



[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-7)

EDN UUQXNB

УДК 551.468

© А. В. Багаев*, Ю. Ю. Юровский, Ю. В. Манилюк, А. Ю. Белоконов, В. А. Кальпа, 2025

Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Севастополь, Капитанская ул., д. 2

*a.bagaev1984@gmail.com

Исследование длинноволновых колебаний уровня моря в севастопольских бухтах на основе данных натурных наблюдений

Статья поступила в редакцию 19.03.2025, после доработки 27.05.2025, принята в печать 30.05.2025

Аннотация

Приводится описание массива данных измерений колебаний уровня моря, выполненных с дискретностью 1 мин, в трех бухтах г. Севастополя: Голландия, Карантинная и Круглая. Детально проанализирован отрезок с начала октября по середину декабря, наиболее обеспеченный синхронными измерениями. Спектральный и вейвлет анализы позволили подтвердить проявления описанных ранее приливных колебаний, а также сейш Черного моря. Более детальный анализ спектральных и фазовых диаграмм позволил описать периоды, на которых проявляются локальные собственные моды. Показано, что в рассмотренных бухтах колебания, вызванные приливами, глобальными сейшами Черного моря и шельфовыми сейшами происходят синфазно. Взаимодействие бухт на собственных периодах имеет противофазный характер. Впервые на основе данных натурных наблюдений для системы Севастопольских бухт было показано, как старшие моды более крупной бухты проявляются в колебаниях прилегающих более мелких бухт. Высокие значения когерентности отмечены между колебаниями в бухтах Голландия и Карантинная на собственных периодах Севастопольской бухты, равных 48 и 10 мин. Бухты Круглая и Карантинная активно взаимодействуют между собой на периодах мод Гельмгольца (11,9 мин — период моды Гельмгольца бухты Карантинная; 13,5 мин — период моды Гельмгольца бухты Круглая).

Ключевые слова: Черное море, Севастопольская бухта, сейши, спектральный анализ, вейвлет-анализ, уровень моря

© А. В. Багаев*, Ю. Ю. Юровский, Ю. В. Манилюк, А. Ю. Белоконов, В. А. Кальпа, 2025

Marine Hydrophysical Institute RAS, 2 Kapitanskaya Str., Sevastopol, 299011, Russia

*a.bagaev1984@gmail.com

Long-Wave Sea Level Oscillations Study in Sevastopol Bays via *in situ* Data

Received 19.03.2025, Revised 27.05.2025, Accepted 30.05.2025

Abstract

The paper describes the data set of measurements of sea level oscillations with a discreteness of 1 minute in three bays of Sevastopol: Gollandiya, Karantinnaya and Krouglaya. The period from early October to mid-December, which is the most provided with synchronous measurements, was analyzed in detail. Spectral and wavelet analysis allowed us to confirm the manifestations of the previously described tidal oscillations, as well as the Black Sea seiche. A more detailed analysis of spectral and phase diagrams allowed us to describe the periods at which local eigenmodes are manifested. It is shown that in the considered bays the oscillations caused by tides, global seiches of the Black Sea and shelf seiches occur in-phase. The interaction of the bays on their own periods has an antiphase character. For the first time on the field observations for the Sevastopol bay system, it was shown how the senior

Ссылка для цитирования: Багаев А.В., Юровский Ю.Ю., Манилюк Ю.В., Белоконов А.Ю., Кальпа В.А. Исследование длинноволновых колебаний уровня моря в севастопольских бухтах на основе данных натурных наблюдений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 3. С. 88–100. EDN UUQXNB.

[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-7)

For citation: Bagaev A.V., Yurovsky Yu. Yu., Manilyuk Yu.V., Belokon A. Yu., Kalpa V.A. Long-Wave Sea Level Oscillations Study in Sevastopol Bays via *in situ* Data. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(3):88–100.

[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-7](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-7)

modes of a larger bay manifest themselves in the oscillations of adjacent smaller bays. High values of coherence were noted between the oscillations in the Gollandiya and Karantinnaya Bays at the natural periods of Sevastopol bay equal to 48 and 10 min. Kroug-laya and Karantinnaya Bays actively interact with each other at the Helmholtz mode periods (11.9 min — Helmholtz mode period of Karantinnaya Bay; 13.5 min — Helmholtz mode period of Kroug-laya Bay).

Keywords: Black Sea, Sevastopol Bay, seiches, spectral analysis, wavelets, sea level

1. Введение

Черное море является внутренним морем, в котором приливы выражены слабо, но имеется ряд работ, например [1], в которых на основе хорошо обеспеченных данных натурных наблюдений показано, что на побережье Крыма наиболее интенсивны главная лунная полусуточная составляющая $M_2 = 12,42$ ч и гравитационная лунно-солнечная суточная составляющая $K_1 = 23,93$ ч.

На юго-западе Крымского полуострова в прибрежной части г. Севастополя находится система бухт различных размеров и батиметрии (рис. 1). Гидродинамика в бухтах определяется их батиметрией, преобладанием северо-западных и северо-восточных ветров, а также прилегающим относительно широким шельфом. Выходы всех мелких бухт ориентированы на север, а выход из Большой Севастопольской бухты направлен на запад.

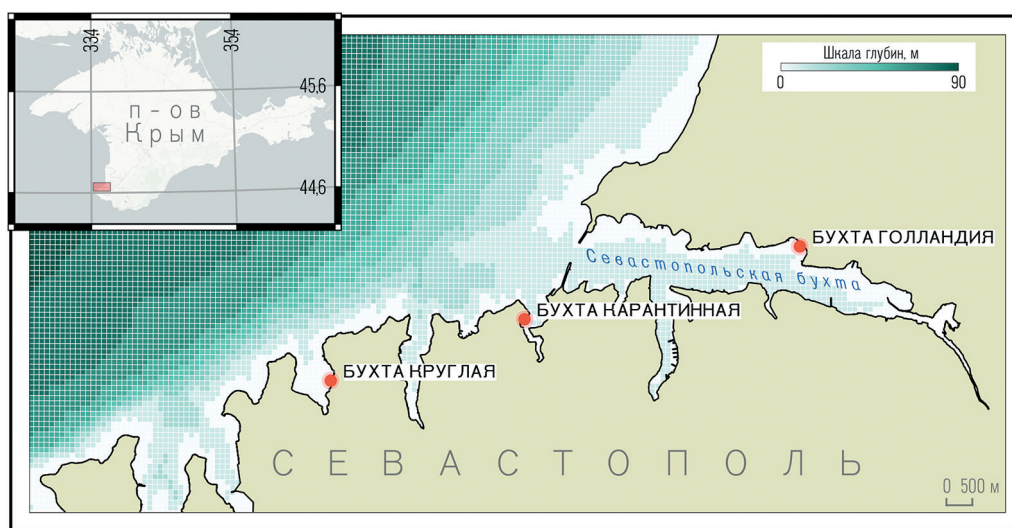


Рис. 1. Схема района исследований. Показана упрощенная батиметрия прилегающего шельфа. Расположение измерителей уровня моря показано оранжевыми маркерами

Fig. 1. The study area. Simplified bathymetry of the adjacent shelf is shown. The location of the tide gauges is shown by orange markers

Кроме неплохо изученной Большой Севастопольской бухты [2], имеется также цепочка более мелких бухт к западу от нее (рис. 1). Однако исследованы они еще недостаточно. Особенно это относится к проведению непосредственных и длительных натурных наблюдений за уровнем моря и течениями. Последние два десятка лет натурные наблюдения носили фрагментарный характер. Океанологические исследования главным образом проводились в Севастопольской бухте. Их основные результаты можно найти в монографии [2]. Стонно-нагонные колебания и сейши в Севастопольских бухтах исследованы также в работе [3]. В частности установлено, что максимальная амплитуда стонно-нагонных колебаний составила 18–34 см.

Ранее было показано [4, 5], что на спектрах океанологических характеристик в бухте Круглая достоверно определяются максимумы на периодах, значения которых превышают теоретические величины периодов локальных собственных мод данной бухты. Высказано предположение, что часть из них может быть проявлением собственных колебаний соседних бухт.

