

## Колебания уровня моря в смежных бухтах Торгового порта и Холмск-Северный (остров Сахалин)

Д. П. Ковалев<sup>1</sup>, Ю. В. Манилюк<sup>2, ✉</sup>, П. Д. Ковалев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ [uvmsev@yandex.ru](mailto:uvmsev@yandex.ru)

Поступила в редакцию 08.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024;  
принята к публикации 15.03.2024.

### Аннотация

**Цель.** Изучение на основе теоретических представлений и данных натуральных наблюдений уровня моря, полученных с сентября 2022 г. по май 2023 г., длинноволновых процессов в бухтах г. Холмска и на прилегающем шельфе, в том числе взаимодействия бухт – цель настоящей работы.

**Методы и результаты.** Для выполнения наблюдений использованы три автономных измерителя волнения АРВ-14 К, которые были установлены в бухтах Торгового порта и Холмск-Северный, а также на шельфе на незначительном удалении от бухт. Дискретность измерений одна секунда. На основе спектрального анализа с использованием программы *Кута* исследованы временные ряды как включающие приливы, так и не учитывающие их. В диапазоне периодов волн 1–30 ч обнаружены волновые процессы с периодами 1,6–6,7 ч неприливной природы, которые можно отнести к шельфовым сейшам, волнам Пуанкаре, а также к сейшам Татарского пролива. Спектральный анализ в диапазоне периодов 1–10 мин показал присутствие сейшевых колебаний с периодами 1,83–8,17 мин в бухте Торгового порта и 1,32–8,65 мин – в бухте Холмск-Северный.

**Выводы.** Установлено, что на протяжении всей серии натуральных наблюдений в указанных бухтах имели место связанные колебания на периодах ~ 8 мин, соответствующих моде Гельмгольца бухты Холмск-Северный. Данные колебания возбуждаются в этой бухте и за счет связи передаются в бухту Торгового порта. Указанные колебания в различные моменты времени имели как синфазную, так и противофазную пространственную структуру. На периодах высоких собственных мод взаимодействие между бухтами не выявлено. Также на основе спектрального анализа рассматриваемых колебаний уровня выделены биения с периодом 4,82 ч (289,2 мин), возникающие в результате взаимодействия мод с близкими периодами, равными 8,17 и 8,65 мин. Указанные факты, а также соответствие расстояния между входами в бухты предложенному ранее критерию условия взаимодействия позволяют говорить о наличии связанных колебаний в двух смежных бухтах – Торгового порта и Холмск-Северный.

**Ключевые слова:** колебания уровня моря, сейши, волны Пуанкаре, связанная система колебаний

**Благодарности:** в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0016 выполнены анализ и интерпретация результатов обработки данных натуральных наблюдений, а также в рамках темы государственного задания ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН FWWM-2024-0002 осуществлен сбор данных натуральных наблюдений, их обработка и последующий анализ.

**Для цитирования:** 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.

© Ковалев Д. П., Манилюк Ю. В., Ковалев П. Д., 2024

## Sea Level Oscillations in the Adjacent Bays – Trade Port and Kholmsk-Severnoy (Sakhalin Island)

D. P. Kovalev <sup>1</sup>, Yu. V. Manilyuk <sup>2, ✉</sup>, P. D. Kovalev <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

<sup>2</sup> Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
✉ [uvmsev@yandex.ru](mailto:uvmsev@yandex.ru)

### Abstract

**Purpose.** The work is purposed at studying the long-wave processes in the Kholmsk bays and on the adjacent shelf (including the interaction of bays) based on the theoretical concepts and the data of sea level field observations obtained in September, 2022 – May, 2023.

**Methods and Results.** The observations were performed by three autonomous wave meters ARW-14 K installed in the bays of the Trade Port and Kholmsk-Severnoy as well as on the shelf at an insignificant distance from the bays. The measurement discreteness was 1 second. The time series both including the tides and without them were studied based on the spectral analysis involving the *Kyma* program. Within the range of wave periods 1–30 h, the wave processes of a non-tidal origin and with the periods 1.6–6.7 h were revealed. They can be attributed to the shelf seiches, the Poincaré waves or the Tatar Strait seiches. Spectral analysis in the period range 1–10 min has shown the presence of seiches with the periods 1.83–8.17 min in the Trade Port Bay and those with the periods 1.32–8.65 min in the Kholmsk-Severnoy Bay.

**Conclusions.** It is established that in course of the whole series of field observations, the coupled oscillations at the periods ~ 8 min took place in the above-mentioned bays. These oscillations correspond to the Helmholtz mode of the Kholmsk-Severnoy Bay. They are induced in this bay and then, due to interaction, transferred to the Trade Port Bay. At different time points they had both in-phase and anti-phase spatial structures. During the periods of high eigen modes the interaction between the bays was not detected. Besides, the spectral analysis of sea level oscillations under study made it possible to reveal the beats with a period 4.82 h (289.2 min), resulting from the interaction of modes with the close periods equal to 8.17 and 8.65 min. The stated facts as well as the correspondence of the distance between the bays' inlets to the earlier proposed interaction condition criterion allow us to assert that the coupled oscillations are present in two adjacent bays – Kholmsk-Severnoy and Trade Port.

**Keywords:** sea level oscillations, seiches, Poincaré waves, coupled oscillation system

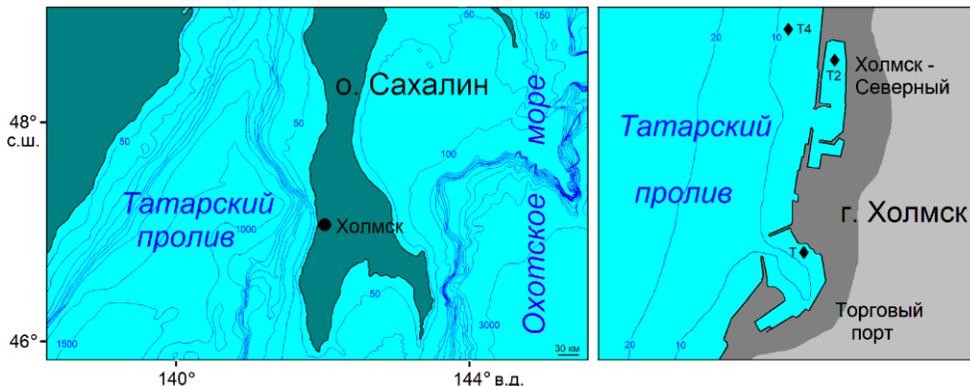
**Acknowledgments:** Within the framework of the theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0016, the results of field observation data processing were analyzed and interpreted; and within the framework of the theme of state assignment of FSBSI Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB of RAS FWWM-2024-0002, the field observation data were collected, processed and subsequently analyzed.

**For citation:** Kovalev, D.P., Manilyuk, Yu.V. and Kovalev, P.D., 2024. Sea Level Oscillations in the Adjacent Bays – Trade Port and Kholmsk-Severnoy (Sakhalin Island). *Physical Oceanography*, 31(3), pp. 409-426.

### Введение

Изменения климата, происходящие в последние десятилетия и сопровождающиеся усилением атмосферных возмущений и увеличением их продолжительности, требуют регулярных наблюдений уровня моря, чтобы иметь актуальное представление о процессах, происходящих в прибрежной зоне, особенно в районах, где расположены морские порты.

