) фильтрация низкочастотным фильтром Хэмминга до граничной частоты 1 Гц;

2) прореживание (децимация) до граничной частоты 2 Гц (частота Найквиста);

3) спектральная обработка с выводом полученной информации в виде динамической спектрограммы, в которой по оси абсцисс представлено время, по оси ординат – частота (или период) или спектра с амплитудой по оси абсцисс и временем по оси ординат.

Далее мы подробно остановимся на результатах, раскрывающих некоторые особенности природы морских инфрагравитационных волн в окрестностях мыса Шульца.

## Обработка и анализ экспериментальных данных

В первую очередь рассмотрим результаты, полученные на шельфе с южной стороны мыса Шульца (вне бухты). В процессе изучения данных было установлено, что в этом районе помимо ветрового волнения, зыби и приливно-отливных колебаний, наблюдаются волны с периодами около 29 с и 2 мин 40 с, которые можно отнести к так называемым инфрагравитационным морским волнам. Изучение большого количества данных показало, что эти колебания присутствуют в данной точке измерений практически всегда. При этом они существуют в виде волновых цугов, границы которых мало или почти не меняются со времени. В то же время их амплитуда постоянно меняется и эти изменения связаны с изменениями амплитуды ветрового волнения и зыби. Можно выделить два основных случая:

1) ветровое волнение появляется в точке регистрации позже инфрагравитационных волн;

2) инфрагравитационные волны возникают в точке измерений практически одновременно с ветровыми волнами и зыбью.

На рисунке 3 приведена иллюстрация первого варианта. На нем хорошо видно, что сначала в точку измерения приходят инфрагравитационные волны с периодом от 49 с до 2 мин 40 с, далее приходят более высокочастотные гармоники с периодами около 30 с, потом приходят волны с периодами 14–23 с, и после них приходит волновой фронт, который является зыбью, и имеет периоды порядка 8–9 с. Очевидно, что все эти волны возникли в одной точке, при этом различия во временах прихода объясняется тем, что низкочастотные колебания, имея большую скорость распространения чем высокочастотные, быстрее преодолели расстояние от источника колебаний до точки проведения измерений. Здесь стоит отметить, что наблюдаемая картина является наиболее типичной для открытой части Японского моря.

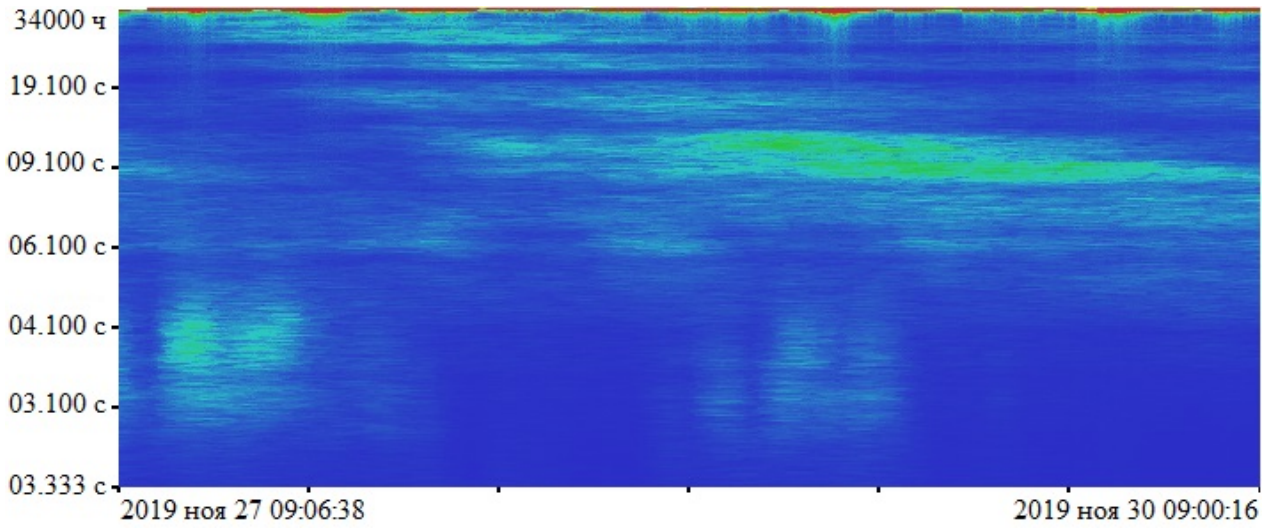



**Рисунок 3.** Динамическая спектрограмма, иллюстрирующая разные времена прихода инфрагравитационных и ветровых волн в точку измерений (открытая часть Японского моря).
**Figure 3.** Dynamic spectrogram illustrating different times of arrival of infragravitational and wind waves at the measurement point (open part of the Sea of Japan).

На рисунке 4 приведена динамическая спектрограмма, иллюстрирующую ситуацию, когда инфрагравитационные волны появляются в точке измерений практически одновременно с ветровым волнением. Здесь хорошо видно, что в этом случае в первую очередь возбуждаются ветровые волны с периодом около 5 с, при этом с течением времени их период увеличивается, что говорит о том, что источник данных волновых процессов (ветер) находился вблизи или непосредственно в районе измерений с развивающимся ветровым волнением. На нижней части рисунка 4 приведены графики изменения амплитуды ветровых и инфрагравитационных волн во времени, рассчитанные для того же временного периода. Данные зависимости были получены путем расчета отдельных амплитудных спектров и построения кривых на основе максимальных расчетных значений, при этом для ветровых волн максимумы выбирались в диапазоне периодов от 5 до 9 с, а для инфрагравитационных – в диапазоне от 29 до 34 с. Таким образом, в данном случае временные промежутки, в которых амплитуда ветровых волн возрастает, совпадают с временными промежутками, в которых возрастает амплитуда инфрагравитационных волн, и наоборот – падение амплитуды ветровых волн сопровождается падением амплитуды инфрагравитационных волн. Более того, из анализа данных рисунков становится ясно, что основное увеличение амплитуды инфрагравитационных волн сопровождается не только увеличением амплитуды ветровых волн, но и увеличением периода последних. Можно сделать вывод о том, что именно увеличение амплитуды ветрового волнения и его периода приводит к увеличению амплитуды инфрагравитационных волн.

Известно, [Bowden, 1984], что период и амплитуда ветровых волн, в районах возникновения барических депрессий зависит от:

1) величины и направления скорости ветра;
2) времени действия ветра;
3) величины разгона;
4) глубины акватории.

