

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГОБАЛАНСА ГАРМОНИК ГРАВИТАЦИОННОГО И ИНФРАГРАВИТАЦИОННОГО ДИАПАЗОНОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

Г.И. Долгих, С.Г. Долгих

В статье анализируются данные по изменению гидросферного давления гравитационного и инфрагравитационного диапазонов, полученные с помощью сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления, установленного на глубине 25 м на дне на шельфе Японского моря. Установлено, что изменение суммарной энергии гармоник морского волнения инфрагравитационного диапазона почти всегда коррелирует с изменением суммарной энергии гармоник морского волнения гравитационного диапазона. В редких случаях этого нет, т.е. наблюдается антикорреляционное поведение. Антикорреляционное поведение суммарной энергии гармоник гравитационного диапазона и суммарной энергии гармоник инфрагравитационного диапазона связано с расфокусировкой гармоник гравитационного или инфрагравитационного диапазонов. Всегда суммарная энергия гармоник гравитационного диапазона больше суммарной энергии гармоник инфрагравитационного диапазона.

Ключевые слова: морское волнение, гравитационный диапазон, инфрагравитационный диапазон, фокусировка, расфокусировка, аномальное поведение

1. Введение

В работе [1] описано возникновение нелинейных гидрофизических возмущений «одна сестра», «две сестры», «три сестры», возникающих при взаимодействии инфрагравитационных морских волн с гравитационными морскими волнами. Показано, что уединённые нелинейные гидрофизические возмущения на фоне регулярного морского волнения возникают при появлении на данном участке квазигармонических солитоноподобных одиночных, двойных или тройных сигналов с основными инфрагравитационными периодами около 5.5, 5.0, 4.5, 3.5 и 2.5 мин большой амплитуды. В относительно спокойные промежутки времени и в различные периоды наблюдений выделяются колебания с подобными периодами, которые мы ранее приписывали инфрагравитационным морским волнам этого района шельфа Японского моря [2]. Данные нелинейные гидрофизические возмущения, частично описанные в работах [3–5], наряду с внутренними морскими волнами и другими гидрофизическими неоднородностями, например вихрями, оказывают существенное влияние на про-

странственно-временную структуру создаваемого гидроакустического поля [6], вносят существенное искажение в параметры создаваемых в воде гидроакустических сигналов, затрудняя решение различных фундаментальных и прикладных задач.

Для учёта влияния гидрофизических неоднородностей различного масштаба на параметры гидроакустических полей надо знать не только особенности этого влияния, но, может самое главное, знать физику возникновения данных неоднородностей, учитывая то, что нелинейные гидрофизические возмущения «потенциальная яма», «одна сестра», «две сестры» и «три сестры» возникают при взаимодействии гармоник спектра гравитационного диапазона (ГД) и инфрагравитационного диапазона (ИГД) при резком возрастании энергии на одной из них. Необходимо изучить особенности энергобаланса энергий гармоник спектра ИГД и ГД. В данной статье одной из задач стоит задача по изучению суммарных энергий гармоник спектра ГД и ИГД с оценкой их влияния на соседние гармоники, а также изучению особенностей возникновения нелинейных гидрофизических возмущений при вариациях энергобаланса меж-

ду суммарной энергией этих гармоник. Эти знания также необходимы при решении задач термометрии океана на основе использования стационарных и мобильных гидроакустических излучающих и приёмных систем [7].

2. Натурные данные

Проанализируем данные, полученные при регистрации вариаций гидросферного давления сверхчувствительным сенсором вариаций гидросферного давления (ССВГД) [8], который был установлен на дне на глубине 25 м на шельфе Японского моря и проработал там с 1 августа по 15 ноября 2022 года. При анализе основное внимание уделялось морскому волнению ГД (1–25 с) и ИГД (15 с – 8 мин).