В 2024 г. нам впервые удалось установить мареографы в трех бухтах г. Севастополя (Круглая, Карантинная, Голландия, см. рис. 1) и получить длительные синхронные ряды наблюдений за изменениями уровня моря при различных метеоусловиях.

Целью настоящей работы является выявление различных типов длинноволновых колебаний в сева-
 стопольских бухтах на основе данных натурных наблюдений с помощью методов спектрального анализа.
 Представленные результаты являются логическим продолжением исследований по изучению собственных
 колебаний уровня моря в системе бухт Севастополя и описанию их спектральных характеристик.

1.1. Обзор результатов предыдущих исследований

В начале прошлого века наблюдения за уровнем моря с помощью мареографа осуществлялись на мор-
 ской гидрометеорологической станции Севастополь, расположенной на Павловском мысу. В монографии
 [6] приведена мареограмма за 25 августа 1911 г. (рис. 2, а) с мареографа при Обсерватории Морского ведом-
 ства, расположенном на Павловском мысу.

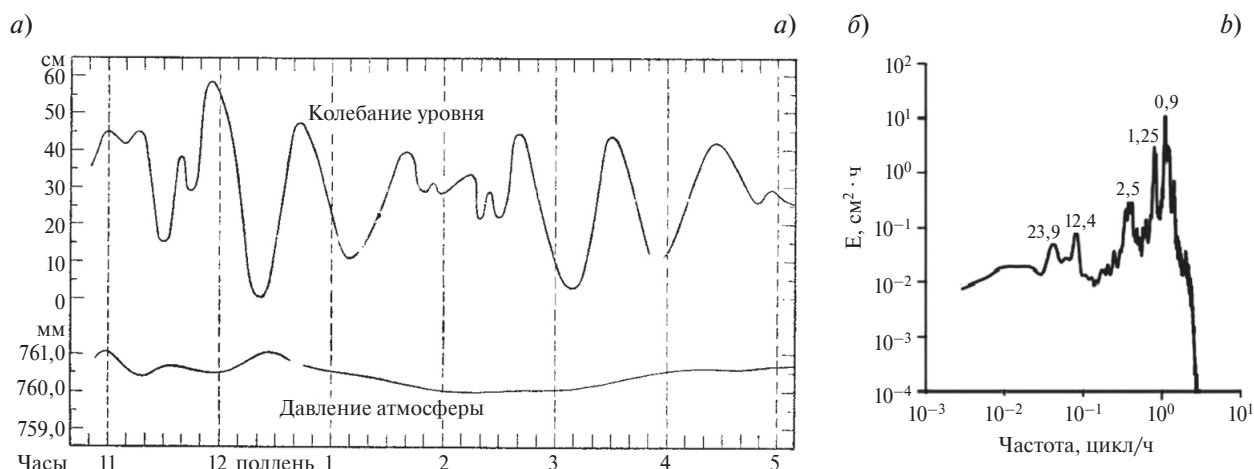


Рис. 2. Сейши в Севастопольской бухте 25 августа 1911 г [6] (а). Спектр колебаний уровня моря в Севастопольской бухте
 для 90-суточной реализации 02.05.2001–30.07.2001 [2]. Показаны периоды для основных пиков, ч (б)

Fig. 2. Seiches in Sevastopol Bay on August 25, 1911 [6] (a). Spectrum of sea level oscillations in Sevastopol Bay for 90-day reali-
 zation 02.05.2001–30.07.2001 [2]. The periods (in hours) for the main peaks are shown (b)

Там же дано описание метеорологической ситуации и самого явления: «Утром прошла гроза над Сева-
 стопольской бухтой, ... Резкое убывание давления в 11 ч утра дало толчок уровню, и он начал колебаться.
 ... Такая амплитуда колебаний в 58 см редко достигается ..., за целый ряд лет наблюдений подобной не за-
 мечено» [6].

В работе [3] приведены результаты обработки данных наблюдений за уровнем на гидрометеорологи-
 ческой станции Севастополь, расположенной на м. Павловский. В 2001 г. там был установлен цифровой
 регистратор, который с помощью магнитной муфты соединялся с барабаном стандартного поплавкового
 мареографа СУМ. Измерения проводились с апреля 2001 г. по сентябрь 2002 г. Во время интенсивных сейш
 кроме основных максимумов на периодах 2,5; 1,25 и 0,9 ч также выделяются локальные максимумы на пе-
 риодах 16,5; 14,6; 12; 10,5; 9,6 мин. При интенсификации сейшевых колебаний их амплитуды достигают
 20 см и более, а у «фоновых» сейш обычно не превышают 3–5 см. Для холодного сезона (февраль–март
 2002 г.) получены аналогичные результаты.

На рис. 2, б приведен спектр колебаний уровня в Севастопольской бухте, построенный по 90-суточной
 реализации [2]. На данном спектре выделяются колебания, соответствующие полусуточной и суточной со-
 ставляющим прилива, а также периоды: 0,9; 1,25; 2,5 ч, характерные для сейш.

Сведения о сейшевых течениях в Севастопольской бухте очень скудные. В основном они получены
 в результате кратковременных измерений, выполненных во время экспедиций Морского гидрофизическо-
 го института в 2008 и 2014 гг. [7, 8]. При этом было установлено, что у входа в бухту флуктуации течений
 происходят с периодом около 60 мин.

1.2. Теоретические представления о локальных сейшевых колебаниях

Сейшевые колебания являются одним из самых распространенных видов длинноволновых движений
 в бухтах и заливах. Они охватывают всю массу жидкости в водоеме. Общепринятой научной точкой зре-

ния является гипотеза, что сейши в бухтах генерируются не за счет непосредственного воздействия внешних факторов (атмосферного давления, ветра, осадков и пр.) на внутреннюю акваторию, а за счет прихода длинных волн из открытого моря через вход. Потери волновой энергии связаны в основном не с процессами диссипации, а происходят за счет излучения ее через открытую границу [9].

В частично замкнутых акваториях существует также особый вид колебаний — мода Гельмгольца (нулевая или фундаментальная мода), аналогичная основному тону акустического резонатора, отсутствующая в замкнутых водоемах. Данная мода не имеет узловых линий в акватории бухты, ее узловая линия расположена у входа в бухту. Как показывают данные натурных наблюдений, в бухтах и гаванях с узким входом мода Гельмгольца обычно доминирует над всеми остальными видами собственных колебаний и определяет общий характер движений во внутренней акватории [9, 10].

По результатам численного моделирования [10] показано, что наибольший период (около 50 мин) среди мод сейшевых колебаний севастопольских бухт имеет мода Гельмгольца Севастопольской бухты. Значения периодов мод Гельмгольца крупных севастопольских бухт составляют: Камышовая — 21,8 мин, Стрелецкая — 15 мин, Карантинная — 11,4 мин, Круглая — 8,9 мин.

В результате связи бухт через их входы расширяется модовый состав собственных колебаний в них за счет проникновения собственных мод смежных бухт [4, 11–13]. Если одна из бухт системы содержит бухту, заметно превышающую по размерам остальные, тогда ее собственные моды проникают в соседние бухты с высокой интенсивностью. Такой эффект проявляется в севастопольских бухтах [4], где мода Гельмгольца Севастопольской бухты предположительно проникает в бухту Круглая, и на Балеарских островах, где мода Гельмгольца бухты Сьютаделья (Ciutadella) проникает в меньшую бухту Платха Гран (Platja Gran), часто приводя к разрушениям [11].

2. Материалы и методы

Постановка приборов, сбор и обслуживание данных проводились с июня по декабрь 2024 г. Наиболее продолжительный фрагмент данных был зафиксирован в бухте Карантинная и охватывает период около 4 мес (рис. 3). В бухте Голландия запись длилась примерно 3 мес. Однако измерения в бухте Круглая оказались менее успешными из-за технических проблем. Измерительное оборудование дважды было повреждено во время штормов — 5 ноября и 3 декабря. В результате удалось получить только один достаточно длительный фрагмент данных продолжительностью около 1,5 мес.