При выходе волн за пределы зоны их генерации, их период немного увеличивается за счет затухания высокочастотных компонент. Далее волны распространяются в виде свободных волн, так называемых волн зыби. При этом скорость распространения волн описывается классическим соотношением, которое можно записать в таком виде [Bowden, 1984]:

$$c_p = \frac{gT}{2\pi} \qquad (1)$$

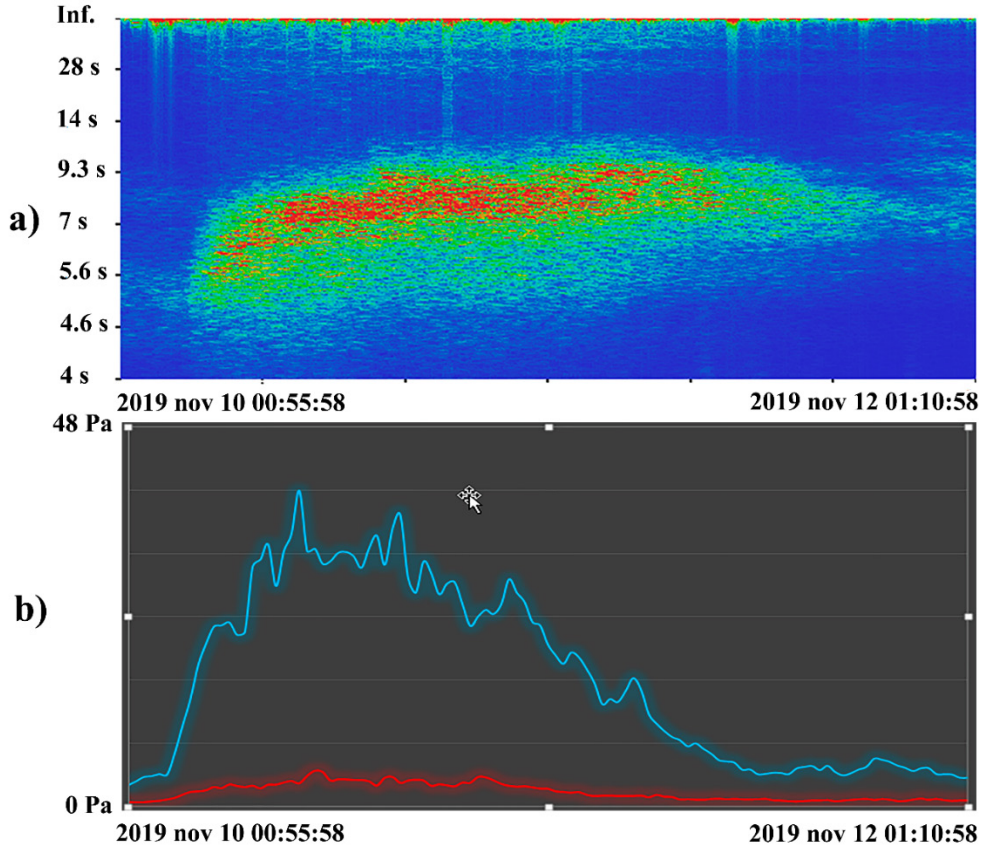



**Рисунок 4.** Развитие ветровых и инфрагравитационных волн в открытой части Японского моря: a) динамическая спектрограмма; b) кривые изменения амплитуд ветровых и инфрагравитационных волн во времени.

**Figure 4.** Development of wind and infragravitational waves in the open part of the Sea of Japan: a) dynamic spectrogram; b) time curves of wind and infragravitational wave amplitudes.

Также одним из важных параметров при рассмотрении диспергируемых волн является групповая скорость, которая описывается следующим выражением:

$$c_g = \frac{gT}{4\pi} \qquad (2)$$

где $c_p$ и $c_g$ – фазовая и групповая скорости распространения волны;

$g$ – ускорение свободного падения;

$T$ – период волны.

В соответствии с данными уравнениями волны с большими периодами распространяются с большими скоростями, чем волны с меньшими периодами. Поэтому к удаленной точке наблюдения должны приходить волны с постепенно уменьшающимся периодом. Ввиду линейной зависимости скорости волны от периода волны (уравнения (1), (2)), регистрируемое уменьшение периода волн зыби в точке наблюдения должно изменяться по линейному закону. Учитывая вышесказанное можно записать следующую систему простейших уравнений:

$$\begin{aligned} L &= c_0 t_0 \\ L &= c_1 t_1 \end{aligned} \qquad (3)$$

где $L$ – расстояние от источника ветровых волн до приемника;

$c_0$ – групповая скорость распространения волн с периодом $T_0$ ;

$c_1$ – групповая скорость распространения волн с периодом $T_1$;

$t_0$ – время распространения волны с периодом $T_0$ от источника до приемника;

$t_1$ – время распространения волны с периодом $T_1$ от источника до приемника.

Из уравнений (2) и (3) имеем:

$$L = \frac{T_1}{T_0 - T_1} \times \frac{gT_0}{4\pi} \Delta t \qquad (4)$$

где $L$ – расстояние от мест регистрации до мест генерации волн зыби.

Более подробно с данным подходом можно ознакомиться в [Snodgrass et al., 1966; Whitham, 1974; Dolgikh, Dolgikh, Budrin, 2020].

Таким образом, используя динамическую спектрограмму рисунка 5, на которой отчетливо видно линейное убывание амплитуды приходящих волн зыби, мы можем рассчитать скорости волновых цугов инфрагравитационных волн со средними периодами около 30 и 70 с, также регистрируемых в этой точке. Здесь двумя черными линиями обозначена область линейного уменьшения амплитуды зыби, период которой в момент прихода в точку регистрации составлял около 11,8 с, временной интервал этой области составляет около 25 436 с. Исходя из вышеописанного подхода данное время равно времени за которое волны зыби преодолели расстояние от точки генерации до точки регистрации. Используя дисперсионные соотношения для групповой скорости ветровых волн и зыби (2) можно определить расстояние до источника их генерации (229 432 м). Далее, зная разницу между временами прихода в точку регистрации волн зыби и инфрагравитационных волн (определена графически, на рисунке обозначена белыми линиями), мы можем определить время, за которое инфрагравитационные волны прошли расстояние 229 432 м, а затем вычислить скорость их распространения. Таким образом, для волн с периодом 30 с имеем скорость распространения порядка 20 м/с, и соответственно 25 м/с для волн с периодом около 70 с. Несмотря на то, что данный метод является грубым (поскольку на динамической спектрограмме границы областей, соответствующих определенным типам волн, очень размыты), в большинстве рассмотренных нами случаев мы имели очень близкие итоговые значения.