В бухтах г. Холмска (о. Сахалин) расположены порты Торговый и Холмск-Северный, которые имеют важное значение не только для города, но и для всего острова (рис. 1). Через Торговый порт осуществляется связь с материком паромной переправой Ванино – Холмск, по которой транспортируется большой объем самых разнообразных грузов. Акватории прилегающих к портам бухт хорошо защищены гидросооружениями разных видов от ветрового волнения [1]. Но для длинноволновых колебаний, приходящих из моря, такая защита неэффективна. К данному типу колебаний, в частности, относятся приливные, имеющие гармоники с периодами от суток до нескольких часов [2]. Также источником длинноволновых возмущений могут служить два принципиально разных типа процессов, приводящих к образованию длинных волн – анемобарических (АБ) и инфрагравитационных (ИГ) [3]. Анемобарические волны генерируются в результате воздействия флуктуаций атмосферного давления и ветра на поверхность моря, а также колебаний уровня, вызванных рассеянием энергии крупномасштабных длинноволновых образований типа метеоприливов или штормовых нагонов на неоднородностях рельефа и линии берега. Инфрагравитационные волны возникают в результате нелинейного взаимодействия ветровых волн или крупной зыби. Характерные периоды АБ-волн лежат в интервале от нескольких десятков секунд до нескольких часов, ИГ-волн – в интервале 30–300 с. Проникая на шельф и во внутреннюю акваторию, указанные волны возбуждают там резонансные сейшевые колебания.



**Рис. 1.** Карты региона и акватории вблизи Холмска с местами установки измерителей, отмеченными черными ромбами

**Fig. 1.** Maps of the region and the water area near Kholmsk showing the locations of device installations marked with black diamonds

Своеобразной чертой Холмска является наличие сопоставимых по размерам двух близко расположенных (расстояние между входами ~ 1 км) бухт со связанной системой колебаний (рис. 1). Такую колебательную систему можно интерпретировать как два связанных осциллятора. В работе [4] описано исследование с помощью лабораторной установки колебаний воды в двух связанных бухтах равных размеров. Показано, что за счет связи колебания,

возникающие в одной бухте, передаются в соседнюю. Также за счет связи изменяются резонансные периоды бухт, возможно возникновение как синфазных, так и противофазных колебаний, а также биений.

Сейши в связанных реальных бухтах в последнее время вызывают большой интерес у исследователей, так как эта тема, кроме научного, имеет еще и практическое значение. Так, в работах [5–8] описываются сейши в связанных бухтах, расположенных в разных районах Мирового океана. Но в этих работах рассматриваются системы бухт, включающие в себя бухту, превосходящую по размерам остальные. Холмские бухты почти равновеликие, их взаимодействие пока не исследовалось.

Целью настоящей работы является изучение на основе теоретических представлений и данных натурных наблюдений, выполненных в последнее время, длинноволновых процессов в бухтах Холмска и на прилегающем шельфе, в том числе изучение взаимодействия данных бухт.

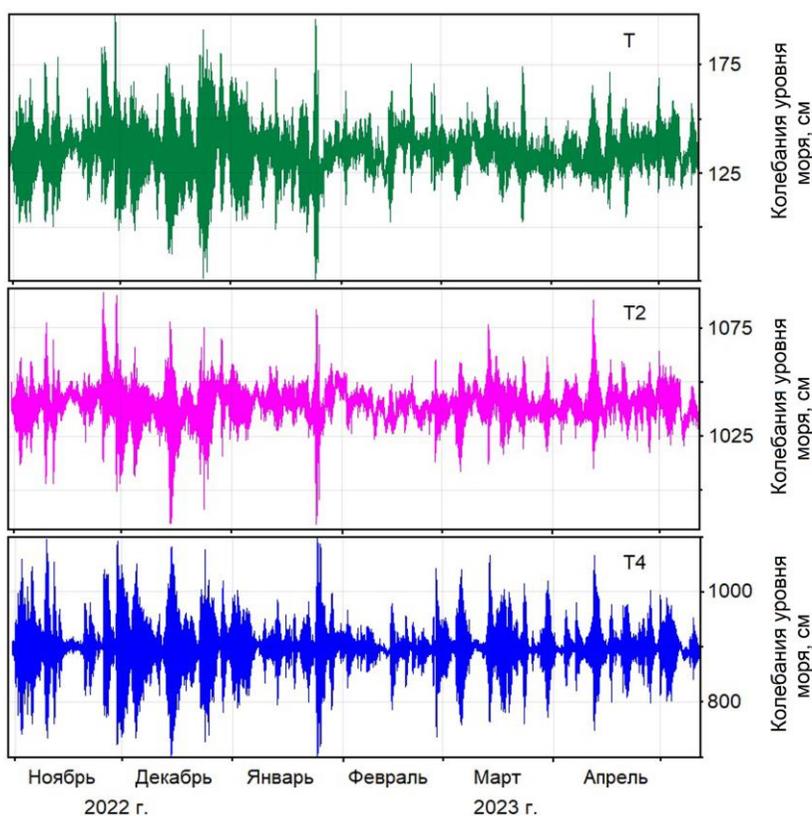
### Материалы и методы

**Объект исследования.** На рис. 1 показаны акватории бухт Холмска. Согласно сайту [http://retromap.ru/1419537\\_z7\\_46.335550,142.22351&h=0](http://retromap.ru/1419537_z7_46.335550,142.22351&h=0), параметры бухт следующие: Холмск-Северный – общая длина 1008 м, длина до перегородки южной составляет 816 м, длина широкой части 890 м, длина северной части 513 м, ширина у входа между внешними молами 221 м, ширина входа в бухту 139 м, средняя глубина 6,2 м; бухта Торгового порта – длина до причала паромы 732 м, длина от входа в бухту до стенки 556 м, ширина 422 м, ширина узкой кутовой части 109 м, ее длина 350 м, ширина входа в бухту 174 м, средняя глубина вдоль фарватера 6,5 м. Расстояние между центрами входов в бухты 1045 м.

Для Татарского пролива в районе Холмска в целом характерна сравнительно слабая выраженность частотно-избирательных свойств акватории, обусловленная топографией: шельф в районе Холмска самый узкий и приглубый у западного берега Сахалина, он расширяется как в южном, так и в северном направлении. Ширина шельфа в районе Холмска ~ 40 км, наклон дна составляет 0,0078.

**Наблюдения уровня моря.** Наблюдения колебаний уровня моря проводились с сентября 2022 г. по май 2023 г. с использованием трех автономных измерителей волнения АРВ-14 К: измерителя Т (заводской номер 152), измерителя Т2 (заводской номер 142) и измерителя Т4 (заводской номер 149) (рис. 1). Был установлен еще и четвертый прибор в море на изобате 4 м напротив входа в бухту Холмск-Северный, но он оказался неисправным. Точность измерения придонного гидростатического давления, которое впоследствии пересчитывалось в колебания уровня моря с учетом затухания коротких волн с глубиной, составляет 0,06% от верхнего предела измерения, а разрешающая способность по давлению равна  $\pm 0,0003\%$  также от верхнего предела измерения. Дискретность измерений уровня и температуры составляет 1 с.

