

Научная статья

УДК 551.46.06:551.466.6(571.645)  
EDN: CNZLGB

## Особенности волновых процессов в Южно-Курильском проливе по данным наблюдений

Д. П. Ковалев, П. Д. Ковалев ✉

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*  
✉ kovalev\_pd@outlook.com

Поступила в редакцию 15.08.2022; одобрена после рецензирования 03.04.2023;  
принята к публикации 26.04.2023.

### *Аннотация*

*Цель.* Целью работы является изучение волнения в Южно-Курильском проливе в диапазоне периодов от ветровых волн до приливных с использованием данных натуральных наблюдений и объяснение наблюдаемых волновых процессов с помощью существующих теорий и моделей.

*Методы и результаты.* Рассмотрены результаты анализа долговременных (до 12 месяцев) временных серий наблюдений за волнением и температурой воды с дискретностью 1 с в трех пунктах прибрежной зоны Южно-Курильского пролива, выполненных с использованием донных автономных регистраторов волнения АРВ-К14. Для обнаружения волновых процессов применялся спектральный анализ, который показал наличие значимых максимумов в спектральных плотностях. В результате обнаружены суточные и полусуточные приливные волны, а по временным рядам колебаний температуры морской воды – волны с периодом приливной гармоник  $K_1$ . Расчет периодов сейш выполнялся по формуле для полуоткрытой акватории и показал возможность генерации собственных колебаний уровня Южно-Курильского пролива с периодом 5,0 ч, который близок к периоду 4,8 ч, обнаруженному по данным наблюдений. Выявлен рост амплитуды сейш, начинающийся после достижения минимального уровня отлива, по мере увеличения уровня. Объяснение этому эффекту дано с использованием динамического механизма генерации прибрежных сейш глубоководными внутренними волнами, возбуждаемыми баротропным приливом, описанному в статьях Д. К. Чапмана и Г. С. Гизе.

*Выводы.* Показано, что вклад энергии в волновой процесс с периодом 4,8 ч могут вносить как сейши, так и приливная гармоника. Колебания уровня с периодами от 0,4 до 3 ч не зависят от приливных гармоник и, возможно, являются сейшами или краевыми волнами. По результатам спектрального анализа трех временных рядов установлено, что сейши в Южно-Курильском проливе имеют малую энергию и в нем нет условий для их значительного резонансного усиления. Показано, что часть энергии приливных волн передается сейшевым колебаниям бухт Крабовой и Малокурильской. Анализ колебаний уровня моря в диапазоне инфрагравитационных волн показал возможность перехода колебаний в Южно-Курильской бухте к хаотическим, что подтверждено моделированием поведения динамической системы – водной массы бухты, возбуждаемой приходящими волнами зыби.

**Ключевые слова:** сейши, зыбь, инфрагравитационные волны, приливные волны, хаотические колебания, колебания уровня моря, натурные наблюдения, спектральный анализ

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН (FWWM-2021-0002) при частичном финансировании грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-70.2022.1.5.

© Ковалев Д. П., Ковалев П. Д., 2023

Для цитирования: Ковалев Д. П., Ковалев П. Д. Особенности волновых процессов в Южно-Курильском проливе по данным наблюдений // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 478–496. EDN CNZLGB.

Original article

## Features of the Wave Processes in the South Kuril Strait Based on Observational Data

D. P. Kovalev, P. D. Kovalev ✉

*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

✉ [kovalev\\_pd@outlook.com](mailto:kovalev_pd@outlook.com)

### Abstract

*Purpose.* The work is purposed at studying the waves in the South Kuril Strait within the period ranges from the wind waves to the tidal ones using the field observations data, and also at explaining the observed wave processes using the existing theories and models.

*Methods and Results.* The results of the analyzed long-term (up to 12 months) time series of observations of waves and water temperature performed with the 1 s discreteness by the bottom autonomous wave recorders ARW-K14 at three points in the South Kuril Strait coastal zone are considered. To detect wave processes, the spectral analysis was applied. It showed the presence of significant maxima in the spectral densities that resulted in revealing the diurnal and semidiurnal tidal waves, and the time series of seawater temperature fluctuations made it possible to find out the waves with a period of the tidal harmonic  $K_1$ . The seiche periods were calculated by the formula for a semi-open water area, and it showed the possibility of generating eigen oscillations of sea level in the South Kuril Strait with a period 5.0 hours, which was close to the period 4.8 hours derived from the observational data. It was revealed that the seiches amplitude were increased after the ebb had reached its minimum level and further as the level grew. This effect (described by D. K. Chapman and G. S. Giese in their articles) is explained using the dynamic mechanism of generating the coastal seiches by deep-sea internal waves induced by a barotropic tide.

*Conclusions.* It is shown that both seiches and tidal harmonics can contribute energy to the wave process with a period 4.8 hours. The level fluctuations with the periods varying from 0.4 to 3 hours do not depend on tidal harmonics and, possibly, they are the seiches or the edge waves. The results of spectral analysis of three time series permitted to find out that seiches in the South Kuril Strait were of low energy and there were no conditions for their significant resonant amplification. It was shown that a part of the energy of tidal waves was transferred to the seiche oscillations in the Krabovaya and Malokuril'skaya bays. Having being analyzed, the sea level fluctuations in the range of infragravity waves showed the possibility of the South Kuril Bay fluctuations to transform to the chaotic ones, which had been confirmed by modeling the behavior of the dynamic system – the water mass of the bay excited by the incoming swell waves.

**Keywords:** seiches, swell, infragravity waves, tidal waves, chaotic vibrations, sea level fluctuations, field observations, spectral analysis

**Acknowledgements:** The study was carried out within the framework of state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB of RAS (FWWM-2021-0002) with partial funding by the grant of the President of Russian Federation for state support of the leading scientific schools of RF No. НШ-70.2022.1.5.

**For citation:** Kovalev, D.P. and Kovalev, P.D., 2023. Features of the Wave Processes in the South Kuril Strait Based on Observational Data. *Physical Oceanography*, 30(4), pp. 438-453.

## Введение

Знание характеристик волнового режима для конкретных морских акваторий представляет практический интерес, связанный с судоходством, рыбным промыслом и прибрежной инженерией. Поскольку морские волны могут усиливаться в зависимости от метеоусловий и батиметрических особенностей побережья, необходимо проводить изучение сопутствующих волнению факторов. Поэтому проблема изучения волнения и условий генерации волн в конкретных акваториях является актуальной.

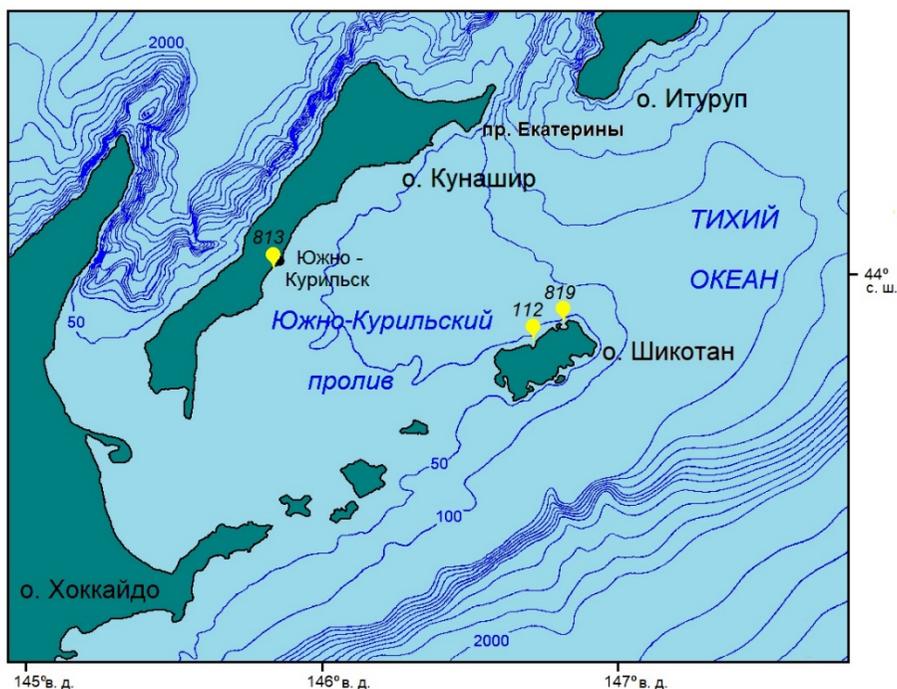
В материалах исследований, относящихся к рассматриваемой акватории, опубликованных ранее в работах [1, 2], приведены результаты изучения волнения в Южно-Курильской бухте – в основном в диапазоне периодов ветровых волн и зыби – с использованием временных серий наблюдений при помощи приборов, установленных в Южно-Курильской бухте. Что касается исследования волнения в самом проливе, в этих работах сделаны лишь небольшие заключения только для диапазона длинных волн.

