

© Авторы 2022 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2022. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.465

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.114-123>
<https://www.elibrary.ru/wmvfjq>

Особенности возбуждения сейш в акватории вблизи Поронайска (о. Сахалин)

Д. П. Ковалев*, П. Д. Ковалев, А. С. Борисов, В. С. Зарочинцев, К. В. Кириллов

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

Реферат. Представлены результаты изучения возможных источников энергии возбуждения сейш в районе Поронайска (о. Сахалин) с использованием данных натурных измерений 2008–2009 гг. Временные ряды данных, длительностью около 3 мес., получены с секундной дискретностью двумя автономными регистраторами волнения. Спектральный анализ временных рядов позволил определить, что волновые процессы с периодами от 2 до 7 ч могут быть отнесены к сейшам. С использованием численных методов расчета собственных резонансных колебаний акваторий определены возможные периоды колебаний в зал. Терпения, которые близки к периодам обнаруженных сейш. Вычисленные огибающие волновых процессов показали хорошее совпадение пиков сейш с периодом 7 ч и ветровых волн, что подтверждает передачу энергии от атмосферных возмущений семичасовой сейше. Показано, что период сейш, равный 3.5 ч, совпадает с периодом приливной гармоник $4M_2$. При этом, учитывая высокую для морских акваторий добротность на периоде 3.5 ч, равную 11.9, установлен резонансный путь передачи энергии от приливной гармоник к сейше. Наибольшие высоты сейш на периоде 2.7 ч наблюдаются на 6–8 сутки после максимума суточного прилива с периодом 24.68 ч, который близок к периоду лунной приливной гармоник M_1 . Анализ условий возбуждения сейш с периодом 2 ч показал, что энергия к ним поступает от атмосферных возмущений. При этом увеличение высоты сейш происходит, когда наблюдаются ветра южных румбов в зал. Терпения.

Ключевые слова: сейши, атмосферные возмущения, приливные гармоник, добротность акваторий, спектральная плотность

Features of seiche excitation in the water area near Poronaisk (Sakhalin Island)

Dmitry P. Kovalev*, Peter D. Kovalev, Alexander S. Borisov,
Vitalii S. Zarochintsev, Konstantin V. Kirillov

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

Abstract. The results of studying potential sources of seiche excitation energy in the water area near Poronaisk (Sakhalin Island) using natural measurement data in 2008–2009 are presented. Time series data with a duration of about three months were collected by two autonomous sea-level recorders at one-second sample rate. Spectral analyses of time series made possible to conclude that wave processes with periods from 2 to 7 hours can be classified as seiches. Possible seiche periods calculated by numerical methods are very close to the periods of seiches detected in the Terpeniya Bay. The calculated envelopes of wave processes showed a good coincidence of the peaks of seiches with a period of 7 hours and wind waves, which confirms the transfer of energy from atmospheric disturbances to the seven-hour seiche. Seiche period of 3.5 hours is shown to be equal to the period of tidal harmonic $4M_2$. Thus, the resonance pass of energy transmission from tidal harmonic to seiche was revealed taking into account high for marine waters q-factor equal to 11.9 at the period of 3.5 hours. The highest seiches at a period of 2.7 hours are observed on the 6–8 day after maximum of daily tide with a period of 24.68 hours, which is close to the period of lunar tide harmonic M_1 . The analyses of excitation factors of seiches with 2-hour period showed that the excitation energy, or at least a part of it, is provided by atmospheric disturbances. Thus, the increasing of seiche height occurs during the winds of southern directions in the Terpeniya Bay.

Keywords: seiches, atmospheric disturbances, tidal harmonics, q-factor of waterbody, spectral density

Для цитирования: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Зарочинцев В.С., Кириллов К.В. Особенности возбуждения сейш в акватории вблизи Поронайска (о. Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 2, с. 114–123. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.114-123>; <https://www.elibrary.ru/wmvfjq>

For citation: Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Zarochintsev V.S., Kirillov K.V. Features of seiche initiation in the water area near Poronaisk (Sakhalin Island). *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 114–123. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.114-123>; <https://www.elibrary.ru/wmvfjq>

Введение

Ранее нами проводились исследования волнового режима в зал. Терпения, в том числе в акватории около Поронайска, по данным натурных наблюдений [1]. В упомянутой работе показано наличие значительных сейшевых колебаний с периодами 2–7 ч. Данные сейши могут представлять проблему при выполнении погрузо-разгрузочных работ в порту Поронайск. В то же время в работе не рассматривались источники энергии возбуждения этих сейш, что могло бы послужить прогнозированию роста высоты этих волн.