**Методы обработки данных природных наблюдений.** Спектральный анализ, фильтрация, вычитание приливов и визуализация результатов и временных рядов выполнялись с помощью программы *Кута*, предназначенной для комплексной обработки и анализа данных об уровне моря большого объема<sup>1</sup> [9]. Программа позволяет рассчитывать спектральную плотность колебаний для выбранного ряда с использованием обычного оконного преобразования Фурье. Ряд разбивается на  $(2n/w)-1$  окон, где  $n$  – длина ряда,  $w$  – размер окна; следующий отрезок ряда выбирается со смещением в половину длины окна. Над каждым отрезком проводится фильтрация окном Кайзера – Бесселя (фильтрация может быть отключена). Затем для каждого окна рассчитывается преобразование Фурье для predetermined количества частот, начиная с заданной частоты. После расчета спектральных параметров для каждого окна вычисляется среднее значение между ними.



**Р и с. 2.** Зарегистрированные временные ряды колебаний уровня моря, из которых вычтен предвычисленный прилив. Здесь и на других рисунках показано место нахождения приборов: измеритель Т установлен в бухте Торгового порта, Т2 – в бухте Холмск-Северный, Т4 – в Татарском проливе (на шельфе)

**F i g. 2.** Recorded time series of sea level oscillations from which the precalculated tide is subtracted. Here and in other figures, the device locations are shown: device T is installed in the Trade Port Bay, T2 – in the Kholmnsk-Severny Bay, and T4 – in the Tatar Strait (on the shelf)

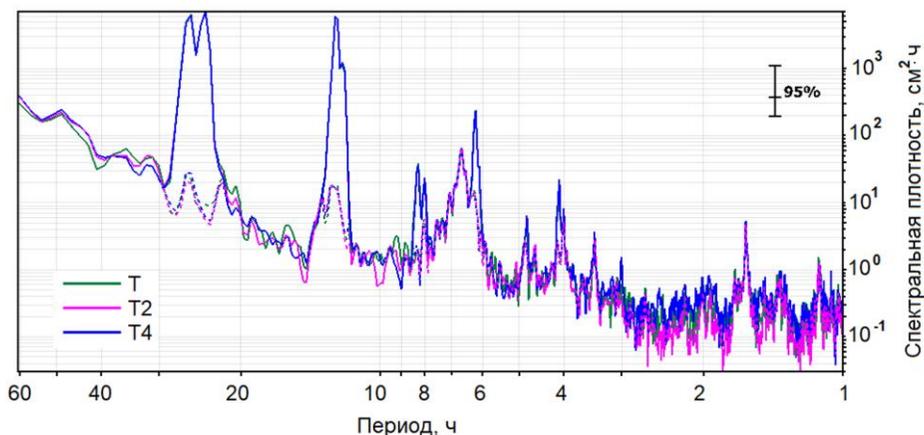
<sup>1</sup> Ковалев Д. П. Кута [Электронный ресурс]. Электрон. прогр. Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 2018. № гос. регистрации RU2018618773.

В результате проведенных наблюдений были получены долговременные ряды изменений уровня моря. Для анализа сейшевых колебаний из временных рядов был вычтен предвычисленный астрономический прилив. Расчет приливных гармоник и их вычитание из исходных временных рядов выполняется с использованием 35 астрономических гармоник с помощью приложения *LSMTM.exe* в программе *Кута*. В алгоритме *LSMTM.exe* используется метод наименьших квадратов, который был разработан А. Б. Рабиновичем и Г. В. Шевченко в 70-х годах XX в. Он неоднократно был протестирован и показал хорошие результаты при расчете приливов. Временные ряды с вычтенным предвычисленным приливом приведены на рис. 2.

### Результаты и обсуждение

С использованием полученных в результате проведенных наблюдений уровня моря временных рядов и программы *Кута* были рассчитаны спектральные плотности колебаний уровня по всей длине временных рядов. Поскольку, как показали дальнейшие исследования, в бухтах наблюдались волновые процессы с периодами  $> 8$  мин и они не могли быть сейшами самих бухт, представляет интерес рассмотреть диапазон волновых процессов для более длинных периодов. К тому же для анализа необходимо отделить приливные гармоники от сейш и других типов волн.

**Длиннопериодные колебания уровня моря приливного характера.** На рис. 3 показаны спектральные плотности колебаний уровня для временных рядов с приливом и рядов, из которых вычтен предвычисленный прилив. Это позволяет определить, какие пики соответствуют приливному гармоникам, а какие – другим волновым процессам.



**Р и с. 3.** Спектральные плотности колебаний уровня моря для временных рядов с приливом (сплошные линии) и рядов, из которых вычтен предвычисленный прилив (пунктир)

**F i g. 3.** Spectral densities of sea level oscillations for the time series with a tide (solid lines), and for the series from which the precalculated tide is subtracted (dashed lines)

Периоды максимумов в спектральных плотностях колебаний уровня приведены в табл. 1. Также в этой таблице сопоставлены значения полученных

периодов и аналогичные им значения периодов приливных гармоник, согласно работе [2]. Спектральные пики, не имеющие близких к приливным гармоникам периодов, можно отнести к волновым процессам другой, неприливной, природы.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Периоды пиков волн в спектральных плотностях колебаний уровня и соответствующие им приливные гармоники**  
**Periods of wave peaks in the spectral densities of sea level oscillations and the corresponding tidal harmonics**

Составляющие колебаний уровня / Components of sea level oscillations	Период, ч / Period, h											
С учетом прилива / With the regard for a tide	24,7	23,8	12,4	12,0	8,12	8,00	–	6,22	–	4,1	4,0	
Без учета прилива / With no regard for a tide	–	–	–	–	–	–	6,67	–	4,82	–	–	3,43 1,62
Приливная гармоника [2] / Tidal harmonic [2]	$M_1$	$K_1$	$M_2$	$S_2$	$MK_3$	$SP_3$	–	$SO_4$	–	$2MS_6$	$M_6$	

**Длинноволновые процессы неприливной природы.** Из табл. 1 видно, что в бухтах Холмска и прилегающей к ним области открытого моря существуют волновые процессы неприливной природы с периодами > 1 ч. К классу таких волн относятся волны Пуанкаре и шельфовые сейши.

**Волны Пуанкаре.** Проведено исследование непрерывных спектров излученных волн (волны Пуанкаре), поскольку они также могут соотноситься с обнаруженными спектральными пиками. При этом явлении, аналогичном резонансу в органной трубе [10], волна, набегающая из открытого океана, в результате многократного отражения от берега и границы шельфа может значительно усиливаться на избранных «резонансных» частотах.

Коэффициент амплитудного усиления  $\gamma$  (отношение амплитуды волны у берега к амплитуде волны в открытом океане) является характеристикой, описывающей непрерывный спектр волн Пуанкаре. Его значение зависит от частоты волны и вдольберегового волнового числа. Если предположить, что шельф имеет параболическую форму (по всей длине 86 км), то в общем виде глубина моря на шельфе описывается выражением  $h = ax^2$  при  $x_0 < x < L$ . Тогда коэффициент усиления волн Пуанкаре  $\gamma(\omega, 0)$  имеет вид согласно работе <sup>2</sup>:

$$\gamma(\omega, 0) = 2 \sqrt{\frac{L}{x_0}} \sigma (4\sigma^2 + 1 - \cos(2\mu\sigma) + 2\sigma \sin(2\mu\sigma))^{-1/4} \quad (1)$$

<sup>2</sup> Волны в пограничных областях океана / В. В. Ефимов [и др.]. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 280 с.