Исходя из этого, для детального изучения волнового поля в рассматриваемой акватории было решено провести длительные измерения волнения в широком диапазоне периодов колебаний уровня моря в трех пунктах с противоположных сторон Южно-Курильского пролива. С учетом предположения о том, что активность сейш обусловлена большими приливами [3], представляется возможным проверить это утверждение для рассматриваемой акватории.

Основными методами для проведения рассмотренных здесь исследований являлись, во-первых, длительные инструментальные измерения колебаний уровня моря и температуры воды в широком диапазоне периодов; во-вторых, спектральный, взаимно спектральный и спектрально-временной анализ. Это позволяет обнаружить волновые процессы, которые происходят при наблюдаемых колебаниях уровня и температуры, по максимумам энергии. Выделенные волновые процессы моделируются в соответствии с известными теориями и формулами.

Целью исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, является изучение волнения в диапазоне периодов от ветровых волн до приливных в Южно-Курильском проливе с использованием данных натуральных наблюдений. Полученные выводы позволяют учесть проявление волновых процессов в рассматриваемой акватории и избежать наступления негативных последствий для судоходства и рыболовства, а также при строительстве прибрежных инженерных сооружений.

В настоящей работе рассматриваются результаты исследования, полученные при изучении волнения в Южно-Курильском проливе в основном по измерениям двух приборов: один в акватории о. Шикотан, бухта Крабовая, с номером 112; другой – в Южно-Курильской бухте с номером 813 (рис. 1). Синхронно с этими двумя приборами измерения проводились третьим прибором с номером 819, установленным в б. Малокурильской, о. Шикотан. Однако полученный с его помощью временной ряд в области периодов волнения более 1 ч мало отличался от временного ряда прибора 813.



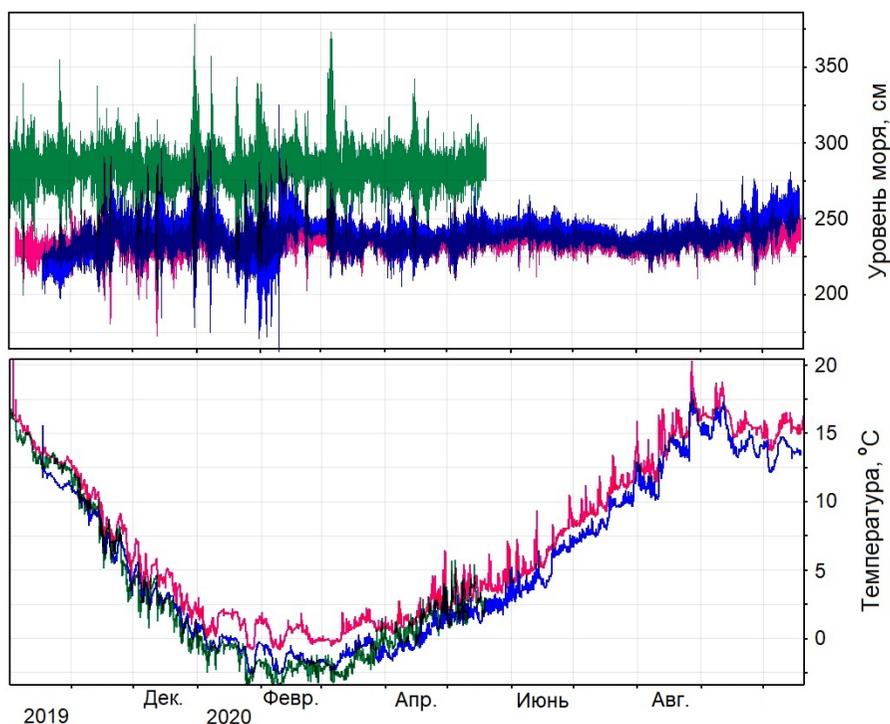
**Р и с. 1.** Карта Южно-Курильского пролива и места расположения приборов (желтые кружки)  
**F i g. 1.** Map of the South Kuril Strait and locations of the devices (yellow circles)

### Проведение наблюдений и полученные данные

Измерения проводились с использованием регистраторов волнения АРВ-14К. Были получены временные ряды наблюдений за уровнем и температурой моря с секундной дискретностью и продолжительностью 8 мес. в Южно-Курильской бухте и около 12 мес. в районе о. Шикотан в 2019–2020 гг. Совместная синхронная регистрация осуществлялась в течение около 6,5 мес. с октября 2019 по май 2020 г. Расстояние поперек Южно-Курильского пролива – между о. Кунашир и о. Шикотан по перпендикуляру к о. Кунашир, измеренное по карте мира 1985 v. 2 (URL: [http://retromap.ru/161985\\_47.058662,143.66374](http://retromap.ru/161985_47.058662,143.66374)), составляет около 60,8 км. Расстояние от о. Хоккайдо до о. Итуруп около 171,4 км, от о. Хоккайдо до пролива Екатерины 157,1 км, а протяженность о. Кунашир 107,9 км (рис. 1). Эти параметры необходимы для расчета резонансных свойств акватории Южно-Курильского пролива.

Полученные в результате измерений временные ряды колебаний уровня моря и температуры приведены на рис. 2. Поскольку приливные колебания существенно загромаждают рисунок, то из рядов данных с использованием программы *Кута*<sup>1</sup> [4] был вычтен предвычисленный прилив. Спектральный и взаимно-спектральный анализ временных рядов, результаты которого рассматриваются здесь, также выполнялся с использованием этой программы.

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



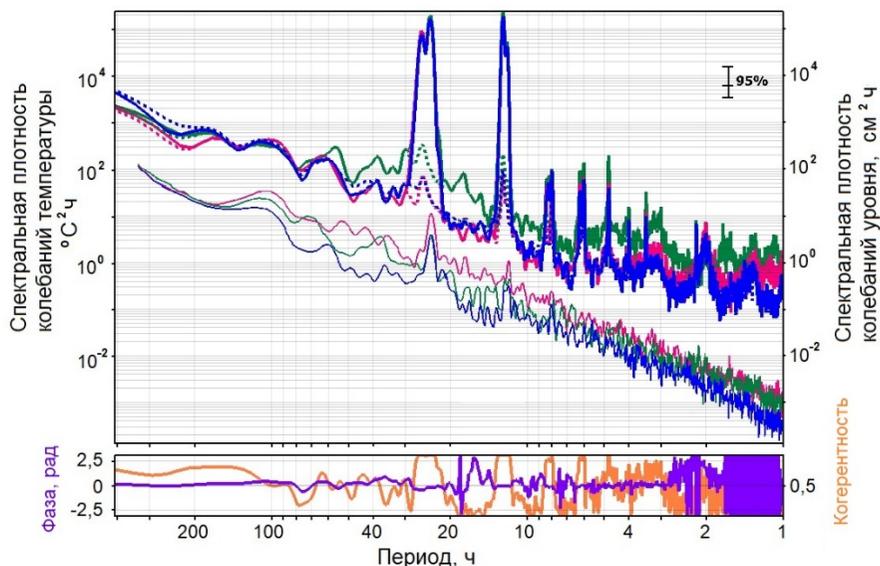
**Р и с. 2.** Временной ход колебаний уровня моря и температуры. Красный цвет – по данным прибора 112, синий – 819, зеленый – 813. Из временных рядов уровня вычтен предвычисленный прилив