Сейши – это стоячие периодические колебания массы воды во всем водоеме или в обособленной его части [2]. Они могут генерироваться под воздействием различных факторов в заливах, бухтах и у открытого побережья. Изучением сейш в разных акваториях занимались многие исследователи [3–6; etc.]. Следует отметить, что периоды сейш зависят от параметров акваторий конкретных побережий, а периоды шельфовых сейш определяются уклоном морского дна. Часто полагают, что периоды сейш находятся в диапазоне от 0.5 до 5 циклов в час [7]. Однако, как показывают наши исследования, такие периоды характерны для небольших по размерам акваторий, а в больших акваториях периоды сейш могут достигать нескольких часов, и это не редкость.

Сейши могут возбуждаться энергией из разных источников. Одни исследователи [6, 8–10] изучают генерацию сейш за счет энергии атмосферных возмущений, которая непосредственно воздействует на поверхность водоема, что характерно для замкнутых акваторий. Сейши в заливах и бухтах генерируются преимущественно через открытую границу, т.е. являются индуцированными [2]. При этом энергия атмосферных возмущений изначально в открытом море передается метеоцунами, а они в свою очередь, приходя в береговую зону или бухту, возбуждают в них сейши.

Другие исследователи, например [5], рассматривают сейши, возбуждаемые энергией из открытого моря, где она может генерироваться более широким рядом механизмов, например приливом, прибоем, цунами, внутренними волнами, а также и атмосферными возмущениями [3, 4, 12, 13]. При этом доминирующий источник может различаться от гавани к гавани в зависимости от наличия таких механизмов и конкретной географической ситуации гавани. Источ-

ников достаточно много, поэтому представляет интерес определить источник энергии сейш с целью возможного их прогнозирования.

Следует еще отметить, что амплитуда сейш определяется не только величиной поступающей энергии, но и параметром резонансной акватории – добротностью. Именно она показывает, насколько могут возрастать амплитуды приходящих волн, имеющих периоды, близкие к резонансным периодам самой акватории. Такие сейши могут достигать значительных амплитуд и представлять угрозу для хозяйственной деятельности в прибрежной зоне. Поэтому и необходимо изучение особенностей режима волнения конкретных участков побережья.

Данные наблюдений

В данной работе использованы наблюдения 2008–2009 гг. за волнением в зал. Терпения, в акватории порта Поронайск, которые проводились с помощью автономных регистраторов волнения АРВ-14. Прибор с номером 19 был установлен 21.07.2008 в порту Поронайска на глубине 2.2 м, а прибор с номером 22 установлен 30.06.2009 с противоположной стороны зал. Терпения на глубине 27.8 м. Запись проводилась с дискретностью 1 с. К сожалению, записи температуры содержат много сбоев и поэтому не могут быть использованы для оценки возможности вклада внутренних волн в формирование сейш. Карта района наблюдений и места установки приборов показаны на рис. 1. Полученные временные ряды приведены на рис. 2.

Видно, что временные ряды существенно различаются (рис. 2), и связано это с различным местоположением приборов. Прибор № 19 располагался в порту г. Поронайск, который находится в устье реки, и ветровое волнение и зыбь там значительно ослабляются. На записи же прибора № 22, установленного в открытой акватории зал. Терпения, короткопериодное волнение хорошо видно. Выделяются моменты с высотой волн, достигающей 3 м во время штормов. В то же время длинные волны с периодами от 30 мин не изменяются, о чем можно судить по уровню прилива в разные годы. На временных рядах обоих приборов также хорошо видны суточные и полусуточные приливные колебания уровня моря. Их величина и в порту Поронайска, и в районе расположения прибора № 22 не превышает 1.5 м.

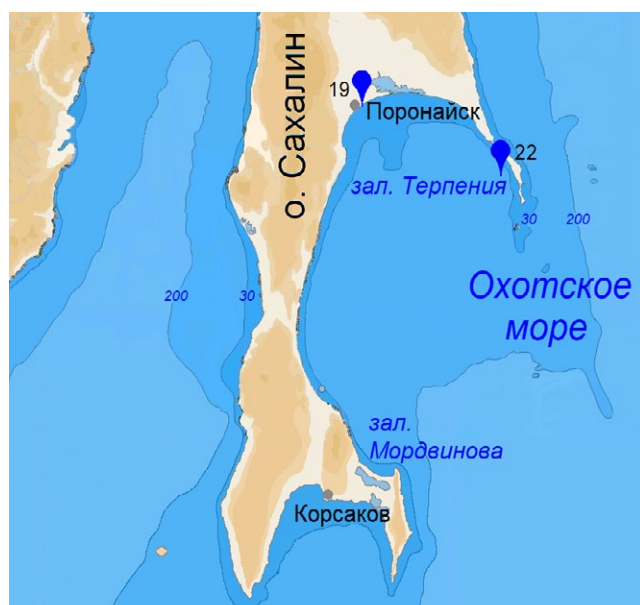


Рис. 1. Район наблюдений и места расположения приборов.

