

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНФРАГРАВИТАЦИОННЫХ И ВЕТРОВЫХ МОРСКИХ ВОЛН

Г.И. Долгих, С.Г. Долгих, В.А. Швец, С.В. Яковенко

Представлены результаты анализа данных лазерного измерителя вариаций гидросферного давления, установленного на шельфе Японского моря на глубине 25 метров. При обработке данных основное внимание было уделено вариациям гидросферного давления в диапазоне периодов инфрагравитационных и ветровых морских волн. На фоне регулярного морского волнения возникают уединенные нелинейные гидрофизические возмущения большой амплитуды с основными инфрагравитационными периодами от 2.5 до 5.5 мин. Было выявлено, что квазигармонические солитоноподобные одиночные, двойные или тройные образования, взаимодействуя с поверхностным ветровым волнением, образуют нелинейные гидрофизические возмущения типа «потенциальная яма», «одна сестра», «две сестры», «три сестры». При появлении этих возмущений максимальная амплитуда наблюдается для гармоник инфрагравитационного диапазона, а до и после появления максимум имеет гармоника гравитационного диапазона.

Ключевые слова: инфрагравитационные волны, ветровые морские волны, лазерный измеритель вариаций гидросферного давления, волны-убийцы.

1. Введение

Известно, что акустические методы и средства широко используются для диагностики различных сред, обеспечения надёжной и бесперебойной связи, решения поисковых, мониторинговых и прикладных задач, в том числе задач двойного назначения. Наиболее эффективно акустические методы и средства, более правильно названные гидроакустическими методами и средствами, применяются при решении фундаментальных и прикладных задач в области Мирового океана. В связи с глобальными изменениями климата в гидроакустике появилось новое направление исследований, названное термометрией [1], которое решает в том числе задачи дистанционного мониторинга вариаций температуры на гидроакустических трассах протяжённостью свыше 1000 км с изучением причин данных вариаций [2], которые могут быть вызваны различными гидрофизическими процессами.

Для решения задач термометрии, а также практически абсолютно всех гидроакустических задач необходимо понимание физики взаимодействия гидроакустических полей с разномасштабными гидрофизическими полями. Известно, что параметры гидроакустических полей сильно меняются при вза-

имодействии с полем внутренних морских волн [3], которые также связаны с разномасштабными полями температуры, т.е. можно сказать, что при этом происходит также решение задач термометрии. Там же сказано о влиянии ветровых поверхностных волн на амплитудно-фазовые вариации гидроакустических сигналов, распространяющихся на конкретных трассах. В данном случае мы можем говорить не о влиянии температуры, а о влиянии вариаций гидросферного давления на параметры конкретного гидроакустического поля, т.е. мы должны учитывать особенности строения среды распространения гидроакустических сигналов, к которым кроме поверхностных ветровых волн можно отнести разномасштабные вихри, стоячие морские волны, течения, сейши, инфрагравитационные морские волны и т.п.

Но в последнее время в гидрофизике стали особенное внимание уделять нелинейным образованиям, которым присвоено экзотическое название «волн-убийц» [4]. Мы больше склоняемся к названию «уединённые нелинейные гидрофизические возмущения», чем к пугающему «волны-убийцы». Понятно, что такие, довольно часто встречающиеся в море нелинейные гидрофизические возмущения, при взаимодействии с гидроакустическим полем

должны оказывать на его амплитудно-фазовые характеристики довольно сильное влияние. Чтобы изучить степень их взаимодействия, необходимо понять физику образования этих возмущений. В последней своей работе на данную тему мы обратили внимание на физику образования различных уединённых нелинейных возмущений в гравитационном и инфрагравитационном диапазонах [5]. Особенно интересны процессы образования нелинейных возмущений, получивших названия «одна сестра», «две сестры», «три сестры» [6]. В работе [6] физику их образования связывают с нелинейным взаимодействием поверхностных волн внутри гравитационного диапазона, а в нашей работе [5] утверждается, что данные нелинейные образования возникли в результате нелинейного взаимодействия гравитационных и инфрагравитационных морских волн. С целью более глубокого изучения их возникновения мы провели обработку, анализ и интерпретацию натурных данных, полученных на лазерном измерителе вариаций гидросферного давления, который в течение нескольких месяцев проводил измерение вариаций гидросферного давления на дне на глубине 25 м в южном направлении от м. Шульца.

2. Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления

Очень удачная конструкция лазерного измерителя вариаций гидросферного давления была воплощена в приборе [7], который активно использовался в различных экспериментальных исследованиях. Но наиболее удачным прибором стал сверхчувствительный сенсор вариаций гидросферного давления, подробное описание которого приведено в [8].