**Fig. 2.** Time variation of the sea level and temperature fluctuations. Red color – based on the device 112 data, blue color – 819, green color – 813. The pre-calculated tide is subtracted from the level time series

### Анализ длинноволновых колебаний уровня моря

В этом разделе рассматриваются длинноволновые колебания уровня моря с периодом более 1 ч. На рис. 3 приведены спектральные плотности колебаний уровня моря, рассчитанные по всей длине измеренных рядов, в том числе и для временных серий, с вычтенным предвычисленным приливом. По этому рисунку можно судить, являются ли те или иные пики приливными гармониками. Существенно выделяются пики в диапазоне суточных и полусуточных приливных гармоник. При этом их периоды совпадают для всех трех пунктов наблюдения и близки к периодам  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $S_{O_2}$ ,  $S_2$  (таблица), приведенным в работе [5]. Приливные гармоника с более короткими периодами, как видно из рис. 3, обладают меньшей энергией, но также хорошо выделяются и превышают доверительный интервал.

Отметим, что задача детального приливного анализа в настоящей работе не ставилась. Здесь необходимо было показать, на каких периодах могут проявляться приливные гармоника, а на каких – другие типы волн, что сделано сравнением спектральных плотностей для исходных временных рядов и рядов с вычтенным предвычисленным приливом.



**Р и с. 3.** Спектральные плотности колебаний уровня моря (толстые линии). Пунктирные линии – спектральные плотности для временных рядов с вычтенным предвычисленным приливом; тонкие линии – спектральные плотности колебаний температуры. Зеленым цветом выделен спектр для б. Южно-Курильской (прибор 813), синим – б. Малокурильской (прибор 819), розовым – б. Крабовой (прибор 112). Когерентность (оранжевая линия) и фаза (фиолетовая линия) для временных рядов б. Южно-Курильской и б. Крабовой

**F i g. 3.** Spectral densities of the sea level fluctuations (thick lines). Dashed lines are the spectral densities for the time series with the subtracted pre-calculated tide; thin lines are the spectral densities of temperature fluctuations. Green color denotes the spectrum for the South Kuril Bay (device 813), blue color – for the Malokurilskaya Bay (device 819) and pink color – for the Krabovaya Bay (device 112). Coherence (orange line) and phase (purple line) are for the time series of the South Kuril and Krabovaya bays

### Периоды пиков в графиках спектральной плотности и соответствие их приливным гармоникам

#### Peak periods in the graphs of spectral density and correspondence to their tidal harmonics

Измеренный период, ч / Measured period, h	Период приливной гармоники, ч / Period of a tidal harmonic, h	Приливная гармоника по работе [5] / Tidal harmonic in [5]	Измеренный период, ч / Measured period, h	Период приливной гармоники, ч / Period of a tidal harmonic, h	Приливная гармоника по работе [5] / Tidal harmonic in [5]
29,93	29,07	$\alpha_1$	8,00	8,00	$SP_3^*$
25,85	25,85	$O_1, MK_1^*$	6,20	6,21	$M_4^*$
23,93	23,93	$K_1, 24 S_1$	4,80	4,86	$S_4^*$
12,43	12,44	$\alpha_2, SO_2^*$	6,00	6,00	$3KM_5$
12,00	12,00	$S_2$	4,00	4,00	$S_6^*$
8,42	8,49	$NO_3^*$			

\* Для мелководного прилива. /

\* For a low tide.

Были рассчитаны также спектральные плотности колебаний температуры морской воды. Графики достаточно гладкие с законом спадаания примерно – 1/2. МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 39 № 4 2023 483

Пик, превышающий 95%-ный доверительный интервал, для всех трех временных рядов имеет период 23,97 ч и соответствует приливной гармонике  $K_1$  (рис. 3). Пики на периодах 12,0 и 12,43 ч несколько меньше доверительного интервала, за исключением графика, относящегося к б. Малокурильской, но и здесь превышение незначительное. Периоды этих пиков также соответствуют приливному гармоникам.

Отметим еще одну особенность спектральной плотности температуры воды. Даже для волновых процессов с периодами 23,97 ч энергия спектрального максимума превышает средний уровень примерно на один порядок, в то время как для приливных волн уровня с этим же периодом превышение составляет более четырех порядков.

### Сейши

Хорошо известно, что в заливах, бухтах под воздействием различных факторов могут генерироваться собственные резонансные колебания акваторий – сейши. Результатам их изучения в разных акваториях Мирового океана посвящено много статей, например [6–9]. В то же время резонансные свойства акваторий конкретных побережий определяют параметры собственных колебаний этих акваторий, а периоды шельфовых сейш зависят от уклона морского дна. При этом, как полагают авторы работы [10], прибрежные воды обычно колеблются на резонансных частотах в диапазоне от 0,5 до 5 циклов в час, что характерно для конкретной гавани, залива или шельфа.

Энергия на возбуждение сейш может поступать из разных источников. Так, в работах [9, 11–13], оценивают энергию атмосферных возмущений, которая передается в открытом море метеоцунами, а они, в свою очередь, приходя в береговую зону или бухту, возбуждают в них сейши. Другие исследователи (например, в работе [14]) рассматривают стоячие волны в портовых бассейнах, возникающие из-за подачи энергии из открытого моря, где она может генерироваться более широким рядом механизмов, например приливом, прибоем, цунами, внутренними волнами и атмосферными возмущениями [3, 6, 7, 15]. При этом доминирующий источник может отличаться от гавани к гавани, в зависимости от наличия таких механизмов и конкретной географической ситуации гавани. Поэтому представляет интерес как рассмотреть сами сейши, так и определить источник их энергии.

Поскольку глубина вдоль Южно-Курильского пролива изменяется значительно, а формулы расчета сейш для переменной глубины моря достаточно сложные, для оценочного расчета использовалась простая формула по методу Дюбуа<sup>2</sup>, которая применима для расчета одноузловой сейши водоема переменной глубины. В этом методе осевая линия водоема делится на  $n$  участков длиной  $\Delta x$  и период вычисляется по формуле

$$T = \left( \frac{4}{\sqrt{g}} \right) \sum_{i=0}^{i=h} \Delta x / (\sqrt{H_i} + \sqrt{H_{i+1}}), \quad (1)$$

где  $H_i$  и  $H_{i+1}$  – глубина воды в точках пересечения осевой линии с перечисленными створами, равномерно распределенными по длине водоема.

---

<sup>2</sup> Сейши на озерах СССР / Н. М. Арсеньева [и др.]. Л. : Изд-во ЛГУ, 1963. 184 с.

Длина Южно-Курильского пролива от о. Хоккайдо до северной оконечности о. Кунашир разбивалась на 15 отрезков длиной по 10,9 км, и на границах каждого отрезка фиксировалась глубина, определяемая по батиметрической карте. Расчет с использованием формулы (1) показал период 5,0 ч. По данным наблюдений, в спектральной плотности присутствует пик с периодом 4,8 ч, т. е. достаточно близким к расчетному.