Fig. 1. The observation area with locations of the equipment.

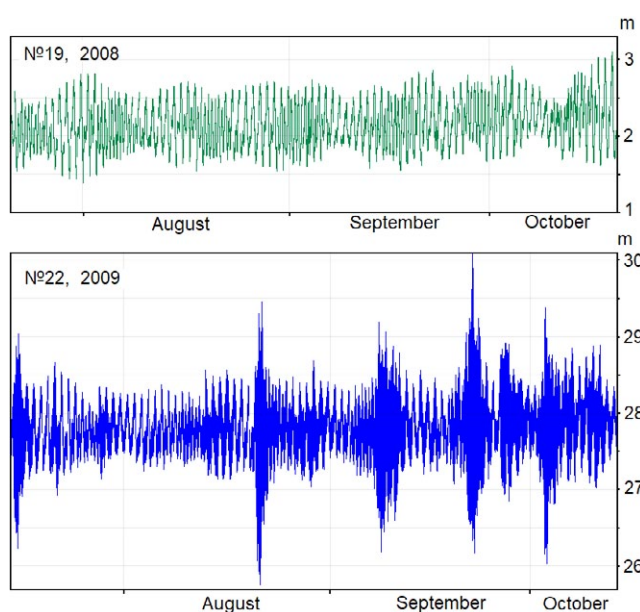


Рис. 2. Временные ряды колебаний уровня моря для двух пунктов наблюдения.

Fig. 2. Time series of sea level oscillations for two observation points.

Анализ временных рядов

Полученные временные ряды были подвергнуты спектральному и взаимно-спектральному анализу с использованием программы Кума [14, 15]. На рис. 3. приведены графики спектральных плотностей колебаний уровня моря для двух пунктов наблюдения, вычисленные по исходным временным рядам и по рядам, из которых вычтен предвычисленный прилив.

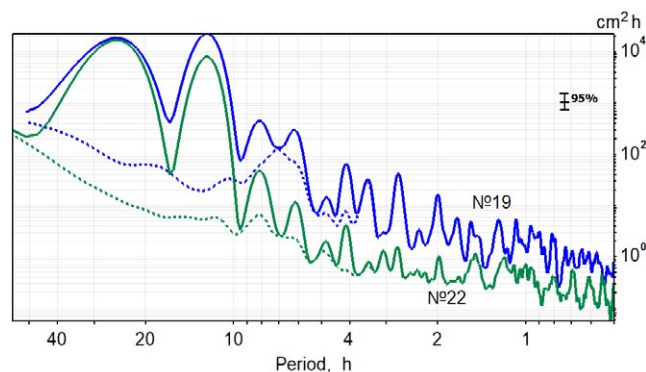


Рис. 3. Спектральные плотности колебаний уровня моря (вертикальная ось), рассчитанные для полученных рядов наблюдений (сплошные линии) и после вычитания предвычисленного прилива (пунктирные линии).

Fig. 3. Spectral densities of sea level oscillations (vertical axis) calculated for obtained original time series (solid lines) and for time series after subtraction of precalculated tide (dotted lines).

Спектральные плотности рассчитаны для диапазона периодов колебаний от 0.5 до 60 ч. Графики (рис. 3) содержат большое число пиков на периодах от 1 до 12 ч. Эти пики могут быть отнесены к приливным гармоникам высших порядков или являться собственными колебаниями акваторий, обладающих резонансными свойствами. Из рис. 3 видно, что на спектральных плотностях временных рядов с вычтенным приливом часть пиков отсутствует. И поскольку предвычисленный прилив рассчитывается программой Кума по большому числу приливных гармоник – 67 [14], то, значит, оставшиеся пики не являются приливными гармониками и определяются сейшми.

Далее будем рассматривать волновые процессы с периодами около 2, 2.7, 3.5 и 7 ч. Средние амплитуды этих волновых процессов определены из спектральных плотностей по формуле [16].

$$\bar{A}^2 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где интегрирование производится по интервалу частот в окрестностях пика, в пределах от 4.1 см для периода 2 ч до 11.1 см для периода 7 ч. Поэтому более короткие сейши, как обладающие существенно меньшей средней амплитудой, например 2.3 см для периода 1.2 ч, рассматривать не будем.