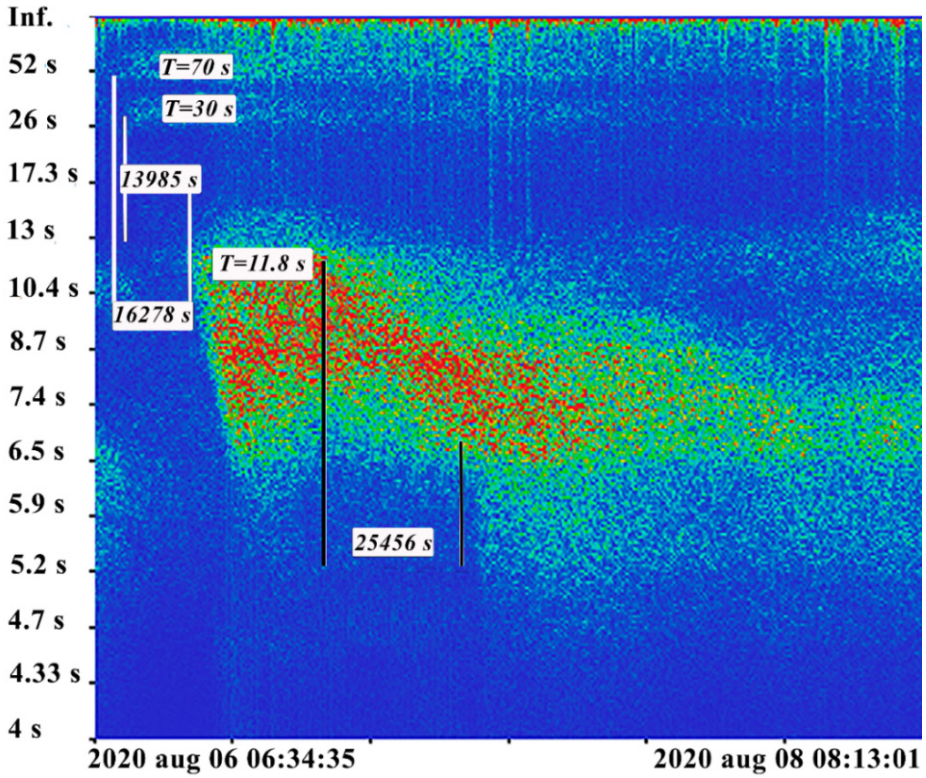



**Рисунок 5.** Динамическая спектрограмма (открытая часть Японского моря) для расчета скорости инфрагравитационных волн.

**Figure 5.** Dynamic spectrogram (open part of the Sea of Japan) for calculating the speed of infragravitational waves.

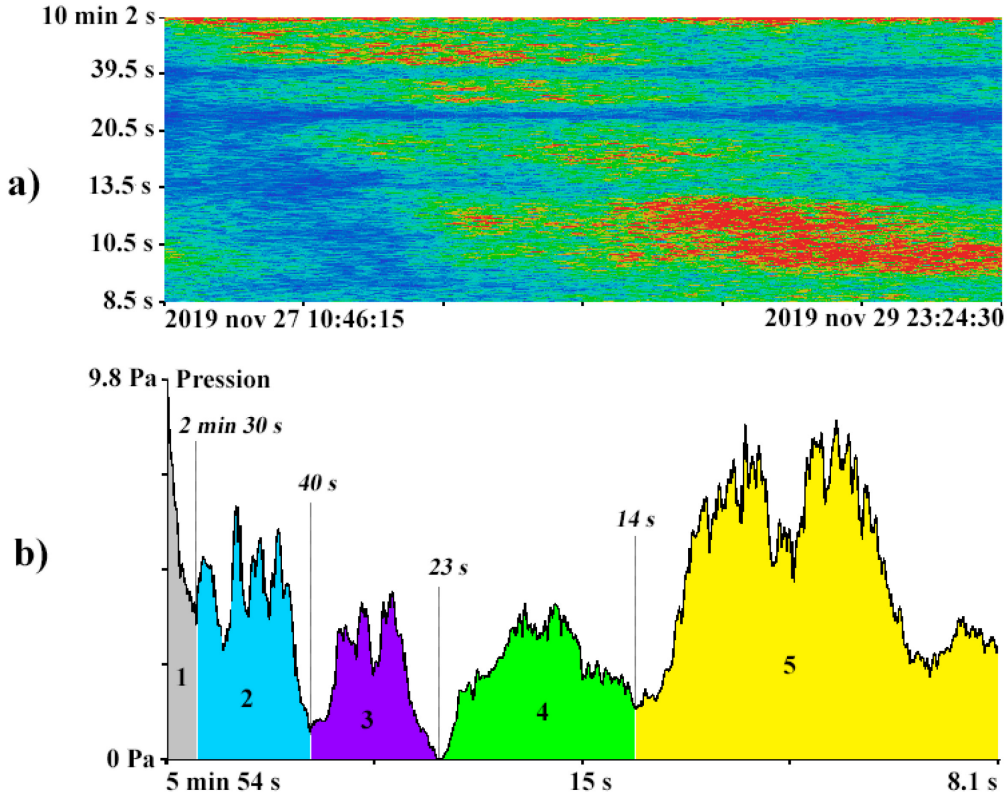



**Рисунок 6.** Типичная волновая картина для шельфа открытой части Японского моря: a) динамическая спектрограмма; b) амплитудный спектр (1 – низкочастотная область; 2,3,4 – волновые цуги инфраграватационных волн; 5 – область ветрового волнения и зыби).

**Figure 6.** A typical wave pattern for the shelf of the open part of the Sea of Japan: a) dynamic spectrogram; b) amplitude spectrum (1 – low frequency region; 2,3,4 – wave trains of infragravitational waves; 5 – area of wind waves and swell).

На рисунке 6 в увеличенном масштабе приведена динамическая спектрограмма и спектр фрагмента записи рисунка 3. Здесь можно выделить несколько областей. Первая (на спектре под номером 1 выделена серым цветом) – это низкочастотная область, в которой нет постоянно наблюдающихся ярко выраженных пиков, которые можно было отнести к инфраграватационным волнам. Далее идут три волновых цуга, объединяющих волны инфраграватационного диапазона. Первый из них (на спектре под номером 2 выделен голубым цветом) находится в диапазоне периодов от 40 с до 2 минут 30 с. Его огибающая имеет сложную непрерывно меняющуюся форму, поскольку он состоит из нескольких главных спектральных пиков, амплитуды которых постоянно меняются во времени. Следующим идет волновой пакет (на спектре под номером 3 выделен фиолетовый цветом) объединяющий инфраграватационные волны с периодами от 23 до 40 с. Его форма достаточно устойчива во времени, и на большинстве других спектров имеет похожий вид. И последний цуг инфраграватационных волн (на спектре под номером 4 выделена зеленым цветом) находится в диапазоне периодов от 14 до 23 с. Обычно считается, что граница разделения волн на ветровые и инфраграватационные лежит в районе 18 с, однако в соответствии с нашими наблюдениями данное значение является неверным для Японского моря, поскольку за всю историю многолетних мониторинговых измерений мы никогда не регистрировали ветровые волны или зыбь с периодом, превышающим 14 с. И наконец, последняя область (на спектре под номером 5 выделена желтым цветом) – это область ветрового волнения и волн зыби, пиковые периоды которых могу меняться от 4,5 до 12 с.