Данные ССВГД предварительно были обработаны низкочастотным фильтром Хэмминга с граничной частотой 1 Гц и прорежены до частоты дискретизации 2 Гц. Затем выполнялась последовательная обработка данных в два этапа. На первом этапе запись подвергалась высокочастотной фильтрации фильтром Хэмминга длительностью 10000 с граничной частотой 0,0004 Гц. На втором шаге отфильтрованный ряд подвергался фильтрации высокочастотным фильтром длительностью 5000 с граничной частотой 0,002 Гц (8 мин 20 с). Длительность всего ряда составляла 18373329 точек при частоте дискретизации 2 Гц. На рис. 1 приведена конечная запись ССВГД, которая была подвергнута дальнейшей обработке.

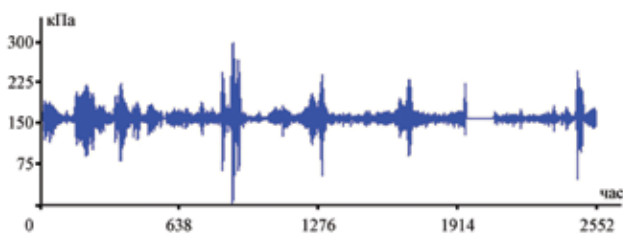


Рис. 1. Отфильтрованная запись ССВГД с 01 августа по 15 ноября 2022 г., точка 0 соответствует времени 00:24:30 GMT

Как видно из этого рисунка, в записи прибора наблюдались пропуски, связанные в основном с перебоями электропитания. Эти пропуски, конечно, при анализе материала были исключены. В ходе выполнения работы было обработано 629 участка записи, содержащих хорошие данные. Процесс обработки выполнялся следующим образом. Первый обрабатываемый ряд начинался с первоначального времени, с 00 ч 24 мин 30.0 с 01 августа 2022 года. Длительность одного обрабатываемого участка была 131072 точки,

что при частоте дискретизации 2 Гц составляло 18 ч 12 мин 16 с. Спектральная обработка выполнялась периодограммным методом с усреднением по 3 точкам. Затем оценивалась суммарная энергия во всём исследуемом диапазоне морских волн, а потом в двух диапазонах – в инфрагравитационном и гравитационном отдельно. ГД брался в пределах от 1 до 25 с, а ИГД брался в пределах от 25 с до 8 мин. Длительность ряда позволяла получать хорошее частотное разрешение, которое равно 0.000015 Гц. Следующим шагом, т.е. вторым, ряд смещался на 26214 точек (3 ч 38 мин 27 с) и проводилась следующая обработка. Все последующие шаги выполнялись строго в такой последовательности. При попадании на участки с отсутствием натуральных данных этот участок пропускался, т.е. в информационный бюллетень вносилось отсутствие данных.

3. Обработка и анализ полученных результатов

Спектральные максимумы в ГД обнаружены в различные временные промежутки на периодах от 22,8 до 1,6 с. При этом можно выделить несколько поддиапазонов гравитационных морских волн. Поддиапазон периодов от 1,6 до 3,6 с относится к ветровым волнам регионального значения, возбуждаемых ветром на полигоне зоны расположения измерительного прибора. Волны с периодами 5–6,5 с относятся к фоновым ветровым волнам (фоновым волнам зыби) Японского моря. Гравитационные морские волны в диапазоне периодов 14–15 с относятся к волнам, возбуждаемым проходящими мощными тайфунами. Со временем к точке измерения приходят волны зыби последовательно со всё уменьшающимися периодами (вследствие дисперсии) вплоть до фоновых волн зыби Японского моря. И совсем уникальные гравитационные морские волны с периодом в диапазоне 22–23 с амплитудами в 10–15 раз меньше амплитуд основных гравитационных морских волн являются волнами зыби океанического происхождения.