Отметим, что для диапазона периодов волн 4,8–5 ч, по данным работы [5], существует несколько приливных гармоник. Отделить, какая из них может передавать энергию сейшам (возможно, резонансным путем), не представилось возможным. Пик с периодом 4,8 ч присутствует на графиках спектральных плотностей для временных рядов с приливом для всех пунктов наблюдения, а для временных рядов с вычтенным приливом амплитуда волн в 2,8 раза меньше. Поэтому можно предположить, что обнаруженный волновой процесс является сейшей, а приливная гармоника передает ему часть энергии.

С учетом параметров Южно-Курильского пролива, приведенных выше, и средней глубины около 150 м, были определены периоды мод собственных резонансных колебаний с использованием формулы для полуоткрытых прямоугольных бассейнов длины  $L$  и однородной глубины  $H$  [9, с. 198]

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gH}} \quad \text{для моды } n = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

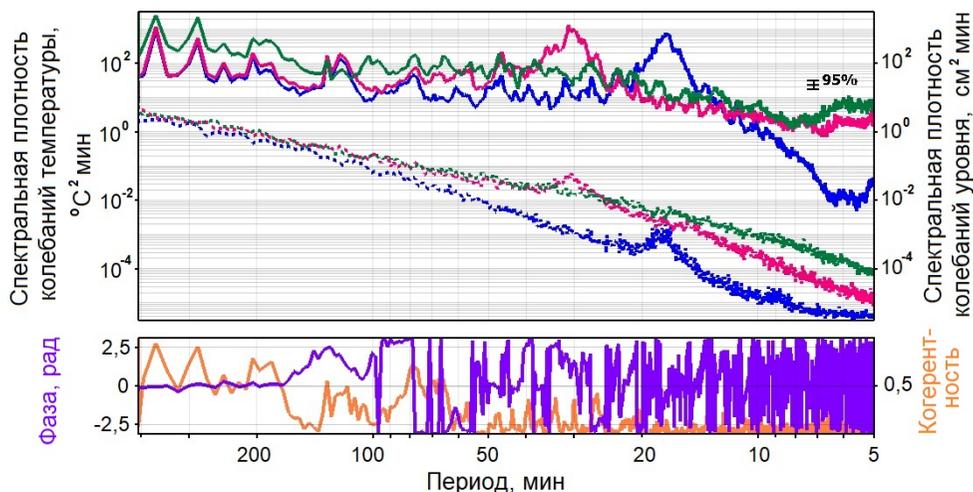
В результате расчета для акватории Южно-Курильского пролива были получены возможные периоды мод сейшевых колебаний от 0,4 до 2,9 ч. Отметим, что волновые процессы в проливе с периодом около 3 ч показаны в работах других авторов, например в [16, 17]. Авторы приведенных работ полагают, что этот максимум связан с модой Гельмгольца для Южно-Курильского пролива в целом.

В работе [18] сделан вывод, что периоды сейш, вычисленные по приведенным выше формулам (1), (2), как правило, оказываются весьма близкими к измеренным значениям, что получили и в данной работе. Таким образом, выполненные расчеты показывают, что в Южно-Курильском проливе возможна генерация сейш на периодах обнаруженных пиков в спектральной плотности колебаний уровня моря. И эти периоды определяются резонансными свойствами акватории пролива.

Далее рассмотрим волновые процессы с периодами колебаний уровня и температуры в диапазоне от 5 до 200 мин. Более короткие периоды поверхностных волн относятся к диапазону инфрагравитационных (ИГ) волн, и они будут анализироваться ниже. Рассчитанные спектральные плотности для этого диапазона приведены на рис. 4. На графиках спектральных плотностей, относящихся к бухтам Малокурильской и Крабовой, хорошо видны широкие пики на периодах около 18 и 30 мин соответственно. Эти пики относятся к собственным колебаниям бухт, и поскольку приборы располагались в бухтах, то эти пики хорошо выражены.

На графике спектральной плотности колебаний уровня (рис. 4) для Южно-Курильска также присутствуют пики, превышающие 95%-ный доверительный интервал, на периодах от 20 до 100 мин, но их превышение над общим уровнем

меньше порядка, и это связано с тем, что Южно-Курильская бухта более открытая и ее добротность ниже. Когерентность между временными сериями Южно-Курильская и Крабового на рассматриваемых периодах не превышает доверительного уровня, что очевидно из-за большого расстояния между пунктами, и на рисунке график когерентности поэтому не показан.



**Р и с. 4.** Спектральные плотности колебаний уровня (сплошные линии) и температуры (пунктирные) по данным приборов 819 (синий цвет), 112 (красный цвет), 813 (зеленый цвет); когерентность (оранжевая линия) и фаза (фиолетовая линия) между временными рядами в бухтах Малокурильской (прибор 819) и Крабовой (прибор 112)

**Fig. 4.** Spectral densities of level fluctuations (solid lines) and temperature (dotted lines) based on the data of devices 819 (blue color), 112 (red color) and 813 (green color); coherence (orange line) and phase (purple line) are between the time series of the Malokurilskaya (device 819) and Krabovaya (device 112) bays

Отметим, что для рассматриваемого района В. Я. Марамзиным [19] была построена численная модель сейшевых колебаний с использованием метода конечных элементов. При этом рассчитывались колебания с периодами короче двух часов. Один из полученных в расчете периодов, соответствующий собственным колебаниям Южно-Курильского пролива, равен 43,8 мин и достаточно близок к зарегистрированному нами 47 мин (разница в 7 %). Небольшое различие связано, по-видимому, с приближениями, принятыми при построении численной модели.

По данным спектрального анализа, приведенным в работе [16], максимум в спектре имеет тот же период, что и по нашим данным. В то же время, поскольку когерентность для этого периода между временными рядами бухт Южно-Курильской и Крабовой не превышает 0,05 и значительно ниже доверительного уровня 0,4, можно заключить, что колебания уровня с этим периодом обусловлены локальной топографией Южно-Курильской бухты и они не являются сейшами всего Южно-Курильского пролива.

Таким образом, результаты спектрального анализа трех временных рядов показывают, что сейши в Южно-Курильском проливе имеют малую энергию

и проявляются сравнительно слабо по сравнению с бухтами Малокурильской и Крабовой, а значит, здесь нет условий для значительного резонансного усиления проходящих волн. Авторы работы [20] М. Накано и С. Уноки также относят Южно-Курильский пролив к акваториям, в которых редко наблюдаются сильные сейши. Тем не менее для колебаний уровня с периодами от 0,42 до 2,9 ч и на периоде 4,8 ч когерентность между временными рядами колебаний уровня, измеренными по разным сторонам Южно-Курильского пролива, превышает 0,5 (см. рис. 3). Можно заключить, что они являются сейшами акватории пролива, а наибольшей энергией обладают колебания с периодом 4,8 ч.

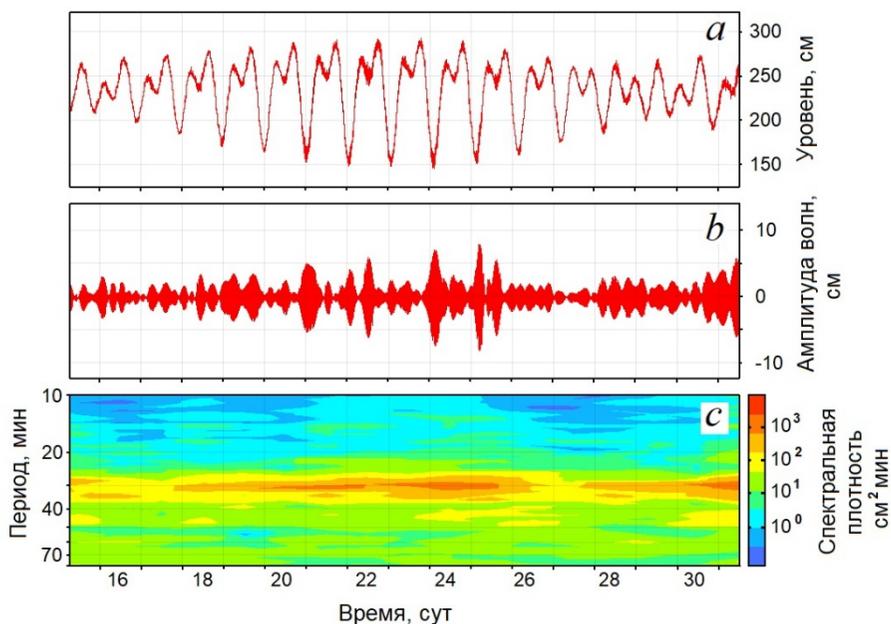
На графиках спектральной плотности температуры (рис. 4) выделяются только пики, соответствующие собственным частотам бухт Малокурильской и Крабовой. При этом, поскольку энергия колебаний уровня значительно больше для поверхностных волн, существует возможность ее передачи колебаниям температуры – внутренним волнам.