при  $\sigma^2 > 0$ . Здесь  $\mu = \ln \frac{L}{x_0}$ ;  $\sigma^2 = \frac{(\omega^2 - f^2)}{gH} - \frac{1}{4}$ , где  $f$  – параметр Кориолиса,

$\varphi = 47,06^\circ$  с. ш. для бухты Торгового порта. Параметр Кориолиса определяется по известной формуле  $f = 2\Omega \sin \varphi$ , где  $\varphi$  – широта места;  $\Omega = 7,2921 \times 10^{-5}$  цикл/с – круговая частота вращения Земли. Функция  $\sin \varphi = 0,732$ , с учетом этого получаем инерционную частоту 0,384 цикл/ч, период инерционных колебаний составляет 16,34 ч.

Расчет коэффициента усиления волн Пуанкаре по формуле (1) для рассматриваемого шельфа в районе Холмска с аппроксимацией  $h(x) = 0,32x^2$  ( $x$ , км – расстояние от берега) показал, что к ним можно отнести волны с периодом 3,56 ч, на котором имеется максимум со значением 2,25. Отметим, что в энергетическом спектре имеется пик на периоде 3,43 ч, близкий к максимуму коэффициента усиления; второй максимум со значением 2,1 на периоде 1,63 ч также близок к пику в спектральной плотности на периоде 1,62 ч (табл. 1).

Возможны и другие причины появления спектральных пиков с периодами 3,43, 4,82, 6,67 ч, в частности, это могут быть моды сейш Татарского пролива.

**Шельфовые сейши.** Это стоячие колебания уровня моря с периодами, соответствующими резонансным частотам, зависящим от уклона морского дна. В районе Холмска изменение глубины шельфа на расстоянии до 40 км можно аппроксимировать линейной зависимостью  $h(x) = \alpha x$ , где  $\alpha = 0,0078$ . Резонансные периоды такого шельфа вычисляются по формуле из работы [3, с. 183]

$$T_n = 8\sqrt{L} / (n\sqrt{g\alpha}), \quad (2)$$

где  $L$  – ширина шельфа;  $n = 1, 3, 5, \dots$  – номер моды;  $g$  – ускорение свободного падения.

При расчете по формуле (2) период первой моды равен 1,61 ч, третьей ~ 32 мин, пятой ~ 19,3 мин, седьмой ~ 13,8 мин, девятой ~ 10,7 мин. И можно допустить, что период, равный 1,62 ч (табл. 1), принадлежит первой моде шельфовых сейш.

Кроме периода первой моды в расчете получены периоды 3–9-й мод, значения которых, лежащие в интервале 10,7–32 мин, близки к значениям наблюдаемых пиков в спектрах. Поэтому очевидно, что приходящие к берегу из открытого моря волны или проходящие атмосферные возмущения могут возбуждать шельфовые сейши в резонансной акватории Татарского пролива вблизи Холмска.

Проведенные расчеты и интерпретация показывают, что выделенные по спектральным плотностям периоды пиков могут соответствовать разным волновым процессам – шельфовым сейшам, волнам Пуанкаре. Определить конкретно, какой из этих процессов явился причиной наблюдаемого пика, затруднительно, необходима установка нескольких измерителей волнения в акватории Татарского пролива вблизи Холмска. Авторы данной работы также полагают, что волны Пуанкаре могут способствовать возбуждению сейшевых колебаний на близких к ним периодах, однако эта проблема является темой отдельного исследования.

**Сейши в бухтах Холмска.** Под воздействием различных факторов в заливах и бухтах могут генерироваться сейши. Их изучением в разных акваториях занимались многие исследователи [11–14]. Они показали, что периоды сейшевых колебаний зависят от параметров акваторий.

Рассмотрим волны с периодами от 40 с до нескольких десятков минут, к которым относятся сейши в бухтах. Для обеих бухт был выполнен расчет периодов собственных колебаний, который проводился с использованием формулы для прямоугольного бассейна с открытым входом [15]:

$$\tau_{k,m} = \frac{4}{\sqrt{gh}} \frac{ab}{\sqrt{(1+2k)^2 b^2 + 4m^2 a^2}}, \quad (3)$$

где  $a, b, h$  – средняя длина, ширина и глубина бухты соответственно; неотрицательные целые числа, определяющие номер моды:  $k = 0, 1, 2, \dots, m = 0, 1, 2$ .

В табл. 2 приведены рассчитанные по формуле (3) периоды сейшевых колебаний для бассейнов, имеющих характерные размеры исследуемых бухт.

Т а б л и ц а 2  
Table 2

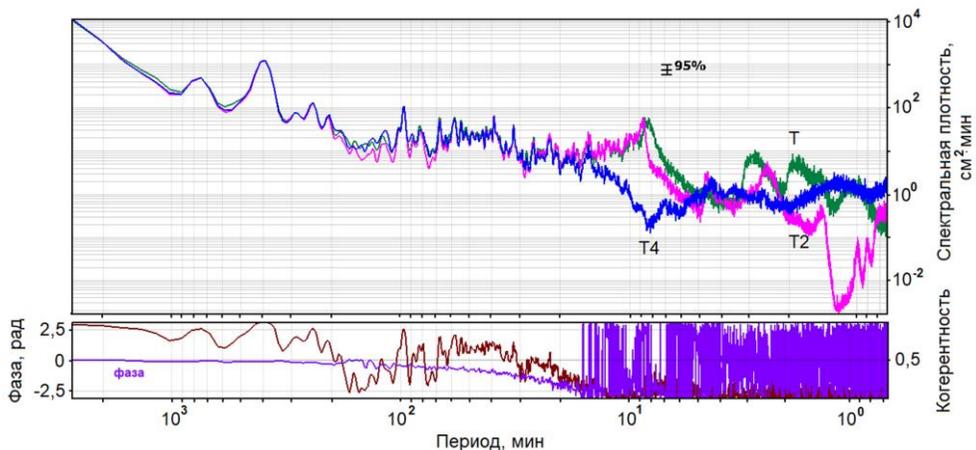
**Периоды сейш, рассчитанные на основе зависимости (3), в модельных бассейнах, аппроксимирующих бухты Холмска**  
**Calculated by equation (3) seiche periods in the model basins approximating the bays of Kholmск**

Номер моды / Mode number		Периоды сейш $\tau_{k,m}$ , мин / Seiche periods $\tau_{k,m}$ , min	
$k$	$m$	Торговый порт / Trade Port	Холмск-Северный / Kholmск-Severny
0	0	4,7	8,6
1	0	1,6	2,9
2	0	0,9	1,7
3	0	0,7	1,2
0	1	2,7	0,9
1	1	2,0	0,9

Нулевая мода ( $k = 0, m = 0$ , первое наибольшее значение периода для каждой акватории) является модой Гельмгольца, которая аналогична основному тону акустического резонатора [16]. Для рассматриваемых бухт периоды этой моды составляют 4,7 и 8,6 мин.

В работе [17] проведен расчет значений периодов продольных собственных мод бухты Торгового порта в предположении, что глубина в ее акватории изменяется по параболическому закону и на ее входе составляет 10 м. Данный расчет дал следующие значения: 4,9; 2,0; 1,3; 0,9 мин.

На рис. 4 показаны спектральные плотности для периодов колебаний уровня моря 40 с – 30 ч. Отметим, что расчет проводился для временных рядов, из которых был вычтен предвычисленный прилив с целью исключения влияния приливных гармоник высших порядков.