На рис. 2 приведена спектрограмма одного из участков записи ССВГД, на которой прослеживаются сразу несколько диапазонов волн. Видны два мощных участка в инфрагравитационном диапазоне, а также возмущения в гравитационном диапазоне на периодах 13–14 и 6 с. В центральной части рисунка видно дисперсионное изменение периодов волнения гравитационных морских волн (волн зыби) начиная с периода около 15,5 с и заканчивая периодом около 7,5 с. Данные волны зыби возникли в Японском море при прохождении в его зоне мощного тайфуна. При

обработке 629 участков записи вариаций гидросферного давления, полученных во время наблюдений начиная с 01 августа 00 ч 24 мин 30 с по 15 ноября 08 ч 15 мин 35 с было установлено, что максимальные амплитуды в ГД в различное время имели морские гравитационные волны с периодами от 14,1 до 5,7 с.

Далее энергия гармоник спектра ГД и ИГД будет рассчитываться по формуле:

$$E_n = (A_n^2)/2,$$

где A_n – амплитуда n-й гармоники.

При обработке 629 участков записи ССВГД была определена суммарная энергия гармоник спектра ГД (2–25 с) и суммарная энергия гармоник спектра ИГД (25 с – 8 мин). При этом было установлено, что в основном поведение суммарной энергии гармоник ГД коррелирует с поведением суммарной энергии гар-

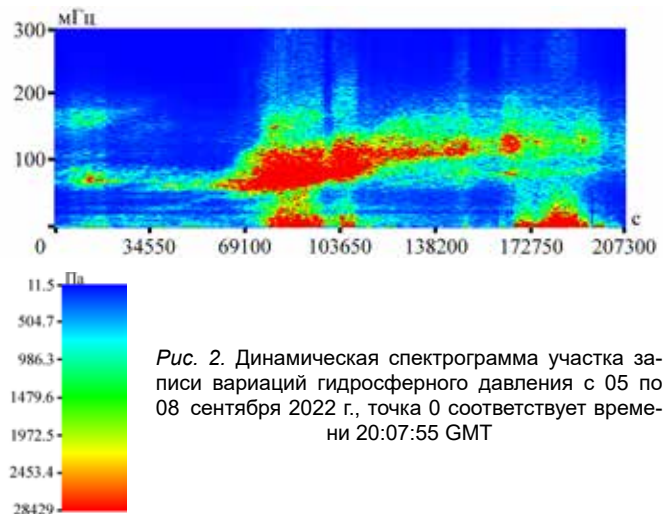
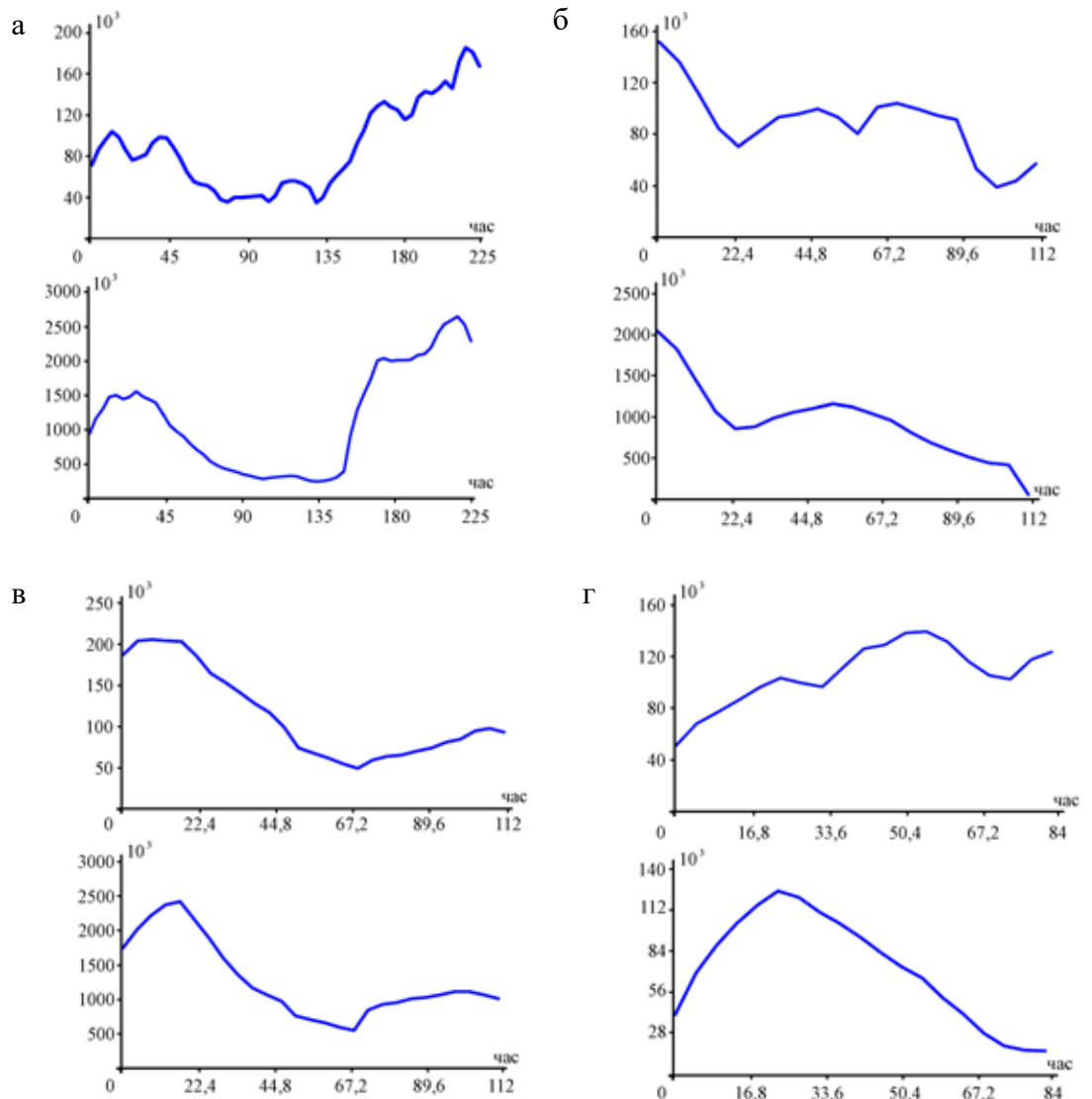