### **Передача энергии сейшам от приливных волн**

Как отмечалось выше, исследователи полагают, что энергия на возбуждение сейш может поступать от приливных волн. Одним из основополагающих исследований этого направления можно, по-видимому, считать работу [3]. Ее авторы на основе анализа 10-летних временных рядов показали, что большие приливы необходимы для создания высокой сейшевой активности. Рассмотрим это утверждение применительно к бухтам Южно-Курильского пролива.

С использованием опции программы *Кута* были рассчитаны значимые высоты волн с периодом 27–34 мин, которые определяются как средние высоты волн, для б. Крабовой и с периодом 16–19 мин для б. Малокурильской. Графики для б. Крабовой приведены на рис. 5. Для б. Малокурильской они имеют похожий вид. В Южно-Курильской бухте по результатам спектрально-временного анализа наблюдаются волновые процессы с периодами от 20 до 100 мин, но превышение высоты этих волн над фоновым уровнем небольшое, не более чем в три раза. К тому же энергия фоновых колебаний, как видно из рис. 4, высокая, и по этой причине определить, передается ли здесь приливная энергия сейшам или поступает из других источников, не представляется возможным.

На рис. 5 *a, b* хорошо видно, что с увеличением высоты приливной волны растет амплитуда сейш, что подтверждается и спектрограммой (рис. 5, *c*). При этом максимум амплитуды сейш соответствует минимальным уровням моря. Так, во время максимальных отливов 21, 24, 25 июня около ноля часов наблюдаются сейши с периодом около 30 мин и максимальной амплитудой. Можно сделать вывод, что часть энергии приливной волны передается сейшам. В то же время, как показали такие же графики, но для штормовой погоды, амплитуда сейш превышает значения максимумов, возбужденных приливной волной, более чем в 1,5–2 раза. Это означает, что большая часть энергии в рассматриваемой акватории передается сейшевым колебаниям от других источников – энергии атмосферных возмущений, которая сначала в открытом море передается длинным волнам, и уже они, приходя в береговую зону или бухту, способствуют генерации сейш.



**Рис. 5.** Колебания уровня моря с приливом (а), амплитуда колебаний сейш с периодом около 30 мин (b), спектрограмма (с) для б. Крабовой, июнь 2020  
**Fig. 5.** Sea level fluctuations with a tide (a), amplitude of seiche fluctuations with a period of about 30 min (b) and spectrogram (c) for the Krabovaya Bay (June, 2020)

Для понимания возможного механизма влияния приливов на сейши обратимся к исследованиям, посвященным этой тематике. Так, в работе <sup>3</sup> показано, что развитие неглубокого пикноклина (тонкого смешанного слоя) увеличивает частоту Брента – Вьяйсяля и уменьшает наклон приливного потока. При надлежащем астрономическом воздействии и условиях вертикальной стратификации энергия баротропного прилива на шельфе или вблизи него переносится на шельф в направлении генерации внутренних приливов и берегового потока в воды платформы, что приводит к увеличению активности прибрежных сейш.

В то же время в работах [21–23] и других описаны исследования взаимосвязи между наклоном дна и генерацией внутренних приливов баротропным приливом. Показано и в настоящее время широко признано <sup>3</sup>, что этот зависящий от широты процесс происходит во всем мире и на региональном, а также глобальном уровнях.

То есть в конечном итоге получаем связь баротропного прилива с прибрежными сейшами. Такая гипотеза была предложена в работе [24] и подтверждена наблюдениями за баротропными приливами в юго-восточной части Карибского моря [3]. Теоретическая поддержка этой гипотезы приводится в ста-

<sup>3</sup> Coastal seiches, internal tide generation, and diapycnal mixing off Puerto Rico / E. Alfonso Sosa [et al.] // Variabilidad temporal de la producción primaria fitoplanctónica en la estación CaTS (Caribbean Time-Series Station): Con énfasis en el impacto de la marea interna semidiurna sobre la producción : Ph. D. Dissertation / E. Alfonso Sosa. Mayagüez, Puerto Rico : Department of Marine Sciences, University of Puerto Rico, 2001. Apéndice D. P. 297–346.

тье [25], в которой исследован динамический механизм генерации прибрежных сейш глубокowodными внутренними волнами с использованием линейной двухслойной прибрежной модели, и в ней внутренние волны, приходя из глубокого океана, сталкиваются с топографией дна ступенчатого шельфа.

Много раньше некоторые исследователи, например Р. А. Харрис<sup>4</sup> [3], полагали, что сейши являются только метеорологически вынужденными. Однако в части случаев, как показали исследования [3], наблюдается обратная зависимость между скоростью ветра и активностью сейш; кроме того, отсутствие высоких уровней активности сейш после небольших приливов в юго-восточной части Карибского бассейна в течение 10-летнего периода наблюдений свидетельствует против метеорологического воздействия.

В рассматриваемом здесь случае генерации сейш их амплитуда растет с ростом высоты прилива и достигает максимума в сизигию. Это согласуется с вышеописанным механизмом генерации сейш. Тем не менее авторы допускают, что при значительном снижении энергии, передаваемой приливом сейшам, возможно возбуждение сейш в результате воздействия штормового волнения или совместным с приливом механизмами.

Что касается усиления сейш при минимальных уровнях отлива, то авторы предполагают наличие механизма, описанного в работе [26]. В ней показано, что синхронность инициирования волнового пакета и волны  $K_1$  связана с циклическим отделением приливного потока колебаний  $K_1$  от возвышенности, расположенной между островами в проливе Уруп, с сопутствующим порождением вихрей, которые впоследствии генерируют волновые пакеты.