Описанная выше картина является типичной для открытой части Японского моря, то есть большинство спектрограмм и спектров, рассчитанных для этого района (в которых четко обозначены инфрагравитационные волны), имеют похожий вид. Иными словами, здесь всегда можно выделить три волновых пакета, объединяющих волны инфрагравитационного диапазона, которые довольно четко разделены между собой явно обозначенными областями спектральных минимумов, что хорошо видно на рисунке 6. Помимо этого, временные значения границ этих волновых цугов (рисунок 5: 2 мин 30 с; 40 с; 23 с; 14 с) практически не меняются с течением времени и не зависят от параметров ветрового волнения (амплитуда, период). В то же время период отдельных инфрагравитационных волн внутри пакетов может меняться, однако данное изменение имеет довольно случайный характер и никак не коррелирует с изменениями амплитуды или периода ветровых волн.

Теперь кратко остановимся на результатах, полученных в бухте Витязь. Здесь чаще всего наблюдается ситуация, представленная на рисунке 7, на динамической спектрограмме которого (рисунок 7a) отчетливо видно, что амплитуда инфрагравитационных волн начинает возрастать практически одновременно с началом развития ветрового волнения. Это так же подтверждает график на рисунке 7b, на котором представлены кривые изменения амплитуд ветровых (4–9 с) и инфрагравитационных волн (волновой цуг со средним периодом около 49 с) во времени и на котором хорошо видно, что моменты возрастания амплитуд ветровых волн совпадают с моментами возрастания амплитуд инфрагравитационных волн, и наоборот – моменты уменьшения амплитуд ветровых волн совпадают с моментами уменьшения амплитуд инфрагравитационных волн. Помимо этого, при внимательном визуальном анализе динамической спектрограммы можно заметить, что в моменты усиления амплитуды инфрагравитационных волн происходит постоянное нарастание периода ветровых волн. Таким образом, напрашивается вывод о том, что как в похожем случае для открытой части Японского моря, здесь усиление амплитуды инфрагравитационных волн вызвано усилением амплитуды и возрастанием периода ветровых волн. То есть инфрагравитационные волны, регистрируемые нами как в отрытой части Японского моря так в закрытой бухте Витязь, имеют одинаковые механизмы возбуждения.

На рисунке 8 приведен амплитудный спектр предыдущего фрагмента записи (рисунок 7). В отличие от подобного спектра, рассчитанного для открытой части Японского моря (рисунок 6b), здесь можно выделить не 3, а сразу 6 волновых пакетов инфрагравитационных волн, в каждом из которых явно выделяется только один главный спектральный максимум (значения максимумов указаны на рисунке). Помимо этого, здесь присутствует «промежуточный» (спорный) пакет волн с периодами от 10,5 до 12 с (на рисунке выделена оранжевым цветом), который лежит в диапазоне ветрового волнения, однако формой и амплитудой очень похож на пакеты инфрагравитационного диапазона. Также как и в предыдущем случае (шельф открытой части Японского моря), временные значения границ волновых цугов мало или почти не меняются со временем, при этом периоды отдельных волн внутри пакетов могут меняться (в пределах границ пакета), что может приводить к смещениям главного спектрального максимума. Таким образом периоды, соответствующие главным спектральным максимумам волновых пакетов (15 с; 22 с; 36 и 46 с, а также 1 мин 22 с и 2 мин 39 с – рисунок 8) не являются постоянными и могут колебаться в пределах границ самого пакета. Однако, как и в случае открытого моря, здесь не выявлено никакой зависимости между характером и величиной данных колебаний и изменением параметров ветровых волн и зыби (амплитуда и период).