Рис. 2. Динамическая спектрограмма участка записи вариаций гидросферного давления с 05 по 08 сентября 2022 г., точка 0 соответствует времени 20:07:55 GMT

Рис. 3. Изменение суммарной энергии ИГД (верхний график) и ГД (нижний график): а – за промежуток времени с 01.08.2022 по 10.08.2022, точка 0 соответствует времени 04:02:57 GMT; б – за промежуток времени с 10.08.2022 по 15.08.2022, точка 0 соответствует времени 17:25:18 GMT; в – за промежуток времени с 15.08.2022 по 20.08.2022, точка 0 соответствует времени 13:55:42 GMT; г – за промежуток времени с 20.08.2022 по 24.08.2022, точка 0 соответствует времени 21:21:27 GMT



моник ИГД, т.е. увеличение суммарной энергии гармоник ГД сопровождается увеличением суммарной энергии гармоник ИГД, а уменьшение суммарной энергии гармоник ГД сопровождается уменьшением суммарной энергии гармоник ИГД. Графики на рис. 3, *a-z* подтверждают вышесказанное.

При этом суммарная энергия гармоник ГД всегда больше суммарной энергии гармоник ИГД. В проанализированных 629 участках записей сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления отношение суммарной энергии гармоник ГД к суммарной энергии гармоник ИГД меняется в пределах от 1,16 до 19,70.