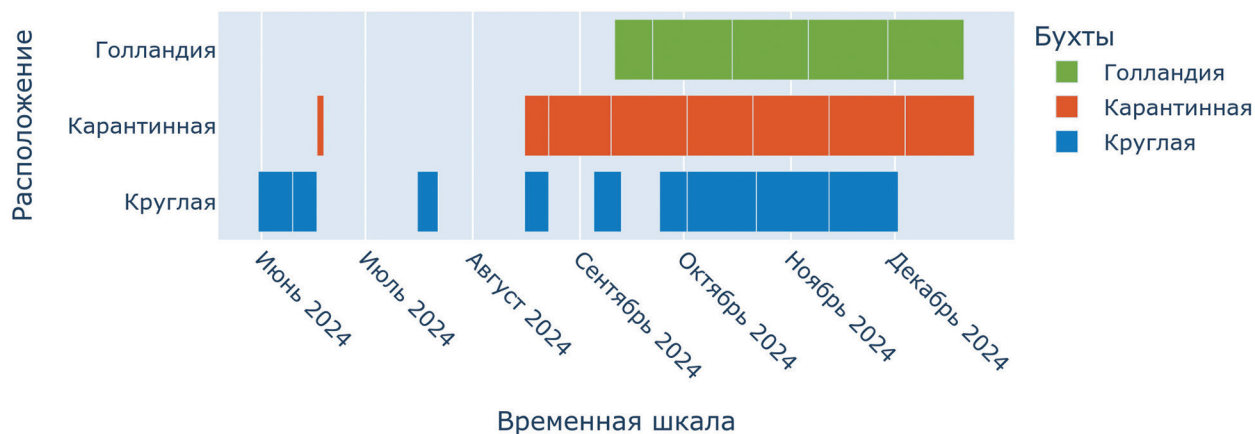


Рис. 3. Диаграмма доступности данных измерений

Fig. 3. Diagram of measurement data availability

Для измерения уровня моря использовались автономные измерители, построенные на базе легкодоступных ультразвуковых дальнометров JSN-SR04T [4]. Принцип работы такого прибора сводится к регистрации измеренного времени распространения сигнала от приема-передатчика до поверхности моря и обратно и записи полученного значения на карту памяти с частотой 10 Гц. На этапе пост-обработки, выполняющемся «на берегу», измерения подвергаются визуальному контролю качества, фильтрации выбросов и в конечном итоге осреднению за интервал времени, принятый в данной работе равным 1 мин. Каждый прибор был оборудован дублирующим приемо-передатчиком, который фиксировал расстояние до жестко

закрепленной площадки (60–70 см), а также измерителем температуры воздуха. На основе этих данных проводилась коррекция измерений с учетом изменения скорости звука в атмосфере. Места установки приборов показаны на рис. 1.

Измеритель в бухте Круглая был размещен в средней части восточного берега бухты на углу железобетонного пирса, выступающего в море на 5 м. Глубина места — около 2 м. Ориентация опорной штанги приблизительно на СЗ, т. е. на вход в бухту. Расстояние до входа в бухту — около 800 м.

Измеритель в бухте Карантинная был размещен на конце длинной части Г-образного бетонного пирса, выступающего в море на 30 м. Глубина места — около 2 м. Пирс ориентирован так, что он закрывает датчик от прямого действия ветровых волн, приходящих в бухту, и фактически отфильтровывает самые высокочастотные колебания. Ориентация опорной штанги приблизительно на ССЗ. Расстояние до входа в бухту — около 500 м.

Измеритель в бухте Голландия был размещен во внутреннем углу железобетонного полупроницаемого пирса в северо-восточной, вершинной части бухты. Место крепления отстоит от берега на 10 м. Глубина места — около 2 м. Пирс ориентирован так, что он закрывает датчик от прямого действия ветровых волн, приходящих с юга и юго-запада, но открыт для волнения, приходящего из большой Севастопольской бухты. Ориентация опорной штанги — приблизительно с севера на юг, но датчик был ориентирован на запад. Расстояние до входа в бухту Голландия — около 300 м, но относительно большой Севастопольской бухты датчик размещен примерно в середине северного берега (4 км до входа в бухту и 3,5 км до вершины бухты).

3. Результаты

В ходе исследования были проанализированы все доступные записи, за исключением первых коротких фрагментов, полученных летом. На временных масштабах, превышающих несколько суток, записи уровня воды демонстрируют высокую степень согласованности (рис. 4). Максимальный уровень воды, вероятно связанный с сезонными изменениями, был зафиксирован в конце сентября.

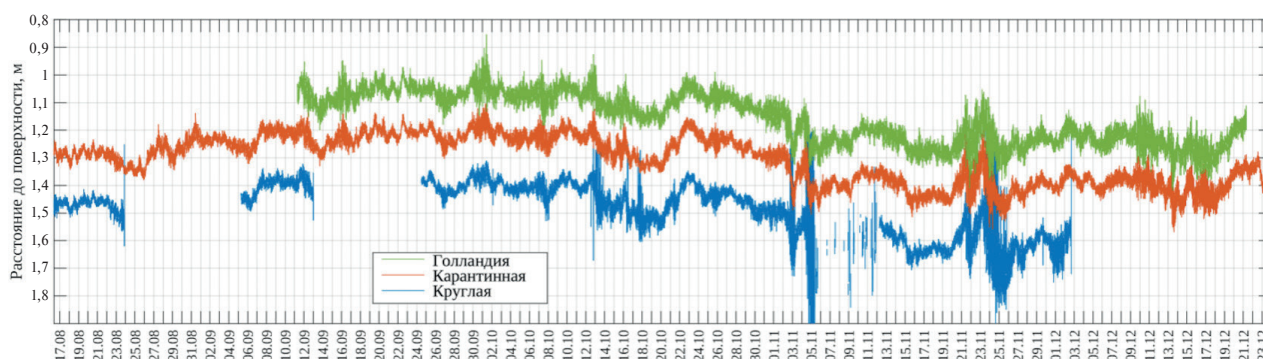


Рис. 4. Временная диаграмма измеренного расстояния от датчика до поверхности моря для трех станций. Шкала времени градуирована в сутках. Осреднение данных — 1 мин

Fig. 4. Time diagram of the measured distance from the sensor to the sea surface for three stations. The time scale is graduated in days. Data averaging is 1 min

Измерение расстояний акустическими датчиками имеет свою специфику, связанную с существенной зависимостью скорости звука от состояния воздуха на трассе, по которой распространяется сигнал. Скорость звука определяется скоростью теплового движения молекул, поэтому для атмосферного воздуха наиболее сильной является зависимость от температуры. Поскольку вариации температуры имеют ярко выраженный суточный ход, точность прямых измерений на таких периодах может вызывать определенные сомнения. Для оценки возможных ошибок, связанных с изменчивостью скорости звука, в прототипах приборов были предусмотрены измерители температуры (вынесенный из корпуса датчик). На одном из приборов (б. Голландия) было установлено второе, калибровочное, «плечо» измерений: одновременно с измерением вертикального расстояния от датчика до воды, с помощью второго идентичного датчика измерялось горизонтальное расстояние до специально установленной мишени (расстояние около 70 см).

Таким образом, у нас есть возможность сравнить результаты применения двух типов коррекции: по температуре и по прямым измерениям скорости звука. Поскольку в наших работах нас главным образом интересуют вариации сигнала, а не абсолютный уровень, анализ ошибок представлен в спектральном

пространстве на примере б. Голландия. Как следует из рис. 5, *а*, применение коррекции заметно влияет только на низкочастотную часть спектра (периоды более суток). На более высоких частотах расхождения сравнимы с толщиной линии или шумом спектра. Более подробно ошибки показаны на панели (*б*), где представлено отношение амплитуд в зависимости от частоты (квадратный корень из отношения спектров, показанных на панели (*а*)).