**Р и с. 4.** Спектральные плотности колебаний уровня моря, фаза и когерентность в рассматриваемых бухтах и Татарском проливе

**Fig. 4.** Spectral densities of sea level oscillations, phase and coherence in the bays under study and in the Tatar Strait

На рис. 4 хорошо видны пики спектральных плотностей в диапазоне периодов 1–10 мин, значения которых превышают доверительный интервал. Периоды этих пиков приведены в табл. 3, где также указаны периоды шельфовых сейш со значениями > 10 мин. Ранее проведенные исследования волнения в бухте Торгового порта показали, что волновые процессы с периодами ~ 1,83–8,17 мин являются сейшами данной акватории [18].

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

**Периоды пиков в спектральных плотностях, полученные на основе  
обработки данных натуральных наблюдений  
Peak periods in the spectral densities resulted from processing  
the field observation data**

Акватория / Water area	Период, мин / Period, min							
Холмск-Северный / Kholm-sk-Severny	<b>1,32</b>	<b>2,40</b>	<b>8,65</b>	15,1	22,2	31,8	39,0	97,2
Торговый порт / Trade Port	<b>1,83</b>	<b>2,83</b>	<b>8,17</b>	15,1	22,2	31,8	39,0	97,2
Татарский пролив / Tatar Strait	–	–	11,37	15,1	22,2	31,8	39,0	97,2

П р и м е ч а н и е. Полу жирным шрифтом указаны собственные периоды бухт.  
N o t e: Eigen periods of the bays are indicated in bold.

Отметим, что волновые процессы с периодами ~ 8 мин в открытой акватории Татарского пролива, в районе установки измерителя Т4, практически отсутствуют (рис. 4), поскольку в спектральной плотности наблюдается значительно выраженный минимум. В то же время в работе [19] отмечается, что

источником длинноволновых колебаний с указанным периодом, регистрируемых на записях мареографа бухты Торгового порта, являются длинноволновые резонаторы, аккумулирующие и усиливающие энергию захваченных волн в районе о. Монерон и на шельфе вблизи г. Чехов. Численное моделирование резонансных колебаний в бухте Торгового порта, согласно указанной работе, не показало наличие интенсивных колебаний на периодах  $\sim 8$  мин.

Сопоставление периодов, приведенных в табл. 2 и 3, показывает, что их значения близки, за исключением периода моды Гельмгольца бухты Торгового порта. Видимо, это связано с тем, что данная бухта имеет достаточно крупную кутовую часть, а формула (3) не учитывает наличие такой особенности акватории. В работе [20] проведено исследование влияния залива на сейши в модельном прямоугольном бассейне с заливом и установлено, что наличие залива приводит к изменению пространственной структуры собственных колебаний и удлиняет их периоды, особенно период старшей моды. Видимо, это обстоятельство способствует удлинению периода моды Гельмгольца в бухте Торгового порта.

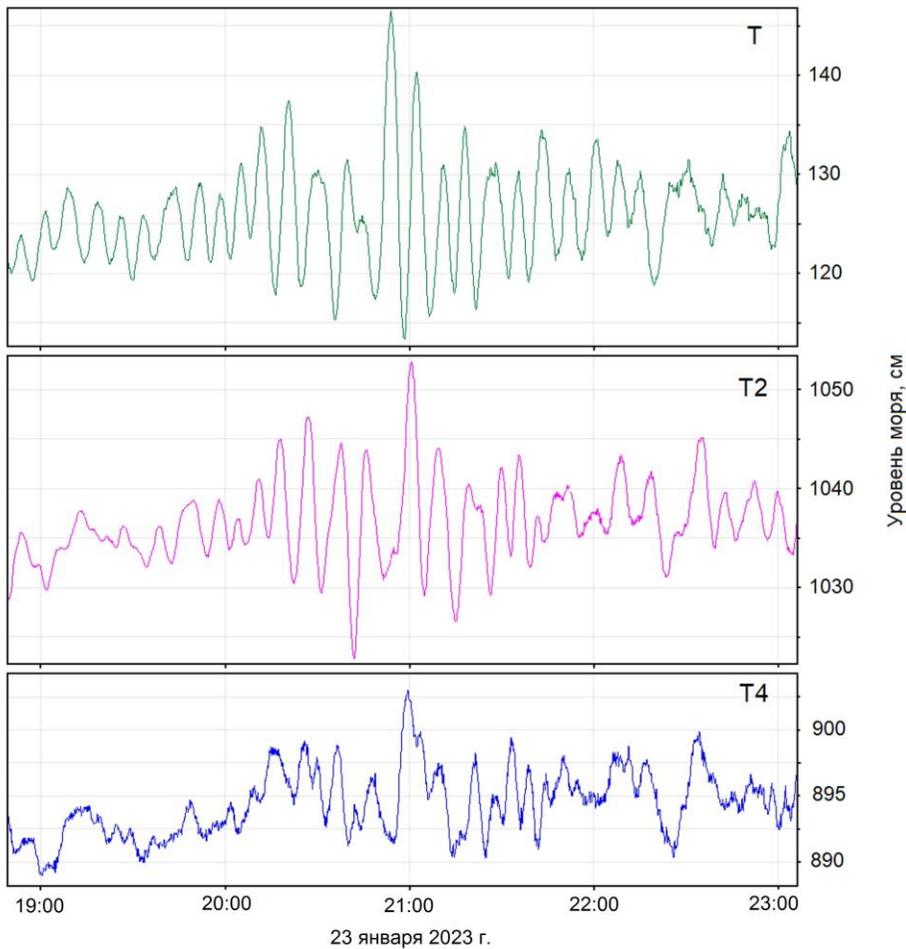
Отметим еще одно уникальное свойство акватории бухты Торгового порта – наличие интенсивных сейшевых колебаний на периоде  $\sim 3$  мин, затрудняющих работу причала, обслуживающего паромную переправу [21]. Данный период соответствует одноузловой продольной сейше бухты (табл. 2), а также моде Гельмгольца ее кутовой части ( $\sim 3$  мин). Это дополнительно усиливает колебания в кутовой и западной частях бухты.

Взаимодействие бухт. В ряде работ [4, 5, 22] рассматриваются проявления связи колебаний двух близко расположенных бухт и возможное наличие биений в них за счет разных периодов собственных колебаний. Авторы работы [5] полагают, что взаимодействие связанных бухт будет иметь место при условии  $d/l_1 < 5,0$ , где  $d$  – расстояние между входами в бухты;  $l_1$  – длина одной бухты. Для бухт в Холмске  $d/l_1 = 1045 \text{ м}/1008 \text{ м} = 1,04$ , и поэтому возможны проявления эффекта взаимодействия.

На рис. 5 приведен временной ход колебаний уровня моря без учета предвычисленного прилива в двух бухтах и в открытом море за 23 января 2023 г. Хорошо видно значительное увеличение амплитуд колебаний уровня с близкими частотами в бухтах с 20:00 до 22:00. Для открытого моря увеличение амплитуд колебаний в 1,5–2 раза меньше. При этом колебания уровня в 21:00 в бухте Холмск-Северный (измеритель Т2) и в открытом море (измеритель Т4) почти совпадают по фазе, а в бухте Торгового порта (измеритель Т) находятся в противофазе с ними. Отметим, что такие синхронные увеличения амплитуд наблюдаются достаточно часто, при этом имеют место случаи, когда колебания с максимальными амплитудами в бухтах совпадают по фазе (напр., 11 марта 2023 г.).