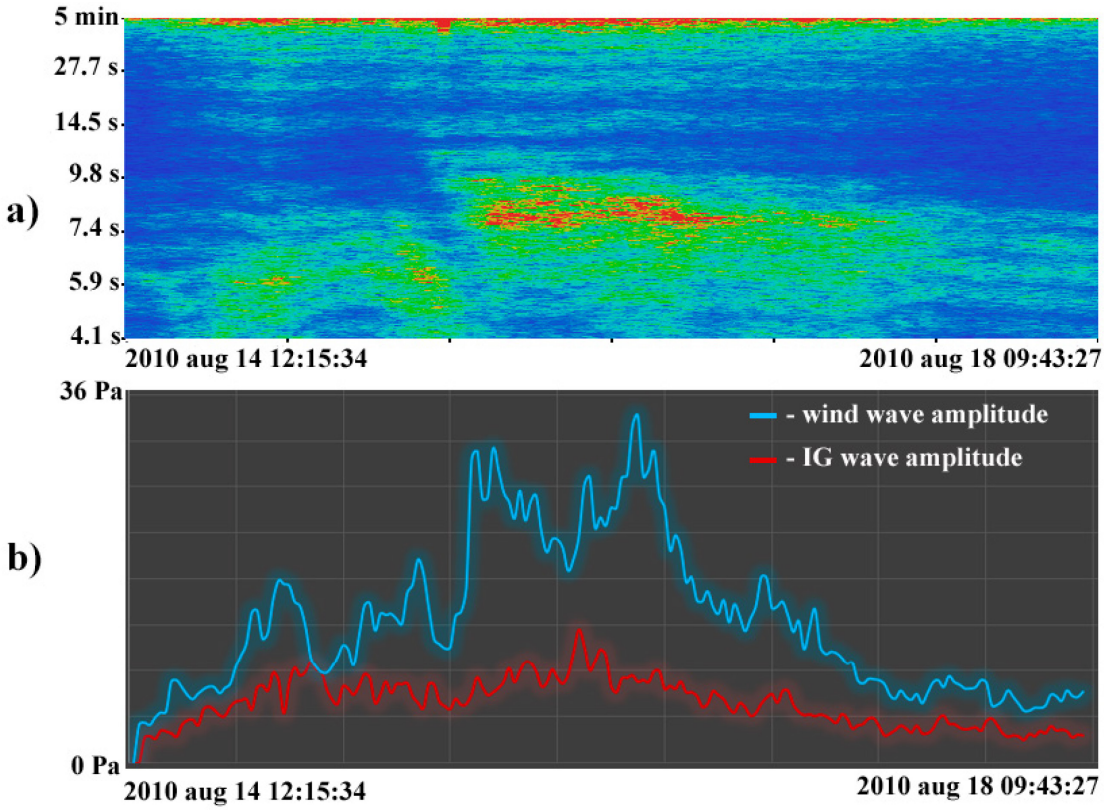



**Рисунок 7.** Развитие ветровых и инфрагравитационных волн в бухте Витязь:
a) динамическая спектрограмма; b) кривые изменения амплитуд ветровых и инфрагравитационных волн во времени (голубой цвет – ветровые волны, красный цвет – инфрагравитационные волны).

**Figure 7.** Development of wind and infragravity waves in Vityaz Bay:
a) dynamic spectrogram; b) curves of changes in the amplitudes of wind and infragravitational waves over time (blue color – wind waves, red color – infragravitational waves).

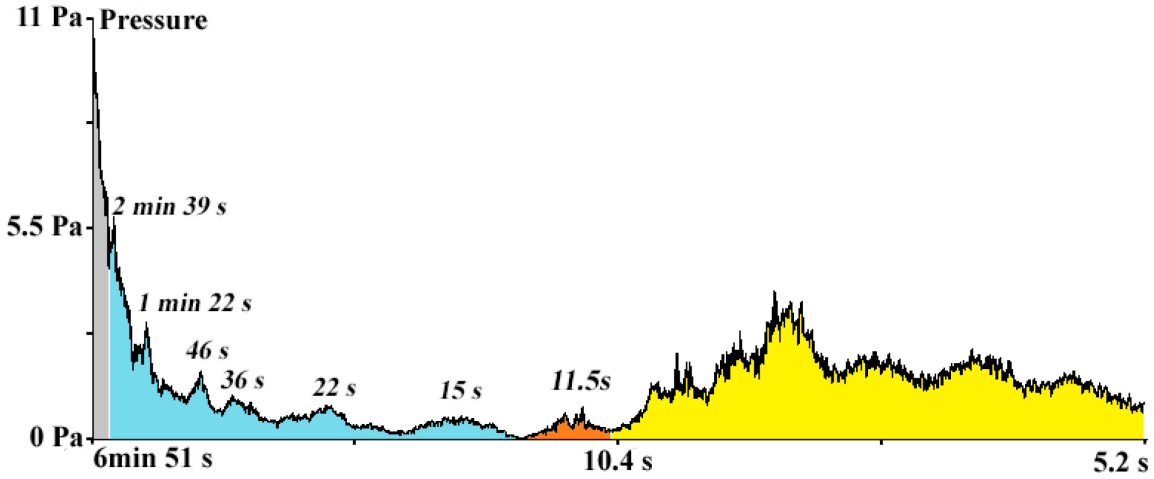



**Рисунок 8.** Амплитудный спектр фрагмента записи из бухты Витязь
(серый цвет – низкочастотная область, голубой цвет – волновые цуги инфрагравитационных волн, оранжевый цвет – переходная область, желтый цвет – область ветрового волнения и зыби).

**Figure 8.** Amplitude spectrum of a fragment of a record from Vityaz Bay
(gray color – low-frequency region, blue color – wave trains of infragravitational waves, orange color – transitional region, yellow color – wind wave and swell region).

Таким образом, инфрагравитационные волны, наблюдаемые как в открытой части Японского моря, так и в закрытой бухте Витязь, имеют одинаковые механизмы образования, но отличаются количеством и параметрами объединяющих их волновых цугов. В то же время известно, что волны инфрагравитационного диапазона могут вносить существенный вклад в формирование донного рельефа [Plant et al., 2004; Sánchez-Badorrey, Losada, 2006]. Очевидно, что это должно работать и в обратном направлении. При этом если в бухте Витязь мы имеем простое практически линейно углубляющееся дно, то в точке измерений, в отрытой части Японского моря, дно представляет собой довольно сложную структуру с резким, ступенчатым понижением глубины. Данные различия в рельефе дна, а также разные глубины постановки измерительных систем (от 7 до 10 м – бухта Витязь, от 18 до 25 м – открытая часть Японского моря) могут являться причиной наблюдаемых нами различий в параметрах инфрагравитационных волн.

Рисунок 9 иллюстрирует модуляционный эффект периода гравитационных и инфрагравитационных волн приливно-отливными колебаниями. В работах Лонге-Хиггинса и Стюарта похожий феномен изменения периода ветрового волнения в результате приливно-отливных колебаний объясняется нелинейным взаимодействием между двумя волновыми процессами [Longuet-Higgins, Stewart, 1960]. При этом некоторые последние исследования утверждают [Kovalev, Kovalev, Zarochintsev, 2019], что данному эффекту, помимо ветрового волнения и зыби, могут быть подвержены и инфрагравитационные волны с периодами от 20 до 200 с, что подтверждается и нашими данными. То есть на динамической спектрограмме (рисунок 9б), отчетливо видно, что максимумы периодов отельных гармоник ветрового волнения совпадают по времени с моментами минимального уровнем воды в бухте (отлив), а минимумы совпадают с моментами максимального уровня воды (прилив). В левой верхней части динамической спектрограммы видно, что волновой цуг инфрагравитационных волн со средним периодом около 16 с также подвержен этому эффекту. При этом на динамических спектрограммах для открытой части Японского моря (рисунки 3, 4, 5, 6) нет никаких признаков подобного модуляционного эффекта, что может быть связно с довольно сильным отличием рельефа дна в бухте и в отрытой части Японского моря, а также разной глубиной моря в точках измерений. В связи с этим можно выдвинуть предположение, что сила данного модуляционного эффекта напрямую зависит от рельефа дна и глубины моря в точке измерения: чем больше глубина, тем слабее эффект.

В заключение отметим еще одну особенность – спектральные максимумы, регистрируемых в бухте инфрагравитационных волн, имеют дискретную структуру, обусловленную модуляционным воздействием более низкочастотных волн. Например, на спектре, представленном на рисунке 10, в левой и правой частях главных максимумов видны боковые лепестки, вызванные модуляционным воздействием колебаний с периодом около 17 мин. Известно, [Dolgikh et al., 2011; Dolgikh et al., 2016], что данный период является основной модой сейш бухты Витязь.