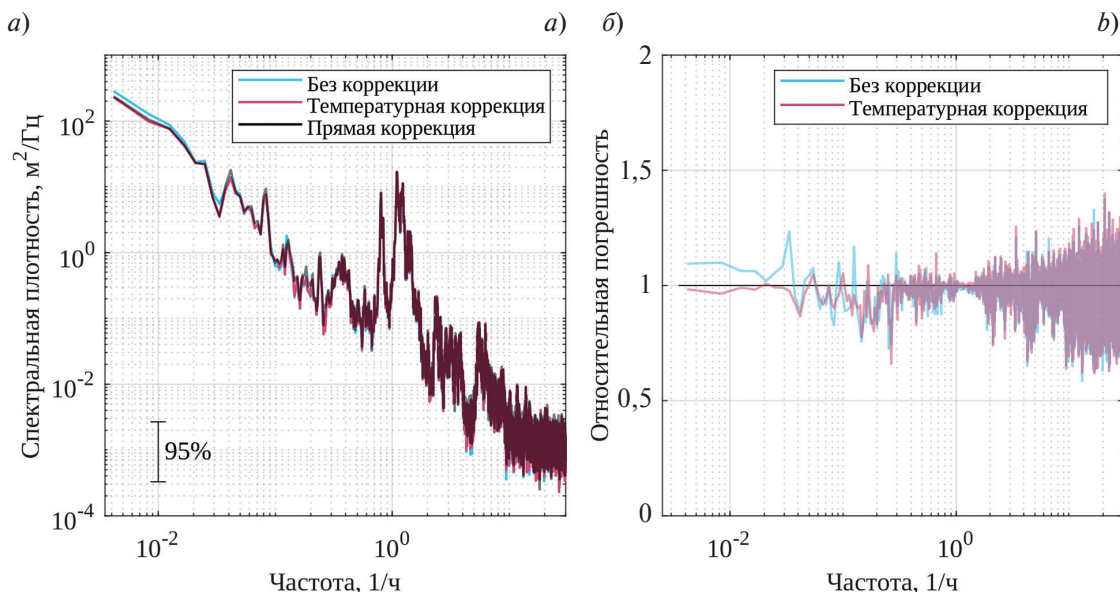


Рис. 5. Диаграмма спектральной плотности энергии колебаний уровня моря в б. Голландия как пример применения температурной коррекции для учета изменений скорости звука в воздухе (*а*) и диаграмма относительной погрешности на разных периодах колебаний (*б*). Показан 95 % доверительный интервал

Fig. 5. Diagram of the spectral energy density of sea level oscillations in the Gollandiya Bay as an example of application of temperature correction to account for changes in sound velocity in air (*a*) and diagram of relative error at different periods of oscillations (*b*). 95 % confidence limits are shown

В худшем случае, т. е. когда коррекция не применяется, наибольшие отклонения составляют не более 25 % на суточном периоде, если за истинные значения считать измерения, скорректированные по калибровочному плечу. На более низких частотах эта ошибка порядка 10 %. Применение только температурной коррекции уменьшает разброс до единиц процентов. На частотах, соответствующих наиболее выраженным компонентам (период около 1 ч), ошибки также стремятся к нулю (толщине линии на графиках). На высоких частотах коррекция только добавляет шум, не внося выраженных изменений. Таким образом, представленный в работе метод измерений можно признать вполне подходящим как для идентификации спектральных максимумов, так и для оценки их абсолютных значений амплитуд колебаний уровня. В дальнейшем представлены результаты обработки с температурной коррекцией, хотя отсутствие таковой не влияет на конечные выводы данной работы.

На рис. 6 показаны спектры (спектральная плотность энергии колебаний уровня моря) по измерениям в трех бухтах за период с 11.09.25 по 21.12.25 (отметим, что в рядах б. Круглая есть пропуски, поэтому спектральное осреднение здесь немного меньше, а шумовые вариации спектра, соответственно, больше). Спектры изобилуют множеством линий и полос разной ширины и интенсивности. Условно можно выделить три диапазона. Первый соответствует суточным и полусуточным приливным колебаниям. Для сравнения показаны расчеты по модели ЕОТ20¹, которая построена по глобальным альтиметрическим данным, полученным за несколько десятилетий по всему Мировому океану. Примечательно, что спектральные плотности суточных и полусуточных пиков находятся в близком соответствии с измерениями, несмотря на весьма малую амплитуду приливных колебаний, характерных для Черного моря (разность высокой и низкой воды 2–3 см). Наиболее хорошо проявляется полусуточный пик, в котором доминируют приливные составляющие T2, S2, M2. Суточный пик практически не различим на фоне шумового континуума (в этом случае

¹ База открытых океанографических данных. URL: <https://www.seanoe.org/data/00683/79489/> (дата обращения: 01.07.2025)

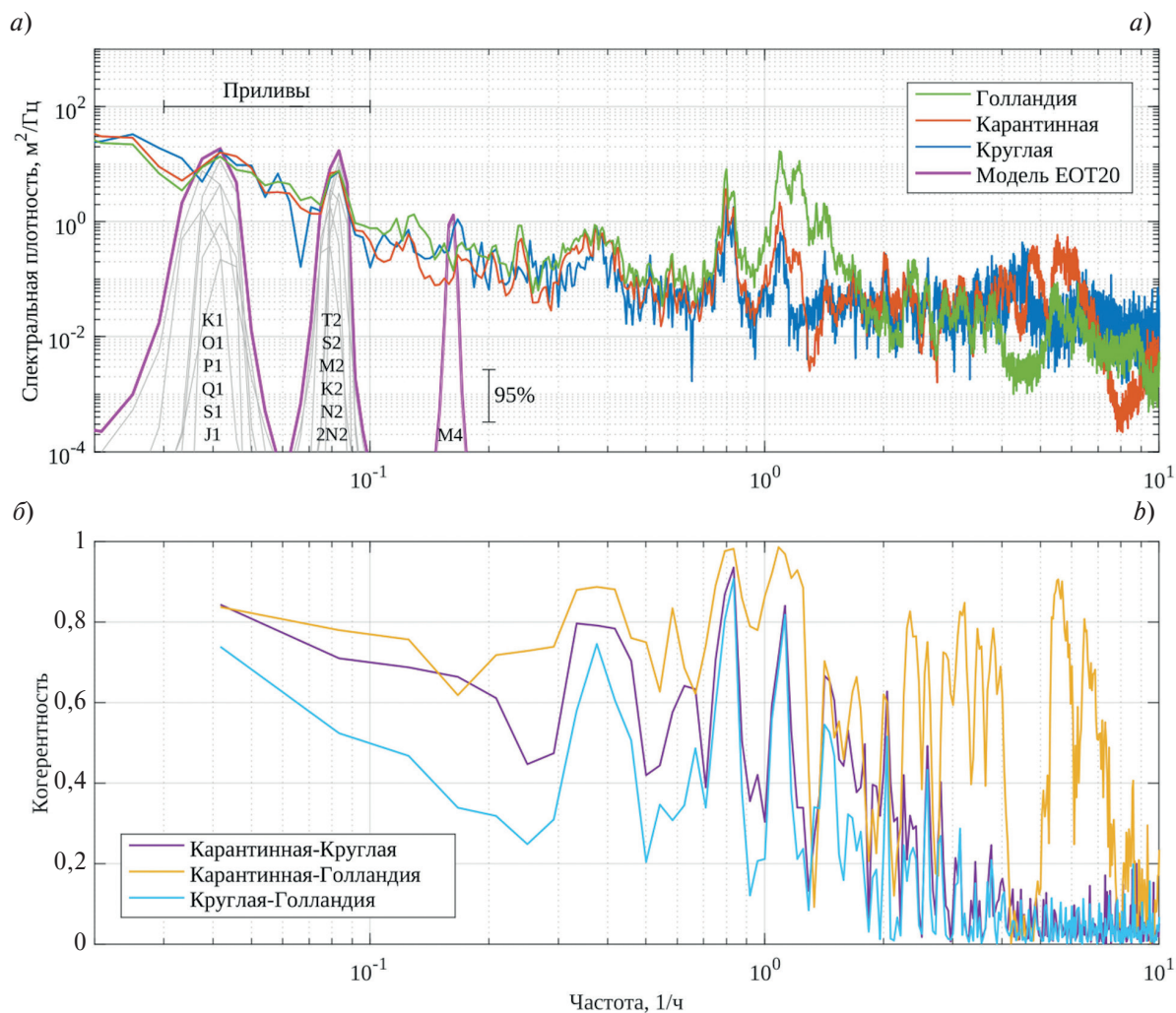


Рис. 6. Диаграммы спектральной плотности энергии колебаний уровня моря в трех бухтах (а) и попарная когерентность на разных периодах (б). Показан 95 % доверительный интервал

Fig. 6. Spectral energy density diagrams of sea level oscillations in three bays (a) and pairwise coherence at different periods (b). 95 % confidence limits are shown

преобладают составляющие K1 и O1). Четвертая гармоника основной лунной приливной волны M4 (период шесть часов), возникающая из-за нелинейных эффектов, не проявляется так, как предсказывает модель, возможно, из-за не совсем точного учета влияния дна, учет которого принципиален для M4.