Рассмотрим условия генерации таких колебаний. Они могут быть разными [14], но обычно связаны с атмосферными возмущениями. На рис. 6 приведен фрагмент синоптической карты с сайта погоды [gr5.ru](http://gr5.ru) за 20.01.2023 г. на 06:00. Видно, что на момент образования в бухтах сейш большой амплитуды над южной оконечностью о. Сахалин перемещался циклон, который сопровождался продолжительными северо-северо-восточными ветрами со скоростями  $7\text{--}19 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и порывами до  $15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Очевидно, что генерация сейш вы-

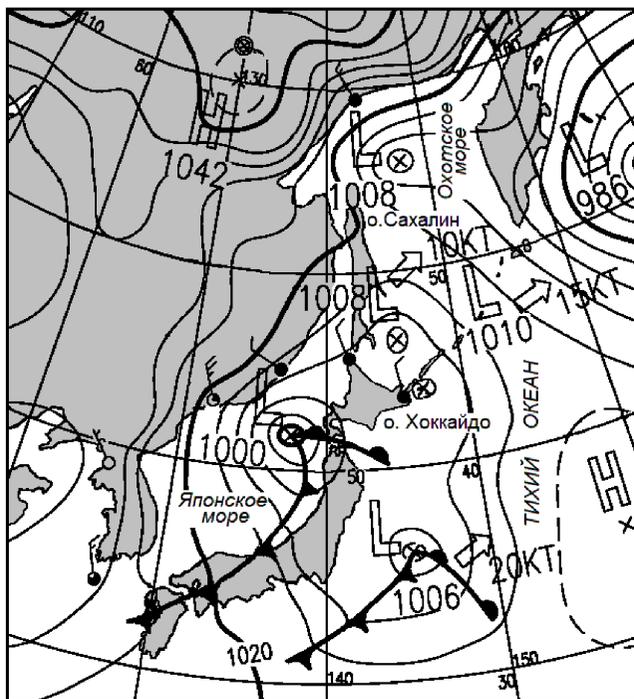
звана воздействием этого циклона. В то же время фоновое волнение к моменту начала генерации сейш не превышало 5 см для волн с периодами до 10 мин. А штормовые волны пришли в пункты наблюдения через 12 ч после появления сейш максимальной амплитуды и достигли своего максимума в 70 см через 21 ч.



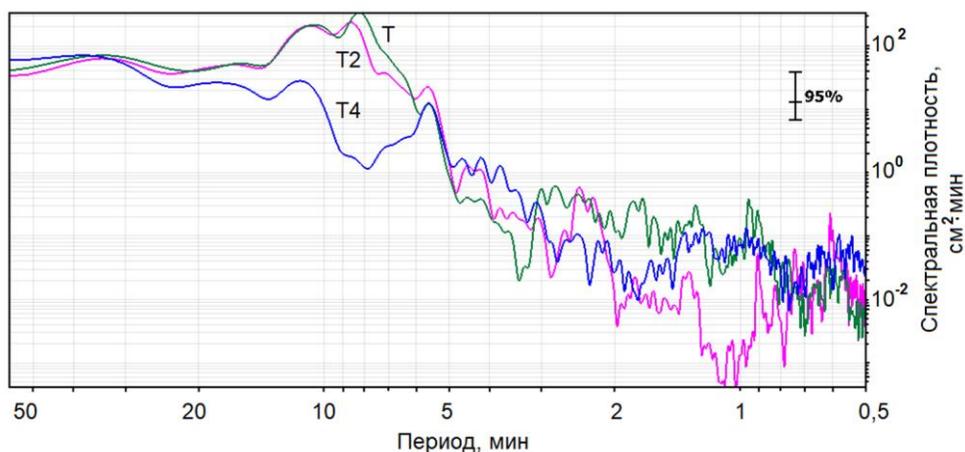
**Р и с. 5.** Временной ход колебаний уровня по рядам с вычтенным предвычисленным приливом в двух бухтах Холмска и в открытом море 23 января 2023 г. с 19:00

**Fig. 5.** Time variation of sea level oscillations using the series with the subtracted precalculated tide in two bays of Kholmok and in the open sea on January 23, 2023 starting from 19:00

Для рассматриваемых отрезков временных рядов (рис. 5) рассчитаны спектральные плотности колебаний уровня моря, приведенные на рис. 7. Эти более детальные графики показывают наличие пиков на периоде 5,62 мин для всех измерителей, а также на периодах 8,17 и 10,5 мин – для измерителя Т, на периодах 8,65 и 10,92 мин – для измерителя Т2 и на периоде 11,37 мин – для измерителя Т4. Для периодов ~ 8 мин в спектральной плотности колебаний уровня, рассчитанной по данным измерителя Т4, наблюдается существенный минимум.



**Р и с. 6.** Фрагмент синоптической карты с сайта погоды rp5.ru за 20.01.2023 г. на 06:00  
**Fig. 6.** Fragment of a synoptic map from the open weather site rp5.ru for January 20, 2023 at 6:00

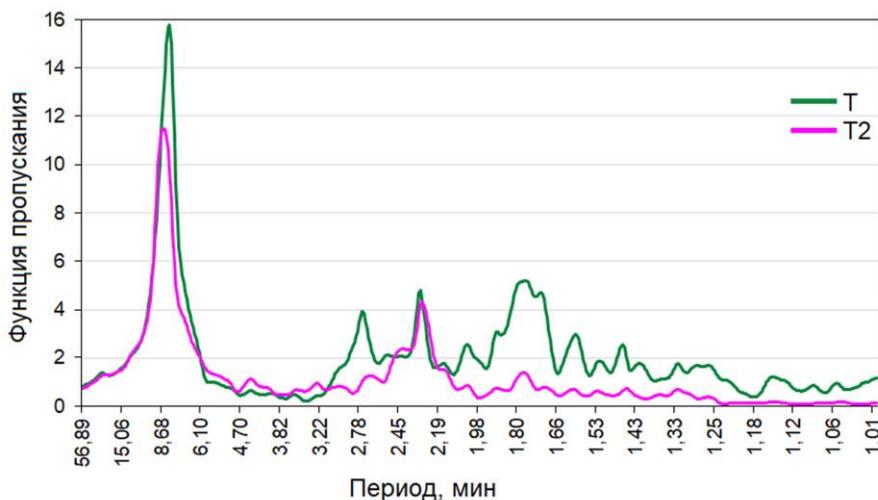


**Р и с. 7.** Спектральные плотности колебаний уровня моря  
**Fig. 7.** Spectral densities of sea level fluctuations

Поскольку резонансные характеристики шельфа влияют на измерения приборов, стоящих в бухтах, они могут быть удалены из спектров на входных участках путем деления спектров на спектр прибора, установленного на шельфе, как предложено в работе [5]. Квадратный корень из этого соотношения можно рассматривать как оценку функции пропускания на входе, т. е. как

относительное усиление волн, приходящих с шельфа в бухту. И поскольку измеритель Т4 располагался на некотором удалении от входов в бухты (рис. 1), можно полагать, что на него слабо воздействуют волны, излучаемые из бухт на резонансных частотах.

Рассчитанные по измеренным колебаниям уровня в обеих бухтах функции пропускания приведены на рис. 8. Видно, что резонансные пики пропускания для обоих входов выглядят более резкими, чем в спектральных плотностях (рис. 7), и что соответствующие периоды немного отличаются: для бухты Торгового порта период равен 8,0 мин, для бухты Холмск-Северный – 8,53 мин. Как считают авторы работы [5], такие небольшие сдвиги не удивительны, поскольку спектр на шельфе не является постоянным.