На рис. 1 приведён внутренний вид прибора, созданного на основе применения модифицированного интерферометра Майкельсона гомодинного типа и частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, обеспечивающего стабильность частоты излучения в девятом знаке. Он помещается в цилиндрический корпус из нержавеющей стали, который закрепляется в защитной решётке, предназначенной для защиты прибора в сложных эксплуатационных условиях (скалистое или илистое дно). Одна сторона имеет отверстие под кабель-ввод. Другая сторона герметично закрывается крышкой. Помимо защитной клетки снаружи прибора расположена эластичная емкость с воздухом, выходное отверстие которой с помощью трубки соединено с компенсационной камерой, расположенной в съёмной крышке. Внутри корпуса находятся интерферометр Майкельсона,

компенсационная камера, электромагнитный клапан и цифровая система регистрации.

Чувствительным элементом сверхчувствительного сенсора является круглая мембрана, которая фиксируется с торца прибора. С внешней стороны мембрана взаимодействует с водой. На внутренней стороне мембраны закреплено зеркало, которое входит в состав системы «глаз кошки», состоящей из двояковыпуклой линзы с соответствующим фокусным расстоянием и данного зеркала. Зеркало с линзой входит в состав измерительного плеча интерферометра. Оно, жестко закрепленное в центре мембраны, под воздействием вариаций давления гидросферы смещается вдоль оси интерферометра. Изменение длины измерительного плеча приводит к изменению интенсивности интерференционной картины, которое фиксируется цифровой системой регистрации. Выходным сигналом сверхчувствительного сенсора, после предварительной обработки цифровой системой регистрации, являются вариации давления гидросферы.

Для поддержания чувствительного элемента (мембраны) в нейтральном положении при погружении прибора на рабочую глубину используется встроенная система компенсации внешнего давления (рис. 2). Для сохранения нейтрального положения мембраны (4) во время погружения прибора на рабочую глубину открывается электромагнитный клапан (9). Воздух из внешнего гибкого резервуара с воздухом (1) под действием давления гидросферы по армированному шлангам (3 и 10) поступает в ком-



Рис. 1. Внутренний вид сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления

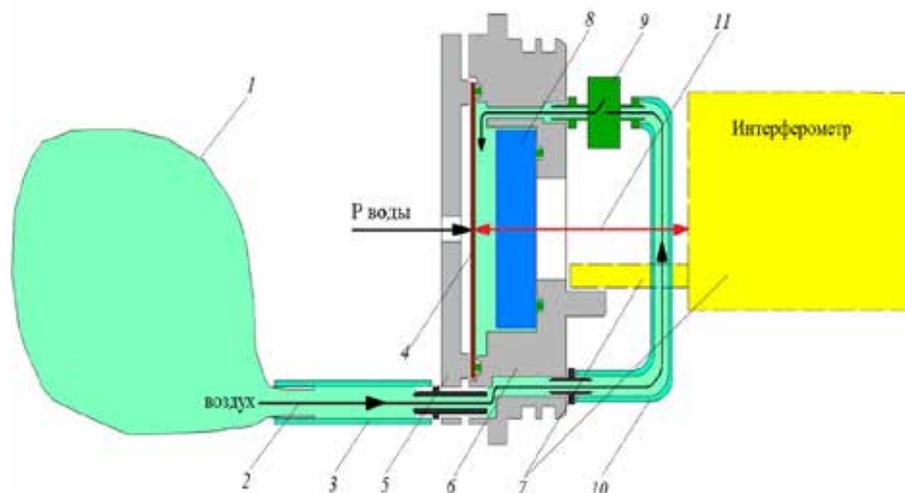


Рис. 2. Схема системы компенсации внешнего давления.

1 – емкость с воздухом, 2 – направление движения воздуха, 3 – соединительная трубка, 4 – мембрана, 5 – защита мембраны, 6 – основа съемной крышки, 7 – интерферометр, 8 – оптическое окно, 9 – клапан, 10 – соединительная трубка, 11 – лазерный луч

пенсационную камеру (8). Уравновешивание внешнего давления и давления внутри камеры приводит к установке мембраны в нейтральное положение. Когда прибор устанавливается на рабочую глубину, клапан закрывается и начинается работа прибора по регистрации вариаций давления гидросферы. Данная схема установки прибора применяется для любой рабочей глубины, и всегда в начальный момент времени мембрана устанавливается в нейтральное положение.