При величине отношения суммарной энергии гармоник ГД к суммарной энергии гармоник ИГД больше 5,5 во всём спектре выбранных диапазонов максимальный пик в основном находится на гармонике ГД. Как видно из графиков рисунка 3, не всегда увеличение/уменьшение суммарной энергии гармоник ГД сопровождается увеличением/уменьшением суммарной энергии гармоник ИГД. Данное поведение назовём аномальным. Яркий пример такого аномального поведения приведён на рис. 3, *z*.

Из сравнения графиков, приведённых на рис. 3, *z*, на 1/3 части участка наблюдается не аномальное поведение суммарной энергии гармоник ГД и ИГД, но в остальной части графика (около 2/3 части) наблюдается аномальное поведение суммарной энергии гармоник этих диапазонов. В чём же проявляется ещё аномальное поведение суммарной энергии гармоник ГД и ИГД? Прежде всего в том, что при больших значениях отношения суммарной энергии гармоник ГД к суммарной энергии гармоник ИГД является очень большим, а максимальный пик наблюдается не на гармонике ГД, а на гармонике ИГД. Например, во второй части графика, приведённого на рис. 3, *z*, это отношение равно 7,5, а максимальная амплитуда сигнала наблюдается также на гармонике ИГД (4 мин 51,3 с (амплитуда 443 Па)). При отношении 6,5 максимальная амплитуда также наблюдается на гармонике ИГД (4 мин 51,3 с (440 Па)).

Из всего ряда наблюдений отметим другие случаи аномального поведения данного отношения при максимальных гармониках ГД или ИГД. Аномальное поведение вышеотмеченного характера наблюдается при отношении суммарной энергии гармоник ГД к суммарной энергии гармоник ИГД, равном 7,0 (6 мин 16,6 с (494 Па)), 7,8 (6 мин 16,6 с (690 Па)), 7,9 (5 мин 34,4 с (182 Па)), 8,3 (5 мин 36,1 с (172 Па)), 7,9 (4 мин 53,9 с (145 Па)), 8,0 (5 мин 44,9 с (104 Па)), 8,4 (5 мин 00,6 с (122 Па)). Аномальное поведение иногда встречается при другом отношении. Так, при отношении

3,6 максимальная амплитуда сигнала наблюдается не на гармонике ИГД, а на гармонике ГД, в данном случае на гармонике с периодом 5,8 с (127 Па). Подобная аномалия наблюдается и при других отношениях, например, 3,4 (5,8 с (128 Па)), 4,8 (12,0 с (267 Па)), 4,6 (12,1 с (260 Па)), 4,0 (12,3 с (245 Па)), 2,9 (9,3 с (130 Па)), 3,0 (12,8 с (272 Па)).

Природа наблюдаемых аномалий связана с фокусировкой или расфокусировкой гармоник ИГД или ГД, т.е. с концентрацией энергии на отдельных гармониках или расплыванием энергии между гармониками выбранных диапазонов. На рис. 4 приведены спектры, полученные при обработке одного из участков записи сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления, на котором видны фокусировка гармоник ИГД (см. нижний график) и расфокусировка гармоник ГД. При этом отношение суммарной энергии гармоник ГД к суммарной энергии гармоник ИГД равно 8,4.