Далее, в сторону высоких частот, можно выделить спектральные максимумы, обусловленные, по всей видимости, сейшми Черного моря (периоды 153, 174, 191 мин) [14, 15].

Нами условно выделен диапазон сейш системы связанных бухт (более подробно показан на рис. 7). Наиболее значимые в этом интервале частот пики приходятся на периоды около 1 ч, соответствующие моде Гельмгольца Севастопольской бухты. Эти компоненты весьма ярко проявляются как в самой Севастопольской бухте, так и в б. Круглая и б. Карантинная. Взаимная когерентность между представленными рядами показана на рис. 6, б.

В диапазоне приливных компонент когерентность весьма высока, за исключением несколько заниженных значений для пары Круглая–Голландия (возможно, из-за их открытости и, соответственно, более сильного влияния шума от поверхностных волн). Для пары Карантинная–Голландия когерентность на основных часовых модах практически достигает 1. На остальных парах эта величина также не менее 0,8. Обращает также на себя внимание связанность колебаний в паре Карантинная–Голландия на периодах десятков и единиц минут, чего не наблюдается для остальных пар.

На рис. 7 более подробно представлен интервал, соответствующий колебаниям на собственных частотах бухт. Объективное выделение спектральных составляющих здесь вряд ли возможно, поскольку в ко-

нежном итоге оно все равно будет опираться на задаваемые субъективно уровни значимости. Поэтому мы ограничимся визуальным определением спектральных линий (показаны на рис. пунктиром). Две основные линии на периодах около 1 ч, как уже отмечалось, присутствуют во всех трех сигналах. Более короткопериодные встречаются как во всех трех, так и в некоторых парах или же только в одной из бухт.

На рис. 7 заметно выделяются три мощных пика на периодах со значениями 54,2; 48,6 и 42,0 мин. При этом колебания с периодами 54,2 и 42,0 имеют место во всех рассмотренных здесь бухтах. В парах Голландия—Карантинная и Голландия—Круглая колебания на периоде 54,2 мин происходят синфазно (рис. 9), а на периоде 42,0 мин — противофазно (рис. 9). Появление таких сейш в системе севастопольских бухт можно объяснить наличием в ней Севастопольской бухты, период моды Гельмгольца которой по разным оценкам [10, 16] составляет 48–50 мин. Как показано в [17, 18], наличие связи расширяет спектр возможных собственных колебаний в системе бухт. При этом становятся возможными как синфазные колебания (их период больше собственного периода бухты, их породившей), так и противофазные — их период меньше. Как видно, такое явление наблюдается и в системе севастопольских бухт. Кроме указанных колебаний с периодами 54,2 и 42,0 мин, в бухтах Голландия (часть Севастопольской бухты) и Карантинная (в ней измерительный прибор располагался недалеко от входа в нее (рис. 1)) имеют место колебания с периодом 48,6 мин, которые можно связать с модой Гельмгольца Севастопольской бухты, обусловленной ее батиметрией и профилем береговой черты. Данная мода выделяется лишь в близко расположенных друг к другу Севастопольской и Карантинной бухтах. А в бухте Круглой, более удаленной от Севастопольской бухты, данная мода не регистрируется (рис. 7).

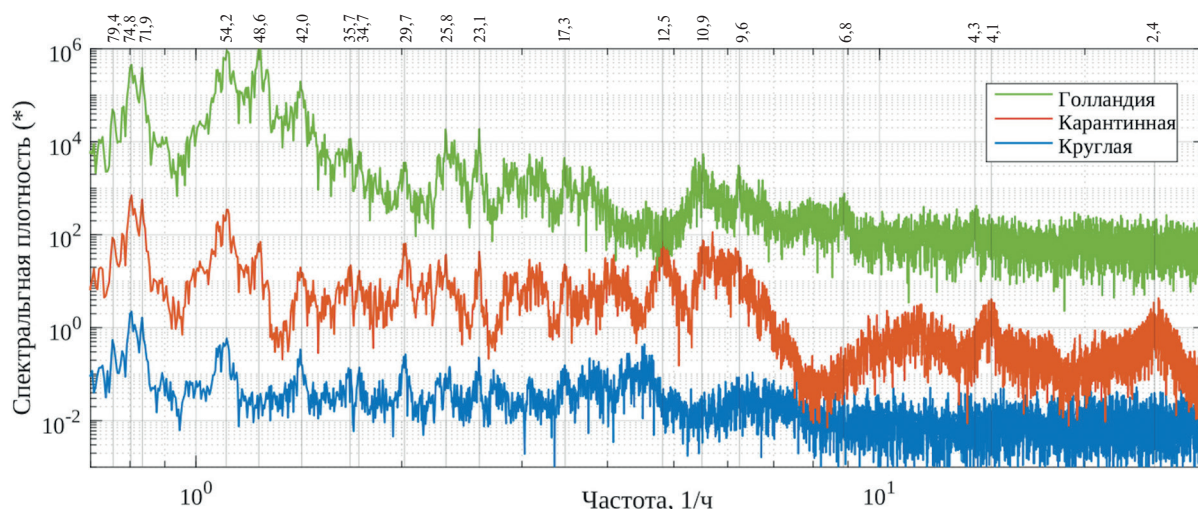


Рис. 7. Диаграммы спектральной плотности энергии колебаний уровня моря в трех бухтах для короткопериодного интервала (спектры искусственно разнесены по оси ординат для лучшей визуализации)

Fig. 7. Spectral energy density diagrams of sea level oscillations in three bays for a short-period interval (spectra are artificially separated along the ordinate axis for better visualization)

Вейвлет-анализ, в отличие от стандартного Фурье-анализа, позволяет отследить временную изменчивость спектральных компонент сигнала. В некотором смысле такой анализ аналогичен оконному преобразованию Фурье, но, в отличие от него, вейвлет-преобразование обладает переменным спектральным разрешением, что позволяет рассматривать одновременно высокочастотные и низкочастотные составляющие и анализировать их эволюцию. На рис. 8 представлены ненормированные вейвлет-спектры мощности для трех бухт: $W(f, \tau) = \int x(t)w(f, t - \tau)dt$, где $x(t)$ — измеренный уровень моря в одной из бухт, $w(f, t) = e^{i2\pi ft} \cdot e^{-t^2 f^2 / \delta^2}$ — комплексный вейвлет Морле с параметром ширины δ , равным 4 (около 8 периодов вейвлета по половинному уровню амплитуды вейвлета). Поскольку спектр имеет ярко выраженный ход (f^{-2} , см. рис. 6), на рис. 8 матрицы квадратов коэффициентов вейвлет-преобразования домножены на квадрат частоты для лучшей визуализации короткопериодных и длиннопериодных колебаний, поэтому лишь условно связаны с со спектральной мощностью сигнала.

Как и на Фурье-спектрах, здесь четко видны две линии на периодах 75 и 54 мин сразу во всех бухтах. В б. Голландия и б. Карантинная также проявляется довольно сильная линия на периоде около 48 мин, чего нельзя сказать о б. Круглая, где данная линия отсутствует или лежит значительно ниже шумового уровня.