На рис. 3 представлена упрощенная оптическая схема интерферометра Майкельсона, которая реализована в сверхчувствительном сенсоре. В интерферометре применяется частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер фирмы Melles Griott, обеспечивающий стабильность частоты лазерного излучения в девятом знаке. Принцип работы интерферометра заключается в следующем. Из лазера (5) с закрепленным на нем коллиматоре выходит стабилизированный луч, который делится на две равноценные части на плоскопараллельной

пластине (6). Первая (эталонная) часть луча проходит через зеркала раскачки (9) и компенсации (10), закрепленные на пьезокерамических цилиндрах, попадает на фотоприемник (7). Вторая (измерительная) часть луча с помощью вспомогательного зеркала (8) проходит через собирающую линзу (4) и жестко закрепленное в центре мембраны зеркало и попадает на фотоприемник (7). Эталонный и измерительный луч, взаимодействуя между собой, образуют интерференционную картину на фотоприемнике. Данный интерферометр Майкельсона является обычным интерферометром Майкельсона гомодинного типа, в котором вместо трипель-призмы

(отражающего зеркала и т.п.) используется система «глаз кошки» с закреплённым на мембране зеркалом. В интерферометре используется классический метод обработки сигнала, основанный на фазовом детектировании, который в настоящее время позволяет измерять изменение разности длин плеч интерферометра с точностью до 1 пм. Но данная точность может быть ниже из-за наличия внешних шумов, уровень которых может быть выше. В данной установке на пьезокерамику раскачки (9) подается переменное напряжение частотой 100 кГц. При необходимости это позволяет существенно расширить рабочий диапазон

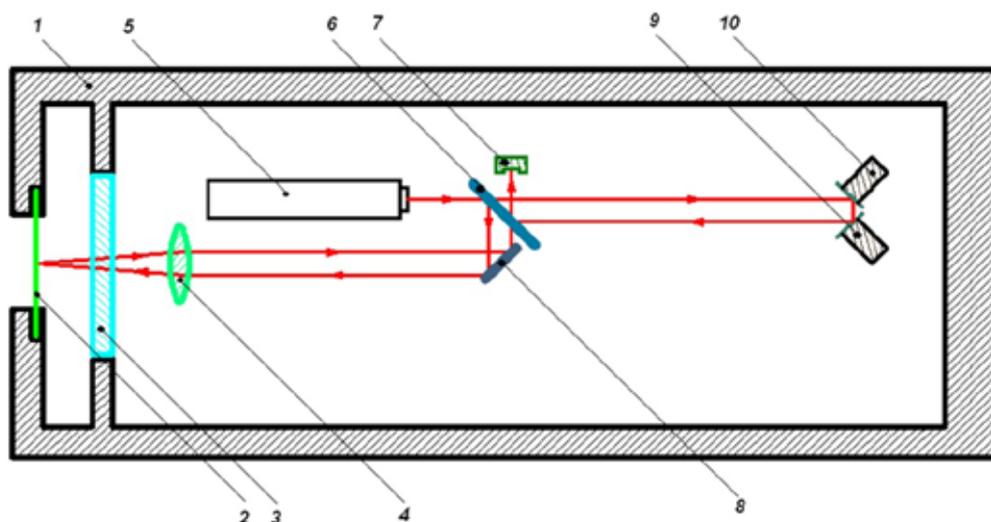


Рис. 3. Оптическая схема.

1 – корпус, 2 – мембрана с закрепленным в центре зеркалом, 3 – оптическое окно, 4 – линза, 5 – лазер, 6 – плоскопараллельная делительная пластина, 7 – фотоприемник, 8 – юстировочное отражающее зеркало, 9 – пьезокерамика раскачки с отражающим зеркалом, 10 – пьезокерамика компенсации с отражающим зеркалом

частот до 10 кГц вместо 1 кГц. Это может быть необходимо при решении различных гидроакустических задач, а также задач, связанных с изучением коммуникационных сигналов морских млекопитающих, а также сигналов, создаваемых другими морскими биообъектами. Лазерные лучи, проходящие эталонное плечо (6, 9, 10) и измерительное плечо (6, 8, 4, 3, 2), сбиваются на фотоприёмнике (7), образуя там интерференционную картину, промодулированную напряжением раскачки. Данная модуляция необходима для определения величины изменения фазы между опорным и измерительным лучами, а также определения направления этого изменения, которое выполняется цифровой системой регистрации. Все конструктивные блоки цифровой системы регистрации (генератор эталонных сигналов, фазовый детектор, система сброса уровней и т.п.) собраны на микропроцессорной основе и 24-разрядных цифроаналоговых преобразователей. Применение современных быстродействующих микропроцессоров и 24-разрядных цифроаналоговых преобразователей позволило существенно расширить рабочий диапазон сенсора и поднять его чувствительность. Рабочий динамический диапазон интерферометра простирается от 0.315 мкм (расстояние от одного максимума интерференционной картины до любого соседнего) до наименьшей квантовой величины, определяемой быстродействием микропроцессоров и 24-разрядных цифроаналоговых преобразователей. С учётом необходимости отведения под знаки (+ или -) двух разрядов наименьшая квантовая величина будет равна 0.075 пм. Данная величина пока недостижима, что связано с большим уровнем шумов фотоэлектронной аппаратуры, нестабильностью частоты лазера, вариациями мощности лазерного излучения и т.п. Уменьшение этих шумов за счёт применения схемы равноплечего интерферометра Майкельсона позволяет надеяться на достижение предельной величины измерения набега фазы лазерного луча.