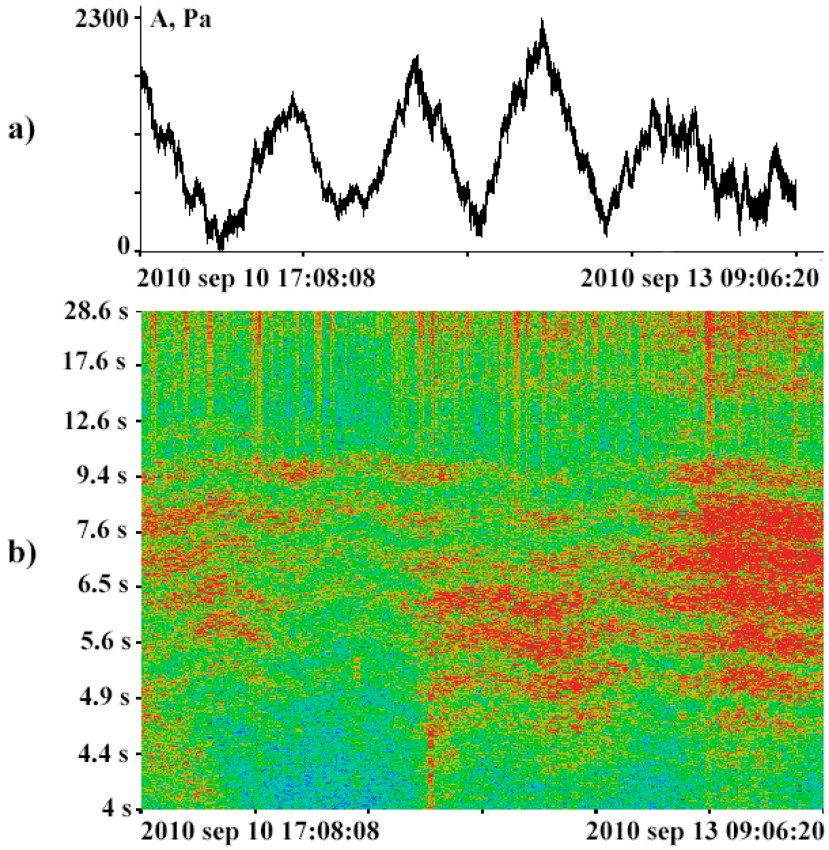



**Рисунок 9**. Модуляция периодов ветрового волнения и инфрагравитационных волн приливно отливными колебаниями: a) фрагмент записи, полученный в бухте Витязь, иллюстрирующий приливно отливные колебания; b) динамическая спектрограмма данного фрагмента записи.
**Figure 9.** Modulation of periods of wind waves and infragravitational waves by tidal fluctuations: a) a fragment of the record obtained in Vityaz Bay, illustrating tidal fluctuations; b) dynamic spectrogram of the given fragment of the record.

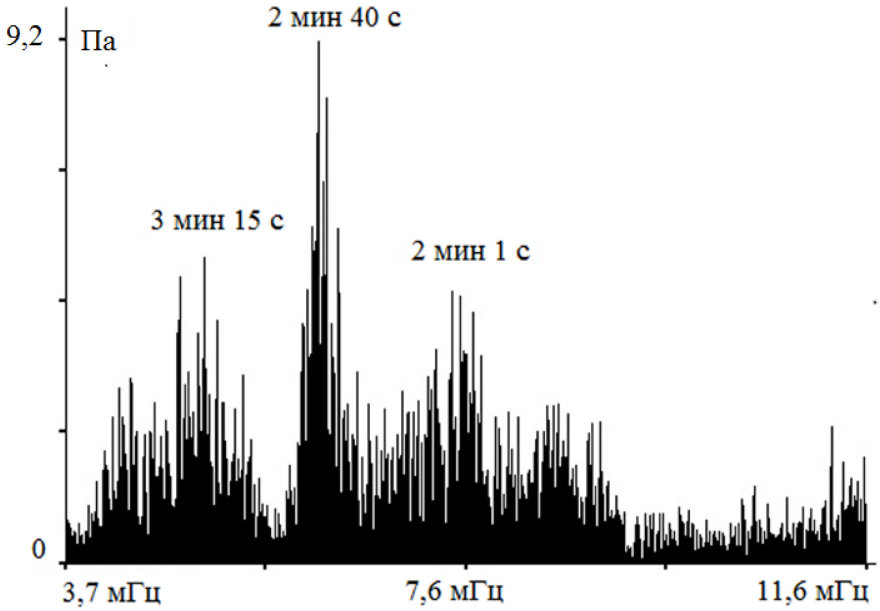



**Рисунок 10**. Спектр участка записи лазерного измерителя вариаций гидросферного давления.
**Figure 10.** Spectrum of the recording section of a laser mesurer of hydrosphere pressure variations.

## Заключение

В ходе обработки большого массива экспериментальных данных вариаций придонного гидросферного давления, полученных с помощью различных лазерно-интерференционных донных измерительных систем, установлено, что морские ветровые волны и зыбь в окрестностях мыса Шульца оказывают непосредственное влияние на характеристики регистрируемых в данном районе инфрагравитационных волн с периодами от 14 до 300 с. А именно: при возрастании амплитуды ветровых волн и зыби возрастает амплитуда инфрагравитационных волн – и наоборот: при уменьшении ветрового волнения и зыби падает амплитуда инфрагравитационных волн. Помимо этого, рост периода инфрагравитационных волн сопровождается возрастанием периода ветрового волнения. Данные инфрагравитационные волны распространяются в виде волновых цугов, границы которых практически не меняются со временем и не зависят от параметров породивших их волн (амплитуда или период ветровое волнение). При этом периоды отдельных волн внутри цугов могут меняться, однако характер и параметры этих изменений также не зависят от характеристик породивших их волн. В то же время обнаружено, что инфрагравитационные волны в бухте Витязь имеют в своей спектральной структуре боковые максимумы, обусловленные модуляционным воздействие сейш бухты Витязь. При этом периоды инфрагравитационных и ветровых волн, регистрируемых в бухте промодулированы приливно-отливными колебаниями.

В заключение хочется отметить, что помимо расширения современного понимания различных аспектов природы инфрагравитационных морских волн, проведение подобных длительных измерений с последующим анализом полученных данных необходимо для калибровки и валидации современных алгоритмов спутникового зондирования морского волнения в прибрежных акваториях [Bondur, Vorobyev, Murynin, 2020; Bondur et al., 2020].