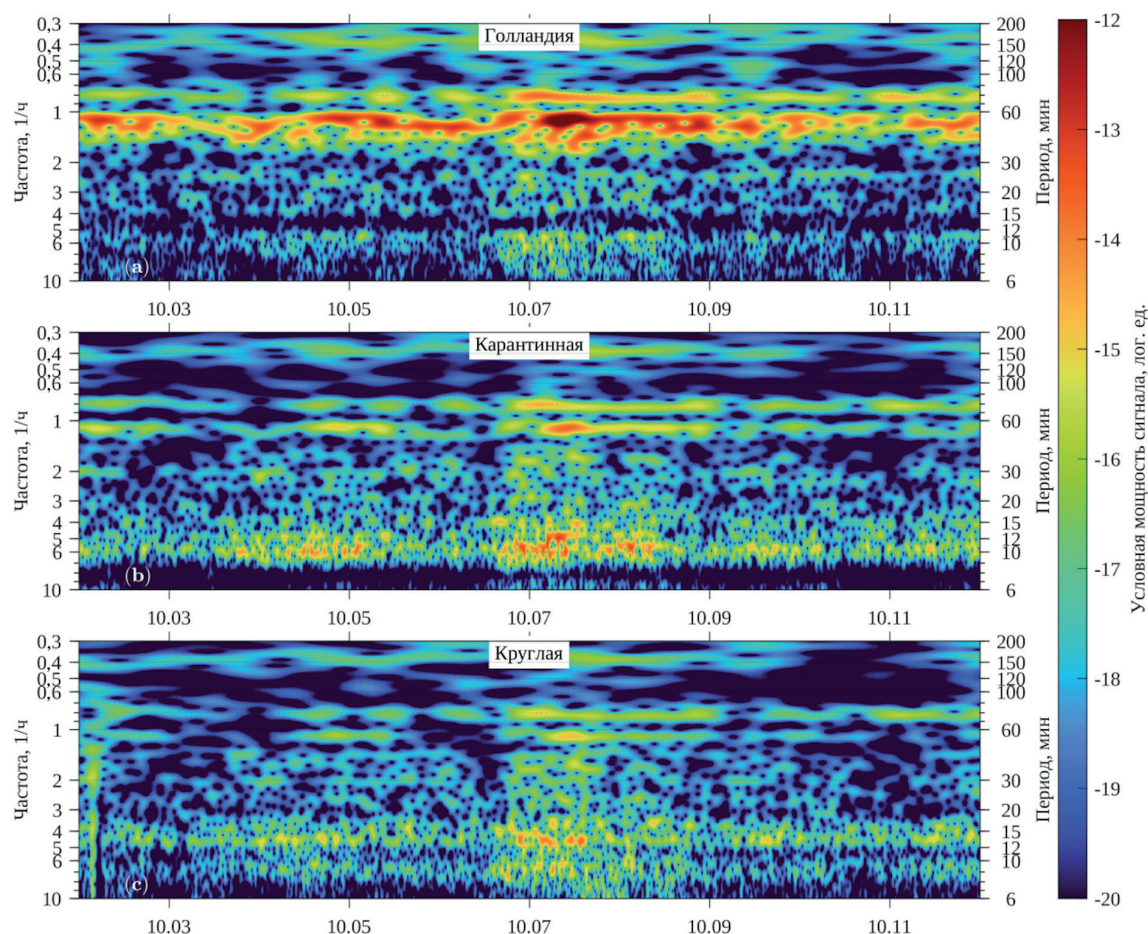


Рис. 8. Вейвлет-диаграммы спектральной плотности энергии колебаний уровня моря в трех бухтах

Fig. 8. Wavelet diagrams of the spectral energy density of sea level oscillations in three bays

Четкую временную изменчивость проследить в целом затруднительно. Характерно, что во время штормов, как правило, усиливаются колебания на всех частотах. Особенно хорошо это видно для б. Круглая, являющейся наиболее открытой из обсуждаемых. Интересным представляется четкая суточная периодичность в коротковолновых компонентах б. Голландия. Предположительно, она связана с дневным развитием поверхностного волнения в бухте. В меньшей степени такой эффект проявляется в б. Круглая. В б. Карантинной его практически не видно, возможно, из-за того, что точка измерений в этом случае наиболее укрыта «ковшом» пирса, на котором был установлен датчик.

Поскольку измерения в трех бухтах проводились квазисинхронно (внутренние часы измерителей корректировались каждые 2–3 недели), из вейвлет-спектров может быть получена интересная информация о разности фаз колебаний в бухтах, которая определяется разностью фаз между соответствующими комплексными вейвлет-коэффициентами. Такие фазовые сдвиги для трех пар бухт показаны на рис. 9 за 10 сут., в течение которых синхронизация часов во всех трех измерителях была наиболее надежной.

Для лучшей визуализации на диаграммы наложена маска прозрачности, величина которой пропорциональна модулю произведения соответствующих вейвлет-коэффициентов (в некотором смысле это аналог локальной когерентности сигналов на данной частоте, в данный момент времени, для данной пары сигналов). Таким образом, «подсвечены» только сдвиги фаз наиболее значимых колебаний (как и в случае с рис. 8, вейвлет-коэффициенты нормированы на квадрат частоты для одинакового восприятия быстрых и медленных колебаний). В отличие от чисто энергетического представления, фазовая картина позволяет четко разделить все спектральные компоненты на несколько групп.

Периоды 153, 174, 191 мин имеют колебания, протекающие синфазно во всех рассмотренных бухтах (рис. 9). Это свидетельствует о том, что они вызваны возмущениями, имеющими глобальный характер для данных бухт. К таким возмущениям можно отнести шельфовые сейши и глобальные сейши Черного моря.

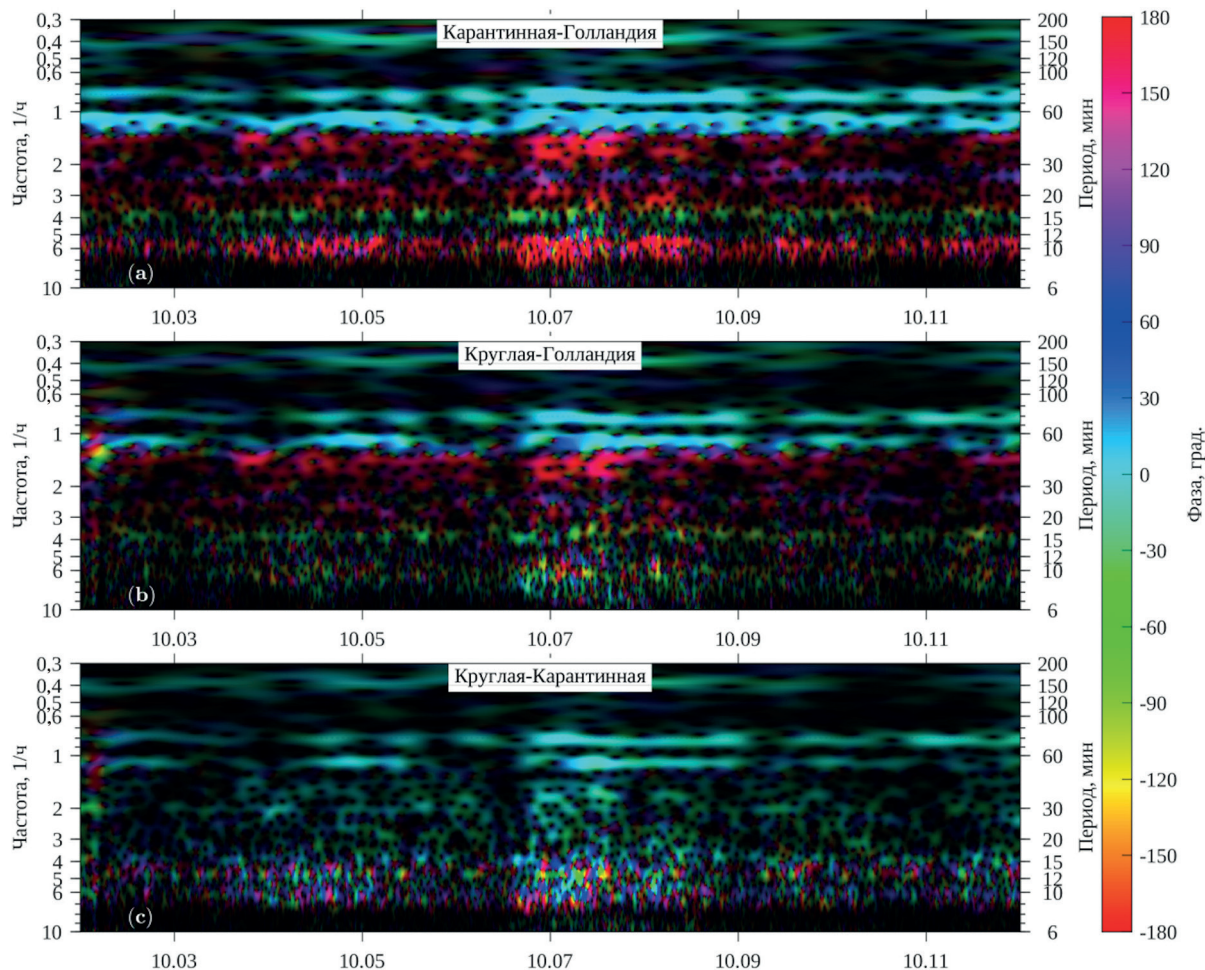


Рис. 9. Разность фаз между спектральными компонентами колебаний уровня моря в трех бухтах