Созданный сверхчувствительный сенсор вариаций гидросферного давления на основе интерферометра Майкельсона равноплечего типа, обладающий уникальными амплитудно-частотными характеристиками, предназначен для измерения вариаций ги-

дросферного давления с наноуровневой точностью в инфразвуковом и звуковом диапазонах в большом динамическом диапазоне. Основные его технические характеристики: рабочий диапазон от 0 (условно) до 1000 Гц, точность измерения вариаций гидросферного давления 0.24 мПа, рабочие глубины до 50 м. Возможно получение предельных технических характеристик при уменьшении шумов фотоэлектронной аппаратуры, компенсации температурных шумов, более точном уравнивании разности длин измерительного и эталонного плеч интерферометра, которые соответствуют следующим расчётным параметрам: рабочий диапазон от 0 (условно) до 10000 Гц, точность измерения вариаций гидросферного давления 1.8 мкПа.

3. Обработка и анализ данных сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления

В статье анализируются натурные данные, полученные на сверхчувствительном сенсоре вариаций гидросферного давления, установленном на глубине 25 м на дне в южном направлении от м. Шульца, который проработал там с 1 августа по 15 ноября 2022 года. Место расположения приведено на рис. 4. Перед выполнением анализа полученных данных в гравитационном и инфрагравитационном диапазонах мы профильтровали их полосовым фильтром Хэмминга в полосе 0.002–2 Гц, что позволило анализировать данные в полосе периодов от 8 мин до 1 с, в которую попадают поверхностные ветровые волны



Рис. 4. Место расположения лазерных деформографов (ЛД) и сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления (ЛДВГД)

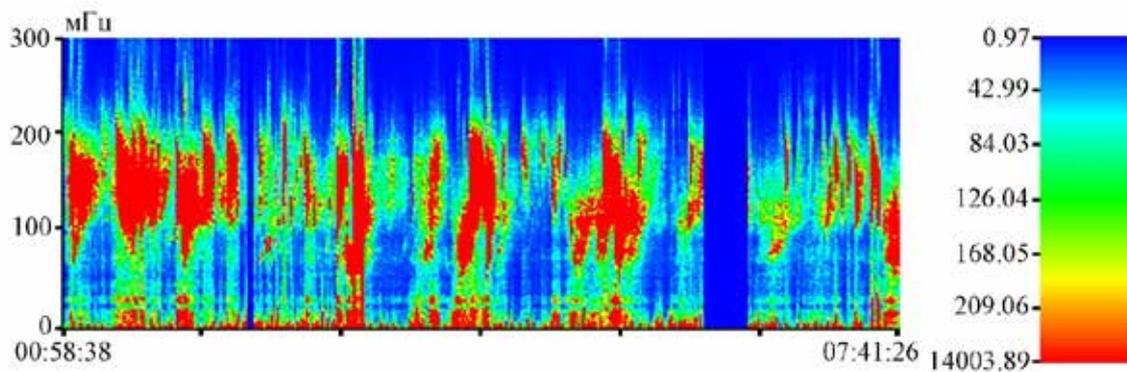


Рис. 5. Спектрограмма отфильтрованной записи сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления за период с 01 августа по 15 ноября 2022 г. Справа – легенда

в диапазоне периодов от 2 до 20 с, а также инфрагравитационные волны, наблюдаемые в данной акватории ранее [9]. На рис. 5 приведена спектрограмма отфильтрованного ряда за весь период наблюдения, где выделяется диапазон гравитационных морских волн (поверхностные ветровые волны и волны зыби), а также менее энергоёмкий диапазон инфрагравитационных морских волн. В инфрагравитационном диапазоне выделяются довольно устойчивые, наблюдаемые почти всегда колебания в диапазоне периодов 31–33 с, которые характерны для высокочастотных инфрагравитационных волн и которые, по-видимому, определяются батиметрией конкретной области шельфа.