## Благодарности

Исследования выполнены за счет средств Министерства науки и высшего образования (тема госзадания №АААА-А20-120021990003-3 «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане»).

## Литература

*Бондур В.Г., Иванов В.А., Воробьев В.Е., Дулов В.А., Долотов В.В., Замшин В.В, Кондратьев С.И., Ли М.Е., Малиновский В.В.* Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 1. С. 103–115.
DOI: 10.22449/0233-7584-2020-1-103-115.

*Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.* Собственные колебания уровня воды в бухтах залива Посьета Японского моря // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 57–63.

## References

Bondur V.G., Ivanov V.A., Vorobiev V.E., Dulov V.A., Dolotov V.V., Zamshin V.V., Kondratiev S.I., Lee M.E., Malinovsky V.V. Ground-to-space monitoring of anthropogenic impacts on the coastal zone of the Crimean peninsula. *Physical Oceanography*, 2020, vol. 27, iss. 1, pp. 95–107. DOI: 10.22449/1573-160X-2020-1-95-107.
(Russ. ed.: Bondur V.G., Ivanov V.A., Vorob'ev V.E., Dulov V.A., Dolotov V.V., Zamshin V.V., Kondrat'ev S.I., Li M.E., Malinovskii V.V. Nazemno-kosmicheskii monitoring antropogennykh vozdeistvii na pribrezhnuyu zonu Krymskogo poluostrova. *Morskoi gidrofizicheskii zhurnal*, 2020, vol. 36, iss. 1, pp. 103–115. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-1-103-115).

*Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.* Инфразвуковые колебания Японского моря // Доклады Академии наук. 2011. Том 441. № 1. С. 98–102.

*Bondur V.G., Vorobyev V.E., Murynin A.B.* Retrieving sea wave spectra based on high resolution satellite imagery under various conditions of wave generation // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. Vol. 56. Iss. 9. Pp. 887–897. DOI: 10.1134/S0001433820090042.

*Bowden K.F.* Physical oceanography of coastal waters. New York: Halsted Press, 1983. 302 c.

*Contardo S., Symonds G.* Infragravity response to variable wave forcing in the nearshore // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. Vol. 118. Iss. 12. Pp. 7095–7106. DOI: 10.1002/2013JC009430.

*Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S.* Fluctuations of the sea level, caused by gravitational and infra–gravitational sea waves // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8. Iss. 10. Pp. 796. DOI: 10.3390/jmse8100796.

*Dolgikh G, Budrin S, Dolgikh S., Plotnikov A.* Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations. Sensors. 2020. Vol. 20. Iss. 23. Pp. 6998. DOI: 10.3390/s20236998.

*Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalyov S.N., Chupin V.A, Shvets V.A., Yakovenko S.V.* Super-low-frequency laser instrument for measuring hydrosphere pressure variations // Journal of Marine Science and Technology. 2009. Vol. 14. Iss. 4. Pp. 480–488. DOI: 10.1007/s00773-009-0062-5.

*Elgar S., Herbers T.H.C., Okihiro M., Oltman-Shay J., Guza R.T.* Observations of infragravity waves // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1992. Vol. 97. Iss. C10. Pp. 15573–15577. DOI: 10.1029/92JC01316.

*Guza R.T., Thornton E.B.* Observations of surf beat // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1985. Vol. 90. Iss. C2. Pp. 3161–3172. DOI: 10.1029/JC090iC02p03161.

*Holman R.A.* Infragravity energy in the surf zone // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1981. Vol. 86. Iss. C7. Pp. 6442–6450. DOI: 10.1029/JC086iC07p06442.

Bondur V.G., Vorobyev V.E., Murynin A.B. Retrieving sea wave spectra based on high resolution satellite imagery under various conditions of wave generation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, iss. 9, pp. 887–897. DOI: 10.1134/S0001433820090042.

Bowden K.F. *Physical oceanography of coastal waters*. New York: Halsted Press, 1983, 302 p.

Contardo S., Symonds G. Infragravity response to variable wave forcing in the nearshore. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, vol. 118, iss. 12, pp. 7095–7106. DOI: 10.1002/2013JC009430.

Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S. Fluctuations of the sea level, caused by gravitational and infra-gravitational sea waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, vol. 8, iss. 10, pp. 796. DOI: 10.3390/jmse8100796.

Dolgikh G, Budrin S, Dolgikh S., Plotnikov A. Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations. *Sensors,* 2020, vol. 20, iss. 23, pp. 6998. DOI: 10.3390/s20236998.

Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Plotnikov A.A., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Free oscillations of water level in the Posyet Gulf bays (the Sea of Japan). *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, vol. 41, iss. 8. pp. 559–563. DOI: 10.3103/S1068373916080057. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Plotnikov A.A., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Sobstvennye kolebaniya urovnya vody v bukhtakh zaliva Pos'eta Yaponskogo morya. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2016, no. 8, pp. 57–63).

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalyov S.N., Chupin V.A, Shvets V.A., Yakovenko S.V. Super-low-frequency laser instrument for measuring hydrosphere pressure variations. *Journal of Marine Science and Technology,* 2009, vol. 14, iss. 4, pp. 480–488. DOI: 10.1007/s00773-009-0062-5.

*Inch K., Davidson M., Masselink G., Russell P.* Observations of nearshore infragravity wave dynamics under high energy swell and wind-wave conditions // Continental Shelf Research. 2017. Vol. 138. Pp. 19–31. DOI: 10.1016/j.csr.2017.02.010.

*Kovalev P.D., Kovalev D.P., Zarochintsev V.S.* The modulation of the eigen oscillation in the harbours by tide // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (III National scientific conference with foreign participants "Geodynamical Processes and Natural Hazards" 27–31 May 2019, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation). 2019. Vol. 324. Pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/324/1/012013.

*Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W.* Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents // Journal of Fluid Mechanics. 1960. Vol. 8. Iss. 4. Pp. 565–583. DOI: 10.1017/S0022112060000803.

*Munk W.H.* Surf beats // Transactions American Geophysical Union. 1949. Vol. 30. Iss. 6. Pp. 849–854. DOI: 10.1029/TR030i006p00849.

*Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y.* Resonant oscillations between the solid Earth and atmosphere // Science. 2000. Vol. 287. No. 5461. Pp. 2244–2246. DOI: 10.1126/science.287.5461.2244.

*Nishida K., Kobayashi N, Fukao Y.* Origin of Earth's ground noise from 2 to 20 mHz // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29. Iss. 10. Pp. 52-1–52-4. DOI: 10.1029/2001GL013862.