Отметим также, что пик на периоде около 7 ч на спектральной плотности измерений прибора № 19 с не вычтенным приливом скрывается близко расположенными пиками приливных

гармоник, несмотря на то что энергия этих волн достаточно большая. И эти колебания проявляются на записи только для прибора № 19, на № 22 они не обнаруживаются. Возможно, это связано с местом установки прибора № 22 далеко от пучности колебаний на этом периоде. Также колебания с периодом около 7 ч могут быть сейшеобразными, а не сейшей. В этом случае, как считают авторы работы [17], сейшеобразные колебания имели одну узловую линию и прибор № 22 в месте его расположения не регистрировал их.

Для оценки периодов стоячих колебаний уровня в гидрологической практике используют различные методы численного расчета. Наибольшее распространение получили методы Мериана, Дюбуа, Дефанта, Кристалла, Давыдова и Кощеева [18]. Определим возможные периоды собственных колебаний зал. Терпения, учитывая его параметры: длина 65 км, ширина около 130 км, средняя глубина 30 м – и используя формулу Мериана для полуоткрытых прямоугольных бассейнов длины L и однородной глубины H [2, 19]:

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

где g – ускорение свободного падения.

При этом для первой моды сейшевых колебаний был получен период 2.1 ч, который близок к обнаруженному периоду пика 2 ч на графике спектральной плотности.

К сожалению, формула (2) не дает представления о типе сейш – продольные или поперечные. Возможно использование метода расчета, предложенного в работе [17], хотя и несколько приближенно, для прямоугольной формы бассейна зал. Терпения. Выражение для расчета сейш имеет вид:

$$T_{km} = \frac{2}{\sqrt{gH}} \frac{ab}{\sqrt{k^2b^2 + m^2a^2}}, \quad (3)$$

где T_{km} – периоды собственных колебаний жидкости, $k = 0, 1, 2, \dots$, $m = 0, 1, 2, \dots$, a , b – геометрические параметры бассейна. Индексы k и m определяют количество узловых линий уровня у каждой моды сейш, которое равно сумме индексов $k + m$. Число узловых линий, параллельных оси y , равно k (продольные сейши), а параллельных оси x , равно m (поперечные сейши).

Выполненный по формуле (3) расчет показал в зал. Терпения, ограниченном снизу широтой мыса Терпения, наличие продольной сейши с периодом около 2 ч, что совпадает с расчетом по формуле Мериана. Кроме того, расчет выявил возможность генерации поперечной сейши с периодом около 4.2 ч. Пик с периодом 4.1 ч присутствует в графике спектральной плотности для измерений прибором № 19, хотя его величина немного превышает 85%-й доверительный интервал, и этот пик хорошо виден на кривой, рассчитанной по ряду с вычтенным приливом. Но энергия и амплитуда этих колебаний малы.

В выполненных выше расчетах использовались формулы с приближением для средней постоянной глубины. Формулы расчета сейш для переменной глубины достаточно сложные. Авторы использовали относительно простую формулу метода Дюбуа [18, 19] для расчета одноузловой сейши водоема переменной глубины. В методе осевая линия делится на n участков длиной Δx и период вычисляется по формуле

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

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

Длину зал. Терпения разбили на 6 отрезков длиной по 12 км начиная от южного берега оз. Невского до широты мыса Терпения. Расчет с использованием (4) показал период 2.9 ч. По данным наблюдений, в спектральной плотности присутствует пик с периодом 2.7 ч, т.е. близким к расчетному. Аналогично был проделан расчет для поперечной сейши по широте от Поронайска на восток до пересечения с берегом п-ова Поронайский. Расчет показал период первой моды 3.6 ч при пике в спектральной плотности 3.5 ч, т.е. также близком к расчетному.

В работе [18] сказано, что периоды сейш, вычисленные по приведенным выше формулам, как правило, оказываются весьма близкими к измеренным значениям, что получено и в данной работе. Таким образом, расчеты показали, что в зал. Терпения возможна генерация

сейш на периодах пиков в спектральной плотности колебаний уровня моря. И эти периоды определяются резонансными свойствами акватории зал. Терпения. Некоторые различия между рассчитанными и наблюдаемыми периодами не имеют большого значения. Главным является вывод, что генерация сейш на периодах, полученных из данных наблюдений, возможна и обнаруженные волновые процессы действительно являются сейшами – резонансными колебаниями акватории зал. Терпения.

Анализ возможных источников энергии возбуждения сейш

Рассмотрим возможные источники энергии, которые могут возбудить сейши в зал. Терпения. Выше отмечалось, что сейши могут генерироваться широким рядом механизмов, таких как прилив, прибой, цунами, внутренние волны и атмосферные возмущения. Проведем анализ возможных источников энергии для обнаруженных сейш с периодами 2, 2.7, 3.5 и 7.

Рассмотрим, откуда поступает энергия на возбуждение сейш с периодом 7 ч. Для этого отфильтрован временной ряд колебаний уровня с