Далее проанализируем записи сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления на предмет присутствия в них аномальных сигналов, амплитуды которых сильно отличаются от амплитуд близлежащих сигналов. Простейшим примером уединённых нелинейных гидрофизических возмущений является возмущение, приведённое на рис. 6. Как видно из данного рисунка, характер и амплитуда данной аномалии сильно отличаются от близлежащей записи прибора. При спектральной обработке одинаковых по размеру участков записей (1024 точки при частоте дискретизации 2 Гц) до аномального сигнала, во время аномального сигнала и после аномального сигнала установлено, что спектры записи до и после аномального сигнала по суммарной мощности примерно одинаковые, а суммарная мощность во время аномального сигнала в 2–2.5 раза больше. Это происходит за счёт появления в спектре инфрагравитационных сигналов с периодами около 3 мин 39.8 с (амплитуда равна 1686.7 Па) и 1 мин 18.4 с (амплитуда равна 1676.7 Па).

В гравитационном диапазоне выделяется пик с периодом 6.4 с (амплитуда равна 722.9 Па). Обработка сигнала проведена с помощью спектрального метода максимального правдоподобия при числе гармоник 20. При обработке участка записи прибора до аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 6.2 с (амплитуда равна 1688.7 Па), 3 мин 56.8 с (амплитуда равна 1219.7 Па), 5.7 с (амплитуда равна 1076.4 Па). При обработке участка записи прибора после аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 5.7 с (амплитуда равна 1157.7 Па), 5.2 с (амплитуда равна 999.2 Па), 7.4 с (амплитуда равна 617.6 Па) и 8.0 с (амплитуда равна 560.9 Па). Из выше сказанного можно отметить, что при аномальном сигнале максимальная амплитуда наблюдается для гармоники инфрагравитационного диапазона, а до и после аномального сигнала максимум имеет гармоника гравитационного диапазона.

Более сложным примером уединённых нелинейных гидрофизических возмущений является возмущение, приведённое на рис. 7. При спектральной обработке одинаковых по размеру участков записей (1024 точки при частоте дискретизации 2 Гц) до аномального сигнала, во время аномального сигнала и после аномального сигнала установлено, что спектры записи до и после аномального сигнала по сум-

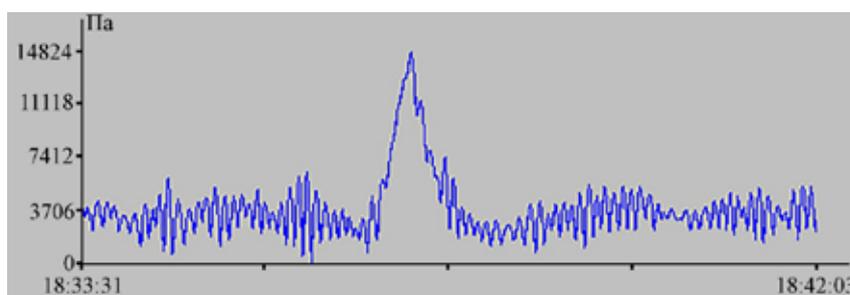


Рис. 6. Участок записи сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления за 11 сентября 2022 г.

марной мощности примерно одинаковые, а суммарная мощность во время аномального сигнала в 5 раз больше. Это происходит за счёт появления в спектре инфрагравитационного сигнала с периодом около 4 мин 40.4 с (амплитуда равна 5353.8 Па). В гравитационном диапазоне выделяется пик с периодом 8.0 с (амплитуда равна 999.4 Па). Обработка сигнала проведена с помощью спектрального метода максимального правдоподобия при числе гармоник 20. При обработке участка записи прибора до аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 7.8 с (амплитуда равна 1412.9 Па), 8.7 с (амплитуда равна 939.2 Па), 7.0 с (амплитуда равна 427.4 Па) и 2 мин 57.4 с (амплитуда равна 425.2 Па). При обработке участка записи прибора после аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 8.4 с (амплитуда равна 3423.2 Па), 7.0 с (амплитуда равна 1331.9 Па). Из выше сказанного этого абзаца можно отметить, что при аномальном сигнале максимальная амплитуда наблюдается для гармоники инфрагравитационного диапазона, а до и после аномального сигнала максимум имеет гармоника гравитационного диапазона.