Fig. 9. Phase difference between spectral components of sea level oscillations in three bays

В работе [15] на основе метода конечных элементов получено решение задачи о собственных колебаниях уровня в бассейне Черного моря. Установлено, что собственные периоды имеют следующие значения: 10,9; 7,5; 6,3; 5,5; 4,6; 4,4; 3,7; 3,3; 3,1; 2,9 ч. Анализ пространственной структуры собственных мод показывает, что в районе Севастополя интенсивность низкочастотных мод незначительна. Это объясняет почему в полученных нами спектрах отсутствуют периоды, соответствующие низкочастотным модам сейш Черного моря. В районе Севастополя достаточно интенсивны собственные моды с периодами 3,3 и 2,9 мин, что хорошо согласуется с проведенными нами наблюдениями, а периоды 174 и 191 мин можно связать с глобальными сейшами Черного моря.

Шельфовые сейши — стоячие колебания уровня моря с периодами, соответствующими резонансным частотам, зависящим от уклона морского дна. В районе Севастополя длина шельфа составляет около 47 км. Его глубину можно аппроксимировать линейной зависимостью $h(x) = \alpha x$, где $\alpha = 0,00426$. Резонансные периоды такого шельфа можно вычислить по формуле [17]: $T_n = \frac{8\sqrt{L}}{(n\sqrt{g\alpha})}$, где L — ширина шельфа, $n = 1, 3, 5, \dots$ — номер моды, g — ускорение свободного падения.

Расчет для Севастополя значений периодов шельфовых сейш дает: T первой моды = 142 мин, T третьей = 47 мин, T пятой = 28 мин. Можно допустить, что период, равный 154 мин, близок к первой моде шельфовых сейш.

Синфазные колебания (фазовый сдвиг около 0 градусов) имеют глобальный характер для системы севастопольских бухт и проявляются одновременно во всех бухтах системы. В эту группу входят все приливные составляющие, высокочастотные моды глобальных сейш Черного моря с периодами, равными 3,3 и 2,9 ч, а также первая мода шельфовых сейш с периодом около 2,5 ч. Также к этой группе можно отнести

и колебания с периодами 75 и 54 мин, выделяемые во всех рассмотренных здесь бухтах. Первое из них, вероятно, является высокочастотной модой глобальных сейш Черного моря, а второе связано с влиянием Севастопольской бухты. Далее, по мере уменьшения периода, фаза меняется скачком на 180 градусов для пар Круглая—Голландия и Карантинная—Голландия, условно образуя вторую группу противофазных колебаний. В данную группу входят сейши системы связанных севастопольских бухт, обусловленные батиметрией, размерами и формой бухт. Как показано в работах [11, 17, 18], сейши в связанных бухтах стремятся принять противофазный характер. Из рис. 9 видно, что в севастопольских бухтах наиболее ярко выражено связанное противофазное колебание Голландия—Карантинная и Голландия—Круглая, имеющее период около 42 мин, соответствующий моде Гельмгольца Севастопольской бухты. Указанное колебание практически отсутствует в паре Круглая—Карантинная. Это свидетельствует о том, что оно вызвано Севастопольской бухтой, а не данными бухтами.

Среди полосы противофазных колебаний интересным представляется наличие третьей группы колебаний: двух линий со сдвигом около $+60^\circ$ на периоде 25 мин и около -60° на периодах 12–17 мин (знак фазы здесь условный, поскольку определяется выбором порядка бухт в паре). Такая картина четко наблюдается для пары Карантинная—Голландия и в несколько более зашумленном виде для пары Круглая—Голландия.

Также можно выделить четкую противофазную линию в районе периода 10 мин в паре Карантинная—Голландия. В работе [10] на основе математического моделирования показано, что Севастопольская бухта имеет собственный период, имеющий значение около 10 мин. При этом данное колебание проявляется с высокой интенсивностью в смежной с ней Карантинной бухте в виде «чужой» моды («чужими» принято называть моды сейш, проникающие из соседних бухт и прибрежной зоны, не являющимися собственными для бухты, в которую они проникают). В паре Круглая—Голландия такая линия практически не наблюдается, что свидетельствует о том, что данное колебание вызвано Севастопольской бухтой. Наконец, в паре Круглая—Карантинная, помимо подавляющего большинства синфазных колебаний, из данных наблюдений выявляются колебания на периодах 10–15 мин — сдвиг между ними близок к 180° . Они представляют собой моды связанных сейш на периодах мод Гельмгольца Карантинной (11,9 мин [10] и Круглой (13,5 мин [4]) бухт.

Наши результаты подчеркивают важность эффектов связанности бухт. Дальнейший анализ и интерпретацию представленных в настоящей работе натурных наблюдений предполагается выполнить с привлечением прямого численного моделирования.

4. Заключение

На основе анализа данных натурных наблюдений за уровнем моря, выполненных с июня по декабрь 2024 г. с помощью ультразвуковых измерителей уровня моря МГИ, размещенных в севастопольских бухтах Голландия, Карантинная и Круглая установлено следующее.

Выделены две группы периодических колебаний уровня моря. Первая — колебания, происходящие синфазно в рассмотренных бухтах, вторая — противофазные колебания.

К выделенным синфазным колебаниям относятся глобальные колебания уровня, проникающие в бухты из открытого моря. Они включают в себя приливные, высокочастотные моды глобальных сейш Черного моря с периодами 3,2 и 2,9 ч, имеющие высокую интенсивность в районе Севастополя и первую моду шельфовых сейш с периодом 2,5 ч.

К выделенным противофазным колебаниям принадлежат сейши, возникающие в системе севастопольских бухт, определяемые их батиметрией и профилем береговой черты. Собственные периоды севастопольских бухт не превышают 50 мин. Связь между бухтами через их входы заметно расширяет модовый состав сейш в них за счет собственных мод соседних бухт.

Мода Гельмгольца Севастопольской бухты (в ней расположена бухта Голландия) с периодом около 48 мин с высокой интенсивностью проявляется в бухтах Карантинная и Круглая в виде синфазных колебаний с периодом 54,2 мин и противофазных колебаний с периодом 42,0 мин. Бухты Карантинная и Голландия интенсивно взаимодействуют друг с другом на собственном периоде Севастопольской бухты, равном 10 мин. При этом данная мода практически не достигает бухты Круглая, расположенной на большем удалении от Севастопольской бухты, чем бухта Карантинная. Бухты Круглая и Карантинная активно взаимодействуют между собой на периодах их мод Гельмгольца (11,9 мин — период моды Гельмгольца бухты Карантинная; 13,5 мин — период моды Гельмгольца бухты Круглая).

Для получения более полной картины взаимодействия севастопольских бухт и уточнения модового состава собственных колебаний в них необходимо провести численное моделирование на основе расчетной области, включающей в себя все бухты системы связанных севастопольских бухт.

Благодарности

Авторы благодарят за содействие в проведении исследований все организации, на территории которых в 2024 году были размещены измерители уровня.

Acknowledgements

The authors would like to thank all organizations where level gauges were placed in 2024 for research assistance.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда и Правительства города Севастополя № 24-27-20076 <https://rscf.ru/project/24-27-20076/>.

Funding

The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation and the Government of the City of Sevastopol No 24-27-20076 <https://rscf.ru/project/24-27-20076/>.