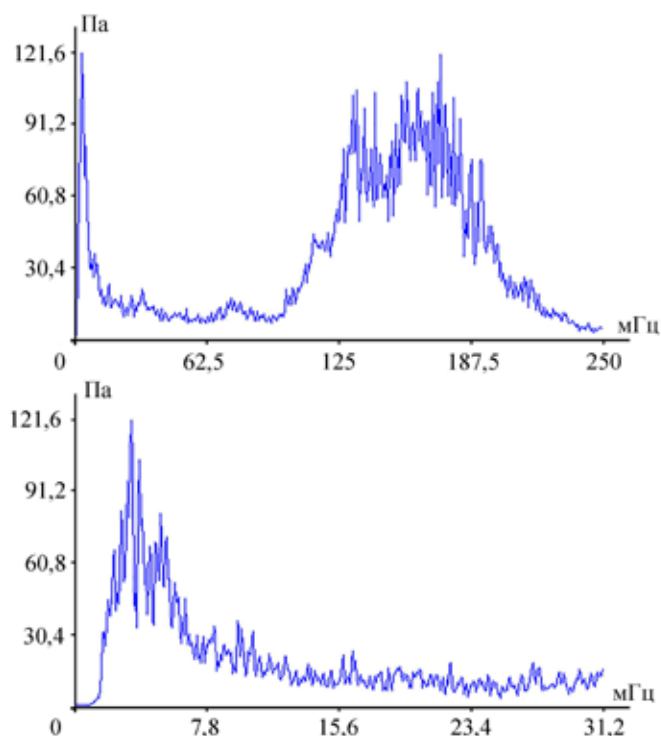


Рис. 4. Спектры участка записи ССВГД

Совсем противоположные, более аномальные, случаи наблюдаются при расфокусировке гармоник ИГД и фокусировке гармоник ГД. На рис. 5 приведены спектры одного из участков записей ССВГД при отношении суммарной энергии гармоник ГД к суммарной энергии гармоник ИГД, равном 3,1. Случаи этих аномальных ситуаций наиболее интересные, так как расфокусировка гармоник ИГД в отдельных слу-

чаях сопровождается в дальнейшем фокусировкой этих же гармоник с последующим взаимодействием гармоник ИГД с гармониками ГД и возникновением аномальных волн большой амплитуды типа «одна сестра», «две сестры», «три сестры». Эти последовательные моменты фокусировки и расфокусировки гармоник ИГД аналогичны нелинейному механизму возврата Ферми–Пасты–Улама.

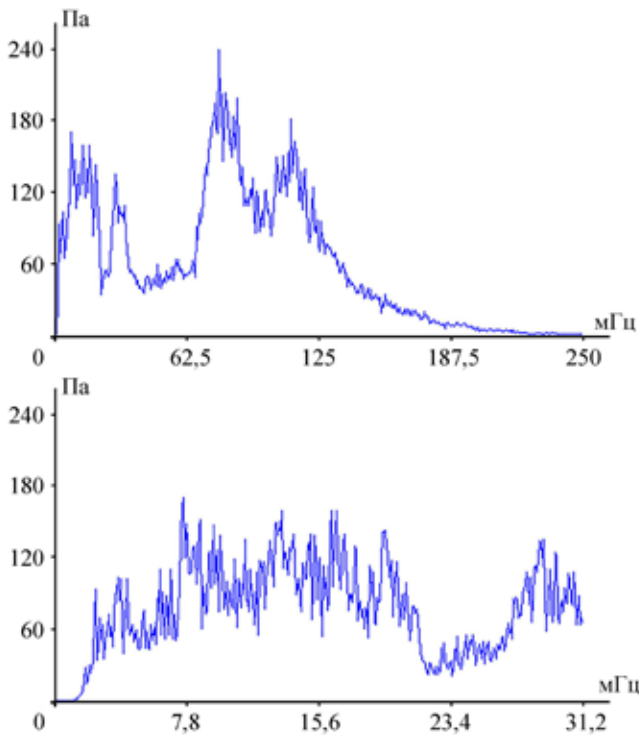


Рис. 5. Спектры участка записи ССВГД

4. Заключение

Проведенные исследования данных ССВГД в диапазоне морского волнения с периодами от 1 с до 8 мин показали, что суммарная энергия гармоник спектра ГД больше суммарной энергии гармоник спектра ИГД. Было выявлено, что при отношении суммарных энергий гармоник ГД и ИГД больше 5,5 максимальный пик находится на гармонике ГД, а при отношении, меньшем 5,5, максимальный пик почти всегда находится на гармонике ИГД.