В записях сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления наблюдаются классические примеры уединённого возмущения «потенциальная яма», пример одной из которых приведён на рис. 8. При спектральной обработке одинаковых по размеру участков записей (1024 точки при частоте дискретизации 2 Гц) до аномального сигнала, во время аномального сигнала и после аномального сигнала установлено, что спектры записи до и после аномального сигнала по суммарной мощности примерно одинаковые, а суммарная мощность во время аномального сигнала в 2.5–3 раза больше. Это происходит за счёт появления в спектре инфрагравитационных сигналов с периодами около 4 мин 28.6 с

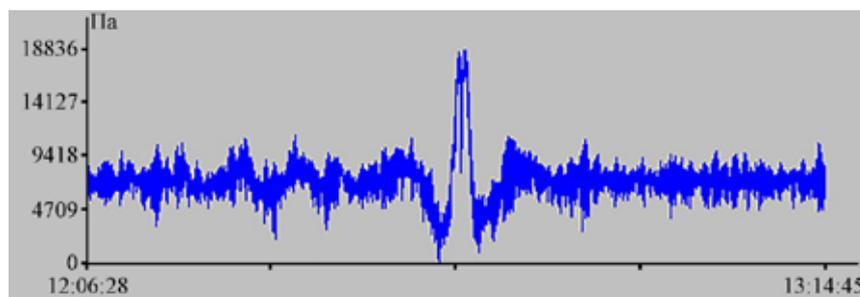


Рис. 7. Участок записи сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления за 02 сентября 2022 г.

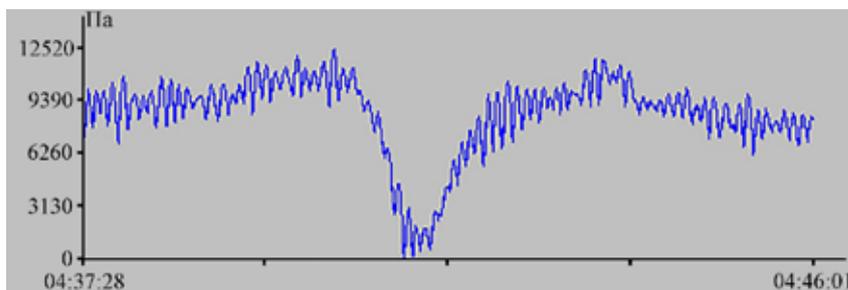


Рис. 8. Участок записи сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления за 04 сентября 2022 г.

(амплитуда равна 2685.1 Па) и 2 мин 31.9 с (амплитуда равна 2266.8 Па). В гравитационном диапазоне выделяются пики с периодом 6.4 с (амплитуда равна 1159.2 Па) и 8.6 с (амплитуда равна 701.7 Па). Обработка сигнала проведена с помощью спектрального метода максимального правдоподобия при числе гармоник 20. При обработке участка записи прибора до аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 8.8 с (амплитуда равна 611.2 Па), 6.1 с (амплитуда равна 573.6 Па), 9.5 с (амплитуда равна 428.4 Па). При обработке участка записи прибора после аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 6.0 с (амплитуда равна 438.2 Па), 7.5 с (амплитуда равна 391.7 Па), 8.0 с (амплитуда равна 392.1 Па) и 6.8 с (384.8 Па). Из выше сказанного этого абзаца можно отметить, что при аномальном сигнале максимальная амплитуда наблюдается для гармоники инфрагравитационного диапазона, а до и после аномального сигнала максимум имеет гармоника гравитационного диапазона.

В записях сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления наблюдаются классические примеры уединённого возмущения «две сестры», пример одной из которых приведён на рис. 9. При спектральной обработке одинаковых по размеру участков записей (2048 точек при частоте дискретизации 2 Гц) до аномального сигнала, во время аномального сигнала и после аномального сигнала установлено, что спектры записи до и после аномального сигнала по суммарной мощности примерно одинаковые, а суммарная мощность во время аномального сигнала в 2.5–3 раза больше. Это происходит за счёт появления в спектре инфрагравитационных сигналов с периодами около 4 мин 56.6 с (амплитуда равна 1872.5 Па) и 3 мин 29.3 с (амплитуда равна 1291.7 Па). В гравитационном диапазоне выделяются пики с периодом 5.7 с (амплитуда равна 1734.9

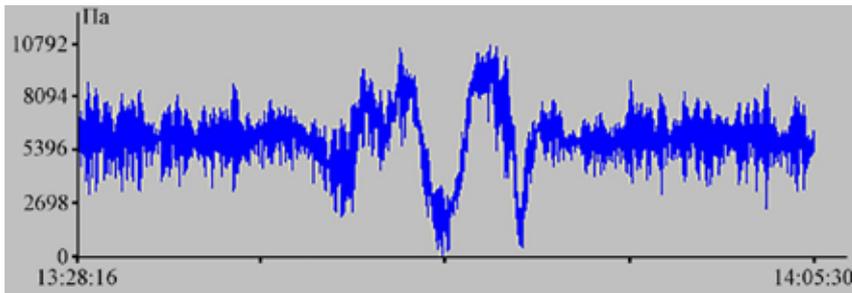


Рис. 9. Участок записи сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления 11 сентября 2022 г.