*Oltman-Shay J., Howd P.A., Birkemeier W.A.* Shear instabilities of the mean longshore current: 2. Field observations // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1989. Vol. 94. Iss. C12. Pp. 18031–18042. DOI: 10.1029/JC094iC12p18031.

*Plant N.G., Holland K.T., Puleo J.A., Gallagher E.L.* Prediction skill of nearshore profile evolution models // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2004. Vol. 109. Iss. C1. Pp. C01006. DOI: 10.1029/2003JC001995.

*Rhie J., Romanowicz B.* Excitation of the Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // Nature. 2004. Vol. 431. Pp. 552–556. DOI: 10.1038/nature02942.

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Smirnov S.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Infrasound oscillations in the Sea of Japan. *Doklady Earth Sciences,* 2011, vol. 441, iss. 1, pp. 1529–1532. DOI: 10.1134/S1028334X11110031. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Smirnov S.V., Chupin V.A., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Infrazvukovye kolebaniya Yaponskogo morya. *Doklady Akademii nauk*, 2011, vol. 441, iss. 1, pp. 98–102).

Elgar S., Herbers T.H.C., Okihiro M., Oltman-Shay J., Guza R.T. Observations of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 1992, vol. 97, iss. C10, pp. 15573–15577. DOI: 10.1029/92JC01316.

Guza R.T., Thornton E.B. Observations of surf beat. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 1985, vol. 90, iss. C2, pp. 3161–3172. DOI: 10.1029/JC090iC02p03161.

Holman R.A. Infragravity energy in the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 1981, vol. 86, iss. C7, pp. 6442–6450. DOI: 10.1029/JC086iC07p06442.

Inch K., Davidson M., Masselink G., Russell P. Observations of nearshore infragravity wave dynamics under high energy swell and wind-wave conditions. *Continental Shelf Research*, 2017, vol. 138, pp. 19–31. DOI: 10.1016/j.csr.2017.02.010.

Kovalev P.D., Kovalev D.P., Zarochintsev V.S. The modulation of the eigen oscillation in the harbours by tide. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (III National scientific conference with foreign participants "Geodynamical Processes and Natural Hazards" 27–31 May 2019, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation),* 2019, vol. 324, pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/324/1/012013.

Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. *Journal of Fluid Mechanics,* 1960, vol. 8, iss. 4, pp. 565–583. DOI: 10.1017/S0022112060000803.

Munk W.H. Surf beats. *Transactions American Geophysical Union,* 1949, vol. 30, iss. 6, pp. 849–854. DOI: 10.1029/TR030i006p00849.

*Sánchez-Badorrey E., Losada M.A.* Standing regular wave groups with oblique incidence: phase averaging and bottom boundary layer in constant depth // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2006. Vol. 111. Iss. C9. Pp. C09011. DOI: 10.1029/2005JC003127.

*Snodgrass F.E., Hasselmann K.F., Miller G.R., Munk W.H., Powers W.H.* Propagation of ocean swells across the Pacific // Philosophical transactions of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences. 1966. Vol. 259. Iss. 1103. Pp. 431–497. DOI: 10.1098/rsta.1966.0022.

*Symonds G., Ranasinghe R.* On the formation of rip currents on a plane beach // Proc. 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE) (July 16–21, 2000, Sydney, Australia). Pp. 468–481. DOI: 10.1061/40549(276)37.

*Tanimoto T.* The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillation of the Earth // Geophysical Journal International. 2005. Vol. 160. Iss. 1. Pp. 276–288. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02484.x.

*Webb S.C.* Broadband seismology and noise under the ocean // Reviews of Geophysics. 1992. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 105–142. DOI: 10.1029/97RG02287.

*Whitham G.B.* Linear and Nonlinear Waves. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1974. 636 p.

*Yoshida K.* On the ocean wave spectrum, with special reference to the beat phenomena and the "1-3 minute waves" // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1950. Vol. 6. Iss. 2. Pp. 49–56. DOI: 10.5928/KAIYOU1942.6.2_49.

Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y. Resonant oscillations between the solid Earth and atmosphere. *Science,* 2000, vol. 287, no. 5461, pp. 2244–2246. DOI: 10.1126/science.287.5461.2244.

Nishida K., Kobayashi N, Fukao Y. Origin of Earth's ground noise from 2 to 20 mHz. *Geophysical Research Letters,* 2002, vol. 29, iss. 10, pp. 52-1–52-4. DOI: 10.1029/2001GL013862.

Oltman-Shay J., Howd P.A., Birkemeier W.A. Shear instabilities of the mean longshore current: 2. Field observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1989, vol. 94, iss. C12, pp. 18031–18042. DOI: 10.1029/JC094iC12p18031.

Plant N.G., Holland K.T., Puleo J.A., Gallagher E.L. Prediction skill of nearshore profile evolution models. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 2004, vol. 109, iss. C1, pp. C01006. DOI: 10.1029/2003JC001995.

Rhie J., Romanowicz B. Excitation of the Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling. *Nature*, 2004, vol. 431, pp. 552–556. DOI: 10.1038/nature02942.

Sánchez-Badorrey E., Losada M.A. Standing regular wave groups with oblique incidence: phase averaging and bottom boundary layer in constant depth. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 2006, vol. 111, iss. C9, pp. C09011. DOI: 10.1029/2005JC003127.

Snodgrass F.E., Hasselmann K.F., Miller G.R., Munk W.H., Powers W.H. Propagation of ocean swells across the Pacific. *Philosophical transactions of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences,* 1966, vol. 259, iss. 103, pp. 431–497. DOI: 10.1098/rsta.1966.0022.

Symonds G., Ranasinghe R. On the formation of rip currents on a plane beach. *Proc. 27th International Conference on Coastal Engineering (ICCE) (July 16-21, 2000, Sydney, Australia),* pp. 468–481. DOI: 10.1061/40549(276)37.

Tanimoto T. The oceanic excitation hypothesis for the continuous oscillation of the Earth. *Geophysical Journal International*, 2005, vol. 160, iss. 1, pp. 276–288. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02484.x.

Webb S.C. Broadband seismology and noise under the ocean. *Reviews of Geophysics*, 1992, vol. 36, iss. 1, pp. 105–142. DOI: 10.1029/97RG02287.

Whitham G.B. *Linear and Nonlinear Waves.* New York: A Wiley-Interscience Publication, 1974. 636 p.

Yoshida K. On the ocean wave spectrum, with special reference to the beat phenomena and the "1-3 minute waves". *Journal of the Oceanographical Society of Japan,* 1950, vol. 6, iss. 2, pp. 49–56. DOI: 10.5928/KAIYOU1942.6.2_49.