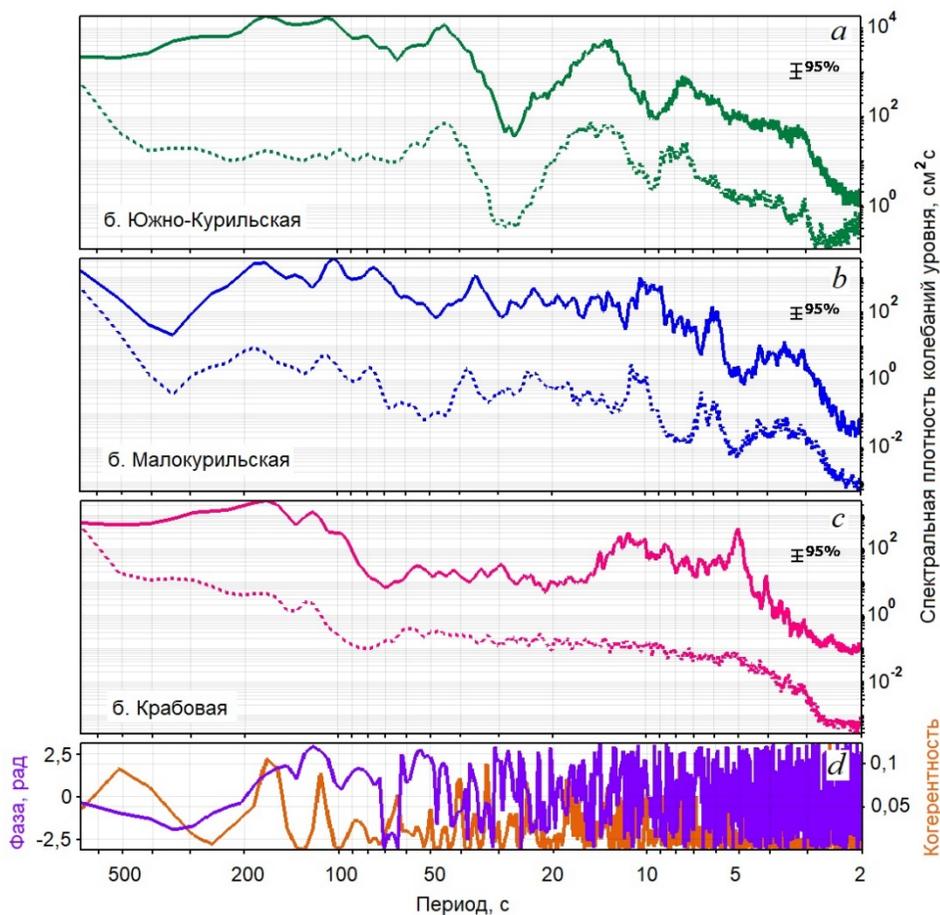
В рассматриваемом случае возможна похожая ситуация при отделении приливного потока на возвышенностях проливов между Южными Курильскими островами, связанных с Южно-Курильским проливом. Сходный эффект описан и по результатам исследования острова *Palawan* [27], в котором сделано предположение о сильном приливе над хребтом *Aves* в качестве вероятного механизма генерации солитонов, приходящих на южное побережье Пуэрто-Рико. В работах [3, 24] описаны дополнительные исследования, подтверждающие взаимосвязи внутреннего прилива – солитона – прибрежных сейш в северной части Карибского бассейна.

### **Диапазон периодов ветровых волн, зыби и ИГ волн**

Изучение этого диапазона периодов волн от примерно 5 с до 10 мин представляет интерес, поскольку, приходя в прибрежную зону, эти волны способствуют образованию ритмических форм рельефа, баров и могут быть ответственны за разрушение береговой линии и, как следствие, повреждение прибрежных инженерных сооружений, особенно с учетом того, что часть Южно-Курильска расположена на низком берегу у самого моря. В противоположность ему, Малокурильское и Крабозаводское расположены на берегах достаточно хорошо закрытых бухт, и волнение на побережье у этих поселений значительно меньше. Это также видно и из сравнения графиков спектральной плотности колебаний уровня моря для трех пунктов (рис. 6).

---

<sup>4</sup> *Harris R. A. Manual of Tides. Part V : Currents, Shallow-water tides, meteorological tides, and miscellaneous matters. Washington, 1907. Chapter 9. P. 472–482. URL: <https://archive.org/details/harris-1894-manual-of-tides-part-iv-b-and-v/page/n7/mode/2up> (date of access: 27.07.2023).*



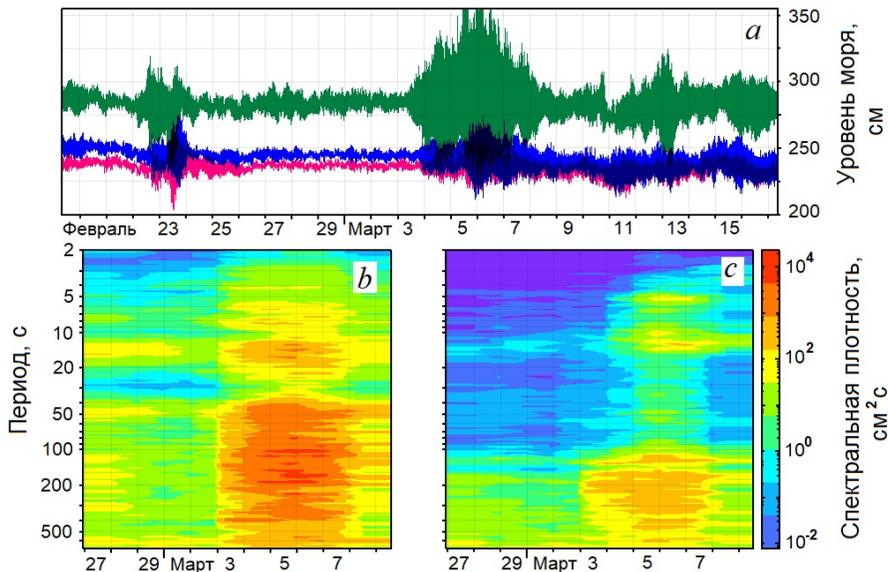
**Рис. 6.** Спектральные плотности колебаний уровня (*a – c*) для шторма 3–8 марта 2020 г. (сплошные линии) и для тихой погоды 26 февраля – 3 марта 2020 г. (пунктирные линии). Когерентность (оранжевая линия) и фаза (фиолетовая линия) между временными рядами в б. Малокурильской и б. Крабовой (*d*)

**Fig. 6.** Spectral densities of level fluctuations (*a – c*) for the storm on March 3–8, 2020 (solid lines) and for calm weather in February 26 – March 3, 2020 (dashed lines). Coherence (orange line) and phase (purple line) are between the time series of the Malokurilskaya and Krabovaya bays (*d*)

Поскольку наибольшую опасность волнение в рассматриваемом диапазоне периодов может представлять для побережья в районе Южно-Курильска, уделим этим волновым процессам более детальное внимание. Как видно из рис. 6, при шторме в Южно-Курильской бухте график спектральной плотности колебаний уровня в диапазоне ветрового волнения и зыби достаточно гладкий. Выделяются два пологих пика на периодах около 7,5 и 14 с, соответствующие волнам зыби. Второй период близок к низкочастотной границе этих волн и определяется, по-видимому, приходящей из Тихого океана зыбью.

На спектрограмме для шторма (рис. 7, *b*) также хорошо выделяются два пика. Однако в диапазоне ИГ волн с периодами больше 30 с 3–7 марта спектр не содержит существенно выраженных пиков (рис. 7, *b*). В то же время для тихой погоды на графике спектральной плотности хорошо выделяется серия

пиков (рис. 6, *a*) на периодах ветровых волн и зыби от 3 до 15 с, а на диаграмме спектральной плотности (рис. 7, *b*) для легкого волнения 27 марта хорошо проявляется модовая структура ИГ волн, особенно это заметно по спектральным пикам на периодах около 50, 120, 300 с.