Па) и 6.9 с (амплитуда равна 595.2 Па). Обработка сигнала проведена с помощью спектрального метода максимального правдоподобия при числе гармоник 20. При обработке участка записи прибора до аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 7.4 с (амплитуда равна 729.5 Па), 6.2 с (амплитуда равна 713.5 Па), 8.0 с (амплитуда равна 536.8 Па) и 5.9 с (амплитуда равна 532.0 Па). При обработке участка записи прибора после аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 6.0 с (амплитуда равна 949.1 Па), 7.4 с (амплитуда равна 557.9 Па), 6.2 с (амплитуда равна 509.2 Па) и 8.6 с (388.6 Па). Из вышесказанного этого абзаца можно отметить, что при аномальном сигнале максимальная амплитуда наблюдается для гармоники инфрагравитационного диапазона, а до и после аномального сигнала максимум имеет гармоника гравитационного диапазона.

В записях сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления наблюдаются классические примеры уединённого возмущения «три сестры», пример одной из которых приведён на рисунке 10. При спектральной обработке одинаковых по размеру участков записей (2048 точек при частоте дискретизации 2 Гц) до аномального сигнала, во время аномального сигнала и после аномального сигнала установлено, что спектры записи до и после аномального сигнала по суммарной мощности примерно одинаковые, а суммарная мощность во время ано-

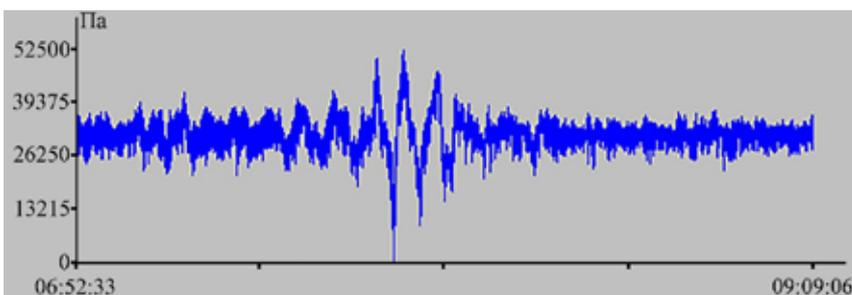


Рис. 10. Участок записи сверхчувствительного сенсора вариаций гидросферного давления за 16 сентября 2022 г.

мального сигнала в 5–5.5 раза больше. Это происходит за счёт появления в спектре инфрагравитационных сигналов с периодами около 5 мин 25.7 с (амплитуда равна 11443.4 Па) и 3 мин 21.9 с (амплитуда равна 7646.1 Па). В гравитационном диапазоне выделяются пики с периодом 5.8 с (амплитуда равна 1766.4 Па). Обработка сигнала проведена с помощью спектрального метода максимального правдоподобия при числе

гармоник 20. При обработке участка записи прибора до аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 7.6 с (амплитуда равна 2106.1 Па), 7.1 с (амплитуда равна 1807.2 Па), 11.4 с (амплитуда равна 1752.2 Па), 13.7 с (амплитуда равна 1636.9 Па). При обработке участка записи прибора после аномального сигнала максимумы наблюдаются с периодами 11.5 с (амплитуда равна 2197.5 Па), 12.4 с (амплитуда равна 1270.9 Па) и 2 мин 02.4 с (амплитуда равна 1784.7 Па). Из вышесказанного этого абзаца можно отметить, что при аномальном сигнале максимальная амплитуда наблюдается для гармоники инфрагравитационного диапазона, а до и после аномального сигнала максимум имеет гармоника гравитационного диапазона.

4. Заключение

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. Данные квазигармонические уединённые образования, «накладывающиеся» на поверхностное ветровое волнение, образуют уединённые нелинейные гидрофизические возмущения типа «потенциальная яма», «одна сестра», «две сестры», «три сестры». В этом случае гравитационные морские волны носят фоновый характер, не внося энергетического вклада в это взаимодействие.