Литература

1. *Медведев И.П.* Дисперсионный анализ колебаний уровня Черного моря в широком диапазоне частот // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 489–500. EDN YPUYWL. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2018-6-489-500>
2. *Иванов В.А., Овсяный Е.И., Ренетин Л.Н.* Гидрологический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ–Гидрофизика», 2006. 90 с.
3. *Горячкин Ю.Н., Иванов В.А., Ренетин Л.Н.* и др. Сейши в Севастопольской бухте // Труды УкрНИГМИ. 2002. Вып. 250. С. 342–353.
4. *Manilyuk Yu.V., Fomin V.V., Yurovsky Yu. Yu., Bagaev A.V.* Sea level oscillations spectra of a shallow coastal bay: Cost-effective measurements and numerical modelling in Kruglaya Bay // Regional Studies in Marine Science. 2024. Vol. 69. P. 103326. EDN EINBJJ. <https://doi.org/10.1016/j.rsmas.2023.103326>
5. *Багаев А.В., Белокоп А.Ю., Манилюк Ю.В.* и др. О проводимых в МГИ численных и натурных экспериментах по исследованию сейшевых колебаний в системе связанных бухт на примере системы севастопольских бухт // Тезисы докладов VIII Всероссийской научной конференции «Моря России: современные методы исследований и их практические применения». Севастополь: ФИЦ «Морской гидрофизический институт» РАН, 2024. С. 128–130.
6. *Шокальский Ю.М.* Океанография. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1959. 284 с.
7. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А., Зима В.В.* Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений (июнь 2008 года) // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 3. С. 31–43. EDN TMJXDX
8. *Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А.* и др. Течения в Севастопольской бухте по данным ADCP-наблюдений, ноябрь 2014 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное исследование ресурсов шельфа. 2014. Вып. 28. С. 25–30. EDN VBFSNL
9. *Rabinovich A.B.* Seiches and Harbor Oscillations (Chapter 9). Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y.C. Kim. Singapore: World Scientific, 2009. P. 193–236. EDN WWGXHT. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009
10. *Manilyuk Yu.V., Lazorenko D.I., Fomin V.V.* Seiche Oscillations in the System of Sevastopol Bays // Water Resources. 2021. Vol. 48, N5. P. 726–736. EDN JYJFLJ. <https://doi.org/10.1134/S0097807821050122>
11. *Liu P.L.-F., Monserrat M., Macros M.* et al. Coupling between two inlets Observation and modeling // Journal of Geophysical Research. 2003. Vol. 108, N C3, iss. 3069. P. 14–1–14–10. EDN FFWXHX. <https://doi.org/10.1029/2002JC001478>
12. *Медведев И.П., Архипкин В.С.* Колебания уровня моря в Голубой бухте (Геленджик) // Вестник Московского университета. 2015. Серия 5. География. № 3. С. 70–78.
13. *Ковалев Д.П., Манилюк Ю.В., Ковалев П.Д.* Колебания уровня моря в смежных бухтах Торгового порта и Холмск-Северный (остров Сахалин) // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 3. С. 450–468. EDN XVLLYV
14. *Иванов В.А., Янковский А.Е.* Взаимосвязь мезомасштабных процессов с условиями среды Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 1988. № 2. С. 44–50.
15. *Иванов В.А., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* О сейшах Черного моря // Метеорология и гидрология. 1996. № 11. С. 57–61.
16. *Манилюк Ю.В., Лазоренко Д.И., Фомин В.В.* Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 261–276. EDN QEFCWJ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-261-276>
17. *Рабинович А.Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 325 с.
18. *Nakano M., Fujimoto N.* Seiches in bays forming coupled system // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1987. Vol. 43. P. 124–134.

References

1. Medvedev IP. Analysis of variance analysis of the Black Sea level oscillations in a wide range of frequencies. *Physical Oceanography*. 2018;25(6):448–458. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2018-6-448-458>
2. Ivanov VA, Ovsyanyj EI, Repetin LN. Hydrological regime of Sevastopol Bay and its changes under the influence of climatic and anthropogenic factors. Sevastopol: ECSO–Gidrofizika; 2006. 90 p. (in Russian).
3. Goryachkin YuN, Ivanov VA, Repetin LN, et al. Seiches in Sevastopol Bay. *Proceedings of the Ukrainian Scientific Research Institute of Marine Geology and Geophysics*. 2002;250:342–353. (in Russian).
4. Manilyuk YV, Fomin VV, Yurovsky YY, et al. Sea level oscillations spectra of a shallow coastal bay: Cost-effective measurements and numerical modelling in Kruglaya Bay. *Regional Studies in Marine Science*. 2024;69:103326. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103326>
5. Bagaev AV, Belokon AY, Manilyuk YV, et al. On numerical and in situ experiments conducted at MGI to study seiche oscillations in the system of connected bays on the example of the Sevastopol Bay system. *Proceedings of the VIII All-Russian Scientific Conference “Russian Seas: Modern Research Methods and Their Practical Applications”*. Sevastopol: FRC “Marine Hydrophysical Institute” RAS; 2024:128–130. (in Russian).
6. Shokal'skiy Yu M. Oceanography. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1959. 284 p. (in Russian).
7. Morozov AN, Lemeshko EM, Shutov SA, Zima VV. Currents in the Sevastopol Bay from ADCP observations (June, 2008). *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2012;3:31–43. (in Russian).
8. Morozov AN, Lemeshko EM, Shutov SA, et al. Currents in Sevastopol Bay according to ADCP observations, November 2014. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2014;28:25–30. (in Russian).
9. Rabinovich AB. Seiches and harbor oscillations. In: Kim YC, editor. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapore: World Scientific; 2009:193–236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009
10. Manilyuk YV, Lazorenko DI, Fomin VV. Seiche oscillations in the system of Sevastopol bays. *Water Resources*. 2021;48(5):726–736. <https://doi.org/10.1134/S0097807821050122>
11. Liu PL-F, Monserrat M, Macros M, et al. Coupling between two inlet observations and modeling. *Journal of Geophysical Research*. 2003;108(C3):3069. <https://doi.org/10.1029/2002JC001478>
12. Medvedev IP, Arxipkin VS. Sea level fluctuations in the Golubaya Bay (the town of Gelendzhik). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Series 5: Geography*. 2015;3:70–78. (in Russian).
13. Kovalev DP, Manilyuk YV, Kovalev PD. Sea level oscillations in the adjacent bays — Trade port and Kholmsk-Severny (Sakhalin Island). *Physical Oceanography*. 2024;31(3):409–426.
14. Ivanov VA, Yankovsky AE. Interrelation between mesoscale processes and the medium conditions of the Black Sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 1988;2:44–50. (in Russian).
15. Ivanov VA, Manilyuk YV, Cherkesov LV. Seiches in the Black Sea. *Russian Journal of Meteorology and Hydrology*. 1996;1(11):45–50.
16. Manilyuk YV, Lazorenko DI, Fomin VV. Investigation of seiche oscillations in the adjacent bays by the example of the Sevastopol and quarantine bays. *Physical Oceanography*. 2020;27(3):242–256. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2020-3-242-256>
17. Rabinovich AB. Long gravitational waves in the ocean: Capture, resonance, radiation. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat; 1993. 322 p. (in Russian).
18. Nakano M, Fujimoto N. Seiches in bays forming a coupled system. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. 1987;43:124–134.

Об авторах

БАГАЕВ Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник МГИ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0003-4018-7642, Scopus AuthorID: 57189266640, WoS ResearcherID: K-5373–2016, SPIN-код (РИНЦ): 5426-7176, e-mail: a.bagaev1984@mhi-ras.ru

ЮРОВСКИЙ Юрий Юрьевич, ведущий научный сотрудник МГИ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-9995-3965, Scopus AuthorID: 24377122700, WoS ResearcherID: F-8907–2014, SPIN-код (РИНЦ): 8482-5777, e-mail: y.yurovsky@mhi-ras.ru

МАНИЛЮК Юрий Владимирович, научный сотрудник МГИ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-5752-7562, Scopus AuthorID: 6602563261, WoS ResearcherID: P-6662–2017, SPIN-код (РИНЦ): 4548-0051, e-mail: uvmsev@yandex.ru

БЕЛОКОНЬ Александра Юрьевна, старший научный сотрудник МГИ РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-1299-0983, Scopus AuthorID: 57259494800, WoS ResearcherID: M-6839–2018, SPIN-код (РИНЦ): 5633-9877, e-mail: a.bazykina@mhi-ras.ru

КАЛЬПА Валерия Александровна, ведущий инженер-исследователь МГИ РАН, SPIN-код (РИНЦ): 1406–0890, e-mail: vel.kalpa@gmail.com