**Р и с. 7.** Временной ход колебаний уровня моря с вычтенным приливом (*a*) (красный цвет – по данным прибора 112, синий – 819, зеленый – 813); спектрограмма отрезка временного ряда для б. Южно-Курильской (*b*); спектрограмма временного ряда для б. Крабовой (*c*)

**Fig. 7.** Time variation of sea level fluctuations with the subtracted tide (*a*) (red color – based on the device 112 data, blue color – 819, green color – 813); spectrogram of the time series segment for the South Kuril Bay (*b*) and time series spectrogram for the Krabovaya Bay (*c*)

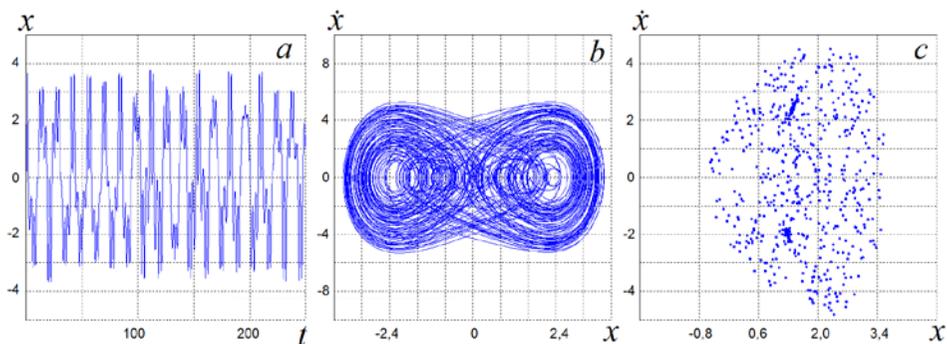
Явление ослабления спектральных пиков во время шторма отмечено и в работе [28] для бухты порта Холмск. Существенное ослабление пиков в спектрах в этой работе объясняется переходом динамической системы (водной массы в бухте г. Холмска, колеблющейся на резонансных периодах, возбуждаемых внешним воздействием – приходящей зыбью) к хаотическим колебаниям. Такой вывод сделан на основании диагностических тестов, предложенных Ф. Муном [29], и подтвержден моделированием динамической системы с использованием уравнения Дуффинга.

Полагаем, что в данном случае с приходом в Южно-Курильскую бухту внешнего возбуждения – штормовых волн большой амплитуды, достигающей 85 см во время наблюдений, спектр ИГ волн широкий и не содержит существенно выраженных периодических волновых процессов, т. е. может быть отнесен к спектру хаотического процесса. Кроме того, поскольку в динамической системе происходит преобразование энергии зыби с периодами 10–15 с в периоды более низкочастотных ИГ колебаний, что возможно только в нелинейных системах, рассматриваемая динамическая система также нелинейна.

Для проверки возможности хаотического волнения в Южно-Курильской бухте было выполнено численное моделирование колебаний с использованием осциллятора Дуффинга. Его особенностью является возможность получения хаотической динамики [30]. При этом рассматриваемая здесь нелинейная система (водная масса в Южно-Курильской бухте) может быть представлена уравнением Дуффинга, которое описывает систему 2-го порядка с нерегулярными колебаниями и внешним периодическим воздействием – штормовым волнением <sup>5</sup> [30]. Модель системы описывается уравнением в виде

$$\ddot{x} + k\dot{x} + \omega_0^2 x + \alpha x^3 = F \cos \omega t, \quad (3)$$

где точка обозначает дифференцирование по времени  $t$ ;  $F$  и  $\omega$  – амплитуда и частота внешнего периодического воздействия (период  $T$ );  $\omega_0$  – собственная частота осциллятора (период  $T_0$ );  $k$  – коэффициент затухания;  $\alpha$  – коэффициент нелинейности. Это уравнение описывает движение классической частицы в потенциале двойной ямы.



**Р и с. 8.** Модельный временной ход колебаний динамической системы (a), ее фазовый портрет (b) и отображение Пуанкаре (c) для параметров модели: амплитуды  $F = 6,5$  и периода внешнего воздействия  $T = 14$  с; периода собственных колебаний осциллятора  $T_0 = 166$  с; коэффициента затухания  $k = 10^{-3}$ ; коэффициента нелинейности  $\alpha = 0,5$

**F i g. 8.** Model time variation of the dynamic system fluctuations (a), its phase image (b) and the Poincaré mapping (c) for the model parameters: amplitude  $F = 6.5$  and period of external forcing  $T = 14$  s; period of eigen fluctuations of the oscillator  $T_0 = 166$  s; attenuation coefficient  $k = 10^{-3}$ ; non-linearity coefficient  $\alpha = 0.5$

Результаты численного моделирования рассматриваемой динамической системы (3) – взаимодействия ИГ волн в акватории с приходящими волнами зыби, выполненном с использованием программы <sup>6</sup>, показало, что для обнаруженных в бухте периодов ИГ волн и приходящих волн зыби с периодами 14 с при повышении амплитуды внешнего воздействия  $F$  и небольшой величине параметра затухания  $k$  в динамической системе возможно возникновение хаотических колебаний. На рис. 8 приведены модельный временной ход колебаний динамической системы, ее фазовый портрет и отображение Пуанкаре. Они

<sup>5</sup> Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. М. : Мир, 1968. 432 с.

<sup>6</sup> Ковалев П. Д., Иволгин В. И. Руан [Электронный ресурс]. Электрон. прогр. Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 2018. № гос. регистрации RU2018665955.

показывают, что при значениях параметров, указанных под рисунками, в динамической системе будут наблюдаться хаотические колебания при слабом затухании вблизи второй субгармоники [29]. Моделирование показывает, что при уменьшении  $F$  до 0,1 и коэффициента нелинейности  $\alpha$  до 0,05 колебания в системе будут гармоническими.

Отметим, что проблема перехода морского волнения к хаотическому затронуто здесь потому, что изучение поведения морских динамических систем хаотическими движениями необходимо для практических целей и учета тех последствий, к которым может привести возникновение сложной динамики. При этом в хаотичных средах, таких как вода, из комбинации волн небольшой величины может возникнуть огромная волна, обладающая разрушительной силой. Поэтому рассмотрение вопроса о возможном переходе системы к хаотическим колебаниям является важным.

### Выводы

Проведены долговременные (до 12 месяцев) наблюдения за волновыми процессами (колебаниями уровня моря) и температурой воды в трех пунктах прибрежной зоны Южно-Курильского пролива. В результате получены качественные временные серии с секундной дискретностью, позволяющие провести детальное изучение волновых процессов в проливе и бухтах в широком диапазоне периодов – от ветрового волнения до приливных.

В диапазоне колебаний уровня моря с периодами больше 1 ч на графике спектральной плотности выделяются мощные пики на периодах суточных, полусуточных приливных гармоник. Энергия приливных гармоник более коротких периодов меньше примерно на два порядка. Для всех приливных гармоник когерентность для временных рядов б. Южно-Курильской и б. Крабовой превышает доверительный уровень.

Рассчитанные спектральные плотности колебаний температуры морской воды для периодов более 1 ч показали, что их графики достаточно гладкие с законом спада около  $-1/2$ . Пик, превышающий 95%-ный доверительный интервал, для всех трех временных рядов имеет период 23,97 ч и соответствует приливной гармонике  $K_1$ . Пики на периодах 12,0 и 12,43 ч несколько меньше доверительного интервала, за исключением б. Малокурильской, но и здесь превышение незначительное. Периоды этих пиков также соответствуют приливным гармоникам.

Для оценочного расчета периодов сейш использовалась формула по методу Дюбуа, которая применима для определения периода одноузловой сейши водоема переменной глубины. При этом длина Южно-Курильского пролива разбивалась на 15 отрезков, и на границах каждого отрезка фиксировалась глубина. Расчет показал период 5,0 ч, который близок к пику с периодом 4,8 ч, определенному по спектральной плотности колебаний уровня моря. Однако однозначно определить, являются ли данные колебания сейшами, не представляется возможным, поскольку приливная гармоника  $3KM_5$  имеет близкий период 4,86 ч.

Расчет периодов сейш по формуле для полуоткрытого прямоугольного бассейна показал возможные периоды мод сейшевых колебаний от 0,42 до

2,9 ч. Пики в этом диапазоне периодов хорошо выделяются на графиках спектральной плотности и превышают 95%-ный доверительный интервал. Показано, что величина этих пиков не зависит от прилива, а значит, соответствующие им волновые процессы неприливногo происхождения – сейши или, возможно, краевые волны. В то же время результаты спектрального анализа трех временных рядов показывают, что сейши в Южно-Курильском проливе имеют малую энергию и проявляются сравнительно слабо, а значит, здесь нет условий для их значительного резонансного усиления, что согласуется с выводами М. Накано и С. Уноки.