Аномальные случаи нахождения максимальных пиков спектра наблюдаются при отношении суммарных энергий гармоник со значениями, которые сильно отличаются от 5,5. Так, при величине этого отношения, равном 2,9, 3,0, 3,4, максимальный пик находится не на гармонике ИГД, а на гармонике ГД. А при величине этого отношения, равном 8,4, 8,3, 8,0, и других больших числах, максимальный пик находится не на гармонике ГД, а на гармонике ИГД. Аномальные случаи наблюдаются при расфокусировке гармоник исследуемых диапазонов. При расфокусировке и последующей фокусировке гармоник ИГД и последующем взаимодействии с гармониками ГД возникают аномальные волны большой амплитуды типа «одна сестра», «две сестры», «три сестры». Такое поведение гармоник ИГД аналогично нелинейному механизму возврата Ферми–Пасты–Улама.

Работа выполнена при частичном финансировании гранта Российского научного фонда № 22-27-00678, «Микродеформации земной коры, вызванные морскими инфрагравитационными волнами по данным лазерно-интерференционных приборов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Швец В.А., Яковенко С.В. Особенности взаимодействия инфрагравитационных и ветровых морских волн // Подводные исследования и робототехника. 2023. №2 (44). С. 57–66. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_05. EDN: PAIRBR.
2. Алексеев А.В., Валентин Д.И., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Швец В.А., Яковенко С.В., Холодкевич Е.Д. Регистрация инфрагравитационных волн на границе «гидросфера–литосфера» береговым лазерным деформографом // Доклады Академии наук. 2003. Т. 389, № 2. С. 244–246.
3. Christou, M.; Ewans, K. Field Measurements of RogueWater Waves // J. Phys. Oceanogr. 2014. Vol. 44. P. 2317–2335.
4. Dolgikh G.; Dolgikh S.; Chupin V.; Ovcharenko V.; Shvets V.; Yakovenko S. Registration of Nonlinear Hydrophysical Disturbances - RogueWaves in Full-Scale Conditions // J. Mar. Sci. Eng. 2022. 10, 1997. <https://doi.org/10.3390/jmse10121997>.
5. Shurgalina, E.G.; Pelinovsky, E.N. Development of freak swell wave in a weak wave field // Fundam. Appl. Hydrophys. 2012. Vol. 5. P. 77–88.
6. Борисов С.В., Кабанов Н.Ф., Рутенко А.Н. Экспериментальные исследования флуктуации акустического поля на стационарных трассах // Акуст. журн. 1996. Т. 42, №. 3. С. 347–358.
7. Dushaw, B.D.; Sagen, H.; Beszczynska-Möller, A. Sound speed as a proxy variable to temperature in Fram Strait // J. Acoust. Soc. Am. 2016. Vol. 140. P. 622–630.
8. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Plotnikov A. Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations // Sensors. 2020. Vol. 20(23). P. 6998. doi:10.3390/s20236998

Об авторах

ДОЛГИХ Григорий Иванович, академик РАН, профессор, д.ф.-м.н., директор

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки. Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: волны, инфразвук, звук, гидро- и сейсмоакустика, физика землетрясений и цунами, взаимодействие геосфер, собственные колебания геосфер, линейные и нелинейные процессы, лазерно-интерференционные системы.

Тел.: +7(423)2311400, **факс:** +7(423)2312573

E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-2806-3834

ДОЛГИХ Станислав Григорьевич, д.т.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки. Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: лазерно-интерференционные измерительные системы, интерферометр Майкельсона, инфразвуковые колебания, сейсмоакустика, волновые процессы в океане, природные катастрофы.

Тел.: +7(423)2312598, **факс:** +7(423)2312573

E-mail: sdolgikh@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-9828-5929



Для цитирования:

Долгих Г.И., Долгих С.Г. ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГОБАЛАНСА ГАРМОНИК ГРАВИТАЦИОННОГО И ИНФРАГРАВИТАЦИОННОГО ДИАПАЗОНОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ // Подводные исследования и робототехника. 2023. №. 4 (46). С. 63–69. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_46_04_06. EDN: SORENK.