**Рис. 8.** Функции пропускания (усиления) на входах в бухты  
**Fig. 8.** Admittance (amplification) functions at the inlets of the bays

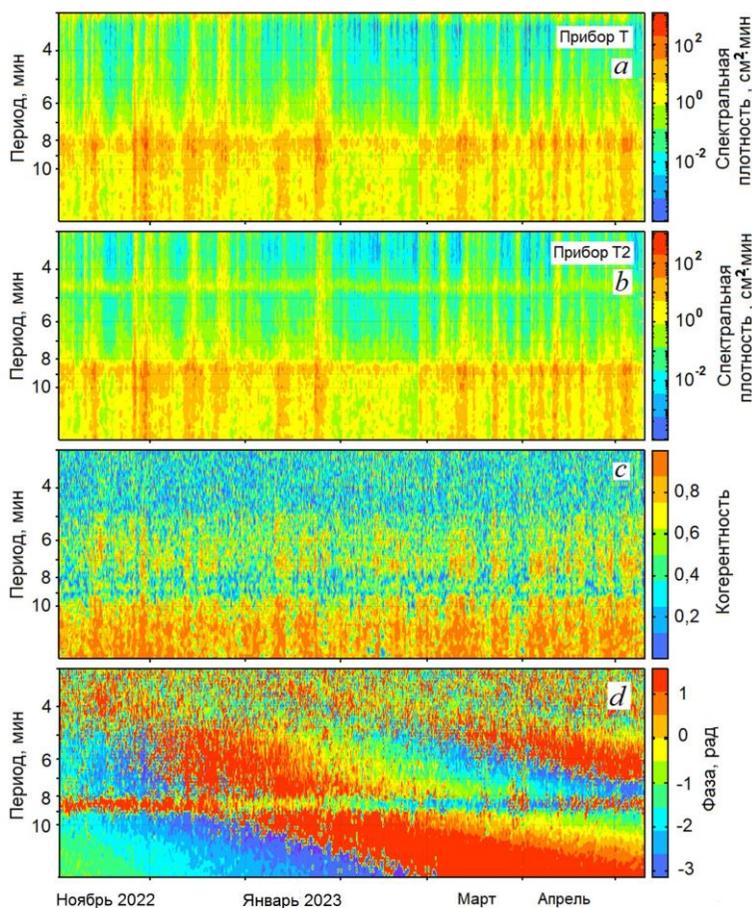
Кроме основных резонансных пиков на входе в бухты на рис. 7, 8 также видны несколько вторичных пиков. И если для бухты Торгового порта пик на периоде первой моды сейш 2,7 мин присутствует, то пика на этом периоде для бухты Холмск-Северный не наблюдается. Также в обеих бухтах на периоде 2,29 мин имеются почти совпадающие пики, которые не соответствуют собственным колебаниям бухт (табл. 3). По-видимому, проявление данного периода обусловлено возникновением связанных колебаний в бухтах.

Бухты можно рассмотреть как систему связанных осцилляторов. Такая система характеризуется спектром нормальных частот<sup>3</sup>, которые разумно сравнивать с парциальными частотами. Парциальная система получается из исходной путем удаления связи. Например, закрепляется один из маятников, связанных пружинкой, или закрывается вход в одну из бухт. Парциальные частоты всегда лежат между нормальными<sup>3</sup>. В табл. 3 приведены парциальные периоды, так как их значения рассчитаны без учета наличия соседней бухты.

<sup>3</sup> Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. М. : Наука, 1984. 432 с.

В системе связанных осцилляторов возможно два вида колебаний – синфазные и противофазные. Например, если осцилляторы представляют собой маятники, связанные пружиной, синфазные колебания будут иметь место, если пружина не работает, а противофазные – если пружина работает. Для бухт это можно представить так: синфазные колебания происходят, когда линии тока направлены из бухты в открытое море, а противофазные – когда они проходят из одной бухты в другую [4, с. 131]. Период противофазных колебаний меньше, чем синфазных [4, с. 130].

Взаимодействие холмских бухт подтверждают графики спектрограмм флуктуаций уровня, корреляции и разности фаз колебаний для этих бухт (рис. 9). На спектрограммах колебаний уровня моря для каждой бухты (рис. 9, *a*, *b*) хорошо видны горизонтальные полосы на периодах  $\sim 8$  мин. Причем данные колебания были интенсивны весь интервал наблюдений. За счет связи колебание с указанным периодом передается из бухты Холмск-Северный в бухту Торгового порта и проявляется в ней достаточно интенсивно.



**Рис. 9.** Спектрограммы колебаний уровня моря в двух бухтах (*a*, *b*), корреляции (*c*) и разности фаз (*d*)

**Fig. 9.** Spectrograms of sea level oscillations in two bays (*a*, *b*), correlations (*c*) and phase differences (*d*)

Похожая картина наблюдается, например, и в системе севастопольских бухт [7, 8]. Мода Гельмгольца Севастопольской бухты проникает в соседние Карантинную, Круглую и другие бухты, а мода Гельмгольца Карантинной бухты проявляется с достаточной интенсивностью в Севастопольской бухте.

Постоянное присутствие периода  $\sim 8$  мин в спектре колебаний уровня в рассматриваемых бухтах можно объяснить тем, что мода Гельмгольца обычно возбуждается легче, чем прочие моды собственных колебаний [3]. Также, как указывалось выше, источником длинноволновых колебаний с указанным периодом, регистрируемых на записях холмского мареографа, являются длинноволновые резонаторы, аккумулирующие и усиливающие энергию захваченных волн в районе о. Монерон и на шельфе вблизи г. Чехов [19, с. 44]. На спектрограмме когерентности (рис. 9, *d*) на периодах колебаний  $\sim 8$  мин также видна полоса с когерентностью 0,6–0,8, подтверждающая связанность колебаний в данных бухтах.

Взаимодействие колебаний в соседних бухтах хорошо показывает спектрограмма разности их фаз (рис. 9, *d*). Здесь на периодах 8–9 мин присутствует стабильная горизонтальная полоса для всего периода наблюдений, соответствующая диапазону периодов собственных колебаний бухт. При этом в январе 2023 г. колебания были близки к синфазным, а в марте – апреле 2023 г. – к противофазным. Также в этой полосе наблюдается достаточно медленное циклическое изменение фазы. Такой эффект нами был обнаружен и затем описан в работе [1], он объясняется синхронизацией колебаний в бухте приходящими на вход волнами <sup>4</sup>.

На собственных периодах рассматриваемых бухт, меньших 8 мин, связь между бухтами не наблюдаются, несмотря на то что в спектральных плотностях колебаний уровня моря пики на таких периодах существуют. Видимо, это связано с тем, что взаимодействие осцилляторов на периодах более высоких собственных мод по каким-то причинам затруднено. Данное обстоятельство требует дальнейших исследований.

В работе [4] рассмотрены частные случаи решения уравнения Лагранжа для изолированной системы двух бухт при их взаимодействии. С использованием формулы из указанной работы нами был выполнен расчет периодов биений для случая, когда сейши изначально существуют только в одной из двух бухт:

$$T_b = \frac{2\pi}{(n_2 - n_1)/2}, \quad (5)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – частоты колебаний в бухтах. Расчет показал, что для выделяющихся в спектральной плотности пиков в двух бухтах с периодами 8,17 и 8,65 мин период биений равен 294,5 мин (4,91 ч). В то же время в спектральных плотностях колебаний уровня, рассчитанных по экспериментальным данным для трех точек наблюдения, выделяется пик (табл. 1) с периодом 4,82 ч (289,2 мин), отличающийся от расчетного на 1,8%, что находится в пределах погрешности вычисления спектральной плотности. И этот волно-

---

<sup>4</sup> Осипов Г. В., Половинкин А. В. Синхронизация внешним периодическим воздействием. Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского. Нижний Новгород, 2006. 78 с.

вой процесс не вызван приливными гармониками или сейшами, а значит, действительно является проявлением биения, обусловленного связью между бухтами.

### Заключение

Проведены длительные ( $> 7$  мес) наблюдения колебаний уровня в смежных бухтах Торгового порта и Холмск-Северный, расположенных на расстоянии 1008 м, а также в прилегающей к ним акватории Татарского пролива. Дискретность проведенных измерений одна секунда.

Анализ колебаний уровня для диапазона периодов волн 1–30 ч, выполненный по натурным данным с целью исключения приливных гармоник, показал наличие четырех волновых процессов с периодами 1,6–6,7 ч неприливной природы. Выполненные модельные расчеты указывают на то, что волновые процессы с такими периодами могут быть отнесены к шельфовым сейшам, волнам Пуанкаре, сейшам Татарского пролива.

Спектральный анализ диапазона периодов 1–10 мин показал присутствие сейш с периодами 1,83–8,17 мин в бухте Торгового порта и с периодами 1,32–8,65 мин – в бухте Холмск-Северный. В спектральных плотностях колебаний уровня Татарского пролива выделяются пики на периодах 5,62 и 11,37 мин, а на периоде  $\sim 8$  мин наблюдается хорошо выраженный минимум.

Показано, что во время генерации сейшевых колебаний большой амплитуды над районом наблюдений перемещался циклон, который сопровождался продолжительными северо-северо-восточными ветрами со скоростями  $7\text{--}19 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  и порывами до  $15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Установлено, что на протяжении всей серии натурных наблюдений в бухтах Холмска существовали связанные колебания на периоде  $\sim 8$  мин, соответствующем периоду моды Гельмгольца бухты Холмск-Северный. Данные колебания возбуждаются в этой бухте и за счет связи передаются в бухту Торгового порта. Указанные колебания в различные моменты времени имели как синфазную, так и противофазную пространственную структуру. На периодах высоких собственных мод взаимодействия между бухтами не выявлено.

С использованием спектрального анализа данных натурных наблюдений уровня выделены биения с периодом 4,82 ч (289,2 мин), возникающие в результате взаимодействия мод с близкими периодами, равными 8,17 и 8,65 мин.

Указанные факты, а также соответствие расстояния между входами в бухты критерию условия взаимодействия свидетельствуют о наличии связанных колебаний в двух смежных бухтах – Торгового порта и Холмск-Северный.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев Д. П., Ковалев П. Д., Кириллов К. В. Исследование опасных морских явлений в прибрежной зоне по результатам натурных наблюдений // Геосистемы переходных зон. 2017. Т. 1, № 2. С. 18–34. EDN ZBAFJT.
2. Parker В. В. Tidal Analysis and Prediction. Silver Spring, Maryland : U.S. Department of Commerce, 2007. 378 p.

3. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
4. Nakano M., Fujimoto N. Seiches in Bays Forming a Coupled System // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1987. Vol. 43, iss. 2. P. 124–134. <https://doi.org/10.1007/BF02111888>
5. Coupling between two inlets: Observation and modeling / P. L.-F. Liu [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2003. Vol. 108, iss. C3. 3069. <https://doi.org/10.1029/2002JC001478>
6. Tsunami resonance and spatial pattern of natural oscillation modes with multiple resonators / R. Aranguiz [et al.] // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124, iss. 11. P. 7797–7816. <https://doi.org/10.1029/2019JC015206>
7. 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>
8. Sea Level Oscillations Spectra of a Shallow Coastal Bay: Cost-Effective Measurements and Numerical Modelling in Kruglaya Bay / Yu.V. Manilyuk [et al.] // Regional Studies in Marine Science. 2024. January. V. 69. 103326, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103326>
9. Плеханов Ф. А., Ковалев Д. П. Программа комплексной обработки и анализа временных рядов данных уровня моря на основе авторских алгоритмов // Геоинформатика. 2016. № 1. С. 44–53. EDN VQZVLF.
10. Munk W. H., Snodgrass F. E., Gilbert F. Long waves on the continental shelf: an experiment to separate trapped and leaky modes // Journal of Fluid Mechanics. 1964. Vol. 20, iss. 4. P. 529–544. <https://doi.org/10.1017/S0022112064001392>
11. Wilson B. W. Seiches // Advances in Hydroscience. 1972. Vol. 8. P. 1–94. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-021808-0.50006-1>
12. Korgen B. J. Seiches: transient standing-wave oscillations in water bodies can create hazards to navigation and unexpected changes in water conditions // American Scientist. 1995. Vol. 83, no. 4. P. 330–341.
13. De Jong M. Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbor basins. Print Partners Ipskamp B.V., 2004. 119 p.
14. Rabinovich A. B. Seiches and Harbor Oscillations // Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Singapore : World Scientific Publishing Company, 2009. P. 193–236. [https://doi.org/10.1142/9789812819307\\_0009](https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009)
15. Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Исследование сейшевых колебаний в бухте со свободным входом // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 4. С. 16–25. EDN ZMNTTL. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-4-16-25>
16. Мурти Т. С. Сейсмические морские волны цунами. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 447 с.
17. Манилюк Ю. В., Санников В. Ф. Исследование сейшевых колебаний в бухте переменной глубины // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 2. С. 4–12. EDN WCVLBK. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-4-12>
18. Невельское землетрясение и цунами 2 августа 2007 года, о. Сахалин / Отв. ред. Б. В. Левин, И. Н. Тихонов. М. : Янус-К, 2009. 202 с.
19. Исследование гидродинамического режима на акватории Холмского морского порта / А. С. Втюрина [и др.] // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2004. № 1. С. 40–51. EDN GRFHIL.
20. Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Исследование влияния геометрических характеристик залива на сейшевые колебания в замкнутом бассейне // Морской гидрофизический журнал. 1996. № 4. С. 3–11.
21. Шевченко Г. В., Ковалев П. Д., Ковалев Д. П. Резонанс волн на паромной переправе // Мир транспорта. 2012. № 1. С. 58–65.

22. *Nakano M.* The secondary undulations in bays forming a coupled system // Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan. 3rd Series. 1932. Vol. 14. P. 372–380. [https://doi.org/10.11429/ppmsj1919.14.0\\_372](https://doi.org/10.11429/ppmsj1919.14.0_372)

*Об авторах:*

**Ковалев Дмитрий Петрович**, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1б), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5184-2350**, **ResearcherID: A-9300-2016**, **Scopus Author ID: 26032627700**, **SPIN-код: 8343-8577**, [d.kovalev@imgg.ru](mailto:d.kovalev@imgg.ru)

**Манилюк Юрий Владимирович**, научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5752-7562**, **ResearcherID: P-6662-2017**, **Scopus Author ID: 6602563261**; **SPIN-код: 4548-0051**, [uvmsev@yandex.ru](mailto:uvmsev@yandex.ru)

**Ковалев Петр Дмитриевич**, ведущий научный сотрудник, лаборатория волновой динамики и прибрежных течений, ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693022, Россия, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1б), доктор технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7509-4107**, **ResearcherID: V-8662-2018**, **Scopus Author ID: 16429135400**, **SPIN-код: 7465-3828**, [p.kovalev@imgg.ru](mailto:p.kovalev@imgg.ru)