Рассмотрен вопрос передачи приливной энергии сейшам, возможность которой предполагает Г. С. Гизе с соавторами. Показано, что часть энергии приливных волн передается сейшевым колебаниям бухт Крабовой и Малокурильской, поскольку наблюдается рост амплитуд сейш с увеличением высоты приливов. Гипотезу для объяснения этого эффекта предложил Г. С. Гизе, а теоретическую поддержку с использованием динамического механизма генерации прибрежных сейш глубоководными внутренними волнами, возбуждаемыми баротропным приливом, выполнили Д. К. Чапман и Г. С. Гизе.

В то же время большая часть энергии в рассматриваемых акваториях передается сейшевым колебаниям от других источников, что показал анализ волнения при прохождении атмосферных возмущений над районом наблюдений. Оценить передачу энергии приливов сейшам в Южно-Курильской бухте не представилось возможным из-за значительных фоновых колебаний в этом районе.

Проведен анализ колебаний уровня в диапазоне ИГ волн. Учитывая характер изменения спектральной плотности колебаний уровня в Южно-Курильской бухте с приходом в нее волнения, а также теоретических предпосылок, изложенных Ф. Муном, мы сделали предположение о возможности перехода колебаний в бухте к хаотическим. Выполненное моделирование поведения динамической системы – водной массы бухты, возбуждаемой приходящим волнением, показало, что для обнаруженных в бухте периодов ИГ волн и приходящих волн зыби с периодами 14 с при повышении амплитуды внешнего воздействия в динамической системе возможно возникновение хаотических колебаний. И это необходимо учитывать для обеспечения безопасности судоходства, поскольку в хаотичных средах из комбинации волн небольшой величины может возникнуть разрушительная волна.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ковалев П. Д., Шевченко Г. В., Ковалев Д. П.* Исследование длинноволновых движений в южной части Курильской гряды // Морские исследования и технологии изучения природы Мирового океана. Владивосток : ДВО РАН, 2005. Вып. 1. С. 69–81.
2. *Kovalev P. D., Shevchenko G. V., Kovalev D. P.* Investigation of the sea level fluctuations in the Yuzhno-Kurilskaya Bay in 2005 // Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 19-24 February 2006, Mombetsu, Hokkaido, Japan. P. 225–231.
3. Causation of large-amplitude coastal seiches on the Caribbean Coast of Puerto Rico / G. S. Giese [et al.] // Journal of Physical Oceanography. 1990. Vol. 20, iss. 9. P. 1449–1458. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<1449:COLACS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<1449:COLACS>2.0.CO;2)

4. 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.
5. Parker B. B. Tidal Analysis and Prediction. Silver Spring, Maryland, 2007. 378 p.
6. 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>
7. Korgen B. J. Seiches // American Scientist. 1995. Vol. 83, no. 4. P. 330–341.
8. De Jong M. Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbor basins. PrintPartners Ipskamp B.V., 2004. 119 p.
9. Rabinovich A. B. Seiches and Harbor Oscillations // Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Singapore : World Scientific Publishing Company, 2009. P. 193–236.
10. Defant A. Physical Oceanography. New York : Pergamon Press, 1960. Vol. 2. 598 p.
11. Rabinovich A. B., Monserrat S. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and statistical analysis // Natural Hazards. 1996. Vol. 13, iss. 1. P. 55–90. <https://doi.org/10.1007/BF00156506>
12. Monserrat S., Vilibić I., Rabinovich A. B. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2006. Vol. 6, iss. 6. P. 1035–1051. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-1035-2006>
13. Hibiya T., Kajiura K. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay // Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1982. Vol. 38, iss. 3. P. 172–182. <https://doi.org/10.1007/BF02110288>
14. De Jong M. P. C., Holthuijsen L. H., Battjes J. A. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2003. Vol. 108, iss. C4. 3117. doi:10.1029/2002JC001422
15. Giese G. S., Chapman D. C. Coastal seiches // Oceanus. 1993. Vol. 36, iss. 1. P. 38–46.
16. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л. : Гидрометеиздат, 1993. 324 с.
17. Рабинович А. Б., Левянт А. С. Влияние сейшевых колебаний на формирование спектра длинных волн у побережья Южных Курил // Океанология. 1992. Т. 32, № 1. С. 29–38.
18. Судольский А. С. Динамические явления в водоемах. Л. : Гидрометеиздат, 1991. 262 с.
19. Марамзин В. Я. Расчет сейшевых колебаний методом конечных элементов в бассейнах произвольной формы // Теоретические и экспериментальные исследования длинноволновых процессов. Владивосток : ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 104–114.
20. Nakano M., Unoki S. On the seiches (the secondary undulations of tides) along the coast of Japan // Records of Oceanographic Works in Japan. 1962. Special No. 6. P. 169–214.
21. Morozov E. G. Semidiurnal internal wave global field // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1995. Vol. 42, iss. 1. P. 135–148. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)92886-C](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)92886-C)
22. Müller P., Briscoe M. Diapycnal mixing and internal waves // Proceedings Hawaiian Winter Workshop, University of Hawaii at Manoa, Jan 18–22, 1999. P. 289–295.
23. Müller P., Briscoe M. Diapycnal mixing and internal waves // Oceanography. 2000. Vol. 13, iss. 2. P. 98–103. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2000.40>
24. Evidence of coastal seiche excitation by tide-generated internal solitary waves / G. S. Giese [et al.] // Geophysical Research Letters. 1982. Vol. 9, iss. 12. P. 1305–1308. <https://doi.org/10.1029/GL009i012p01305>
25. Chapman D. C., Giese G. S. A model for the generation of coastal seiches by deep-sea internal waves // Journal of Physical Oceanography. 1990. Vol. 20, iss. 9. P. 1459–1467. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<1459:AMFTGO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<1459:AMFTGO>2.0.CO;2)
26. Сквайр В. А., Ковалев П. Д., Ковалев Д. П. Солитоноподобные волны в окрестностях Южных Курильских островов // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 1. С. 5–22. doi:10.22449/0233-7584-2021-1-5-22

27. *Giese G. S.* The relationship between coastal seiches in Puerto Rico and tide-generated internal solitary waves // Proceedings of the Association of Island Marine Laboratories of the Caribbean: 17<sup>th</sup> meeting, Miami, USA, 16–20 May 1983. Miami, USA : University of Miami, 1983. Vol. 17. P. 17. URL: [http://www.amlc-carib.org/meetings/procs/1983AMLC\\_Proceedings.pdf](http://www.amlc-carib.org/meetings/procs/1983AMLC_Proceedings.pdf) (date of access: 27.07.2023).
28. *Kovalev P. D., Kovalev D. P.* The dependence of the wave mode from external periodic excitation in the harbor of port Kholmsk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 324. 012016. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012016
29. *Мун Ф.* Хаотические колебания. М. : Мир, 1990. 312 с.
30. The Duffing Equation: Nonlinear Oscillators and their Behaviour / Ed. by I. Kovacic, M. J. Brennan. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 392 p.

*Об авторах:*

**Ковалев Дмитрий Петрович**, руководитель лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693022, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5184-2350**, **ResearcherID: A-9300-2016**, **Scopus Author ID: 26032627700**, **SPIN-код 8343-8577 AuthorID: 69870**, [d.kovalev@imgg.ru](mailto:d.kovalev@imgg.ru)

**Ковалев Петр Дмитриевич**, ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693022, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б), доктор технических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7509-4107**, **ResearcherID: V-8662-2018**, **Scopus Author ID: 16429135400**, **SPIN-код: 7465-3828 AuthorID: 69871**, [p.kovalev@imgg.ru](mailto:p.kovalev@imgg.ru)