Исследования выполнены за счет средств Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема госзадания № АААА-20-120021990003-3 «Изучение

фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане»).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Dolgikh G., Morgunov Y., Burenin A., Bezotvetnykh V., Luchin V., Golov A., Tagiltsev A. Methodology for the Practical Implementation of Monitoring Temperature Conditions over Vast Sea Areas Using Acoustic Thermometry // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. Vol. 11. No. 137. <https://doi.org/10.3390/jmse11010137>.
3. 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.
4. Christou, M.; Ewans, K. Field Measurements of Rogue Water Waves // *J. Phys. Oceanogr.* 2014. Vol. 44. P. 2317–2335.
5. Dolgikh G., Dolgikh S., Chupin V., Ovcharenko V., Shvets V., Yakovenko S. Registration of Nonlinear Hydrophysical Disturbances – Rogue Waves in Full-Scale Conditions // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10. <https://doi.org/10.3390/jmse10121997>.
6. 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.
7. 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 hydro-sphere pressure variations // *Journ. of marine science and technology.* 2009. Vol. 14. P. 436–442. DOI 10.1007/s00773-009-0062-5.
8. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Plotnikov A. Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations // *Sensors.* 2020. Vol. 20 (23). № статьи: 6998. doi:10.3390/s20236998.
9. 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., Холодкович Е.Д. Регистрация инфрагравитационных волн на границе «гидросфера–литосфера» береговым лазерным деформографом // *Докл. Академии наук.* 2003. Т. 389, № 2. С. 244–246.

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

ШВЕЦ Вячеслав Александрович, к.т.н., старший научный сотрудник
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: лазерный деформограф, лазерный интерферометр, автоматизированные системы, электронные системы, программное обеспечение
Тел.: +7(423)2312598, **факс:** +7(423)2312573
E-mail: vshv@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-4752-6865

ЯКОВЕНКО Сергей Владимирович, к.т.н., ведущий научный сотрудник
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: лазерный деформограф, лазерный нанобарограф, лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, система глобального позиционирования
Тел.: +7(423)2312598, **факс:** +7(423)2312573
E-mail: ser_mail@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0003-3784-9449

Для цитирования:

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.

FEATURES OF THE INTERACTION OF INFRAGRAVITY AND WIND SEA WAVES

G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh, V.A. Shvets, S.V. Yakovenko

The results of data analysis of a laser meter for hydrosphere pressure variations installed on the shelf of the Sea of Japan at a depth of 25 meters are presented. When processing the data, the main attention was paid to variations of hydrosphere pressure in the range of periods of infragravity and wind sea waves. Against the background of regular sea waves, solitary nonlinear hydrophysical disturbances of large amplitude occur with the main infragravity periods from 2.5 to 5.5 minutes. It was revealed that quasi-harmonic soliton-like single, double or triple formations, interacting with surface wind waves, form nonlinear hydrophysical disturbances of the type "potential pit", "one sister", "two sisters", "three sisters". When these disturbances appear, the maximum amplitude is observed for the harmonics of the infra-gravitational range, and before and after the appearance, the maximum is the harmonic of the gravitational range.

Keywords: infragravity waves, wind sea waves, laser meter of hydrosphere pressure variations, killer waves.

References

1. 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.
2. Dolgikh G.; Morgunov Y.; Burenin A.; Bezotvetnykh V.; Luchin V.; Golov A.; Tagiltsev A. Methodology for the Practical Implementation of Monitoring Temperature Conditions over Vast Sea Areas Using Acoustic Thermometry. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 137. <https://doi.org/10.3390/jmse11010137>.
3. 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.
4. Christou, M.; Ewans, K. Field Measurements of RogueWater Waves. *J. Phys. Oceanogr.* 2014. Vol. 44. Pp. 2317–2335.
5. 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>.
6. Shurgalina, E.G.; Pelinovsky, E.N. Development of freak swell wave in a weak wave field. *Fundam. Appl. Hydrophys.* 2012. 5. Pp. 77–88.
7. 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. Pp. 436-442. DOI 10.1007/s00773-009-0062-5.
8. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Plotnikov A. Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations. *Sensors.* 2020. Vol. 20(23). No. статья: 6998. doi:10.3390/s20236998.
9. 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.



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

SHVETS Vyacheslav Aleksandrovich, candidate of technical sciences, senior researcher

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

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

Research interests: laser strainmeter, laser interferometer, automated systems, electronic systems, software

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

E-mail: vshv@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0002-4752-6865

YAKOVENKO Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, leading researcher

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

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

Research interests: laser strainmeter, laser nanobarograph, laser measuring device for hydrosphere pressure variations, global positioning system

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

E-mail: ser_mail@poi.dvo.ru

ORCID: 0000-0003-3784-9449



Recommended citation:

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). P. 57–66. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_05. EDN: PAIRBR.