FEATURES OF THE ENERGY BALANCE OF THE HARMONICS OF THE GRAVITATIONAL AND INFRAGRAVITY RANGES

G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh

The article analyzes data on changes in the hydrosphere pressure of the gravitational and infra-gravitational ranges obtained using an ultra-sensitive sensor of variations in hydrosphere pressure installed at a depth of 25 m at the bottom on the shelf of the Sea of Japan. It is established that the change in the total energy of the harmonics of the sea waves of the infragravity range almost always correlates with the change in the total energy of the harmonics of the sea waves of the gravitational range. In rare cases, this is not the case, i.e. anticorrelation behavior is observed. The anticorrelation behavior of the total energy of the harmonics of the gravitational range and the total energy of the harmonics of the infragravity range is associated with the defocusing of the harmonics of the gravitational or infragravity ranges. The total energy of the harmonics of the gravitational range is always greater than the total energy of the harmonics of the infragravity range.

Key words: sea excitement, gravitational range, infragravitational range, focusing, defocusing, abnormal behavior

References

1. Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Features of the interaction of infragravity and wind sea waves. *Underwater investigations and robotics*. 2023. No. 2(44). PP. 57-66. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_05. EDN: PAIRBR.
2. Alekseev A.V., Valentin D.I., Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V., Kholodkevich E.D., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Registration of infragravity waves at the hydrosphere-lithosphere boundary using coastal laser strainmeter. *Doklady Earth Sciences*. 2003. Vol. 389. No. 2. P. 291-293.
3. Christou M., Ewans K. Field Measurements of RogueWater Waves. *J. Phys. Oceanogr.* 2014. Vol. 44. PP. 2317-2335.
4. Dolgikh G., Dolgikh S., Chupin V., Ovcharenko V., Shvets V., Yakovenko S. Registration of Nonlinear Hydrophysical Disturbances - RogueWaves in Full-Scale Conditions. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1997. <https://doi.org/10.3390/jmse10121997>.
5. Shurgalina E.G., Pelinovsky E.N. Development of freak swell wave in a weak wave field // *Fundam. Appl. Hydrophys.* 2012. 5. PP. 77-88.
6. Borisov S.V., Kabanov N.F., and Rutenko A.N. Experimental study of sound field fluctuations on fixed paths. *Acoustical Physics*. 1996. Vol. 42. PP. 347-358.
7. Dushaw, B.D.; Sagen, H.; Beszczynska-Möller, A. Sound speed as a proxy variable to temperature in Fram Strait. *J. Acoust. Soc. Am.* 2016, 140, 622-630.
8. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Plotnikov A. Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations. *Sensors*. 2020. Vol. 20(23). 6998. doi:10.3390/s20236998

Recommended citation:

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G. FEATURES OF THE ENERGY BALANCE OF THE HARMONICS OF THE GRAVITATIONAL AND INFRAGRAVITY RANGES. *Underwater investigations and robotics*. 2023. No. 4 (46). P. 63-69. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_46_04_06. EDN: SORENK.

About the authors

DOLGIKH Grigory Ivanovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director.

Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: waves, infrasound, sound, hydro- and seismoacoustics, physics of earthquakes and tsunamis, interaction of geospheres, natural oscillations of geospheres, linear and nonlinear processes, laser-interference systems.

Phone: +7(423)2311400, **fax:** +7(423)2312573

E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-2806-3834.

DOLGIKH Stanislav Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory.

Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

Address: 43, Baltiyskaya st., Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: laser-interference measuring systems, Michelson interferometer, infrasonic oscillations, seismoacoustics, wave processes in the ocean, natural disasters

Phone: +7(423)2312598, **fax:** +7(423)2312573

E-mail: sdolgikh@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0001-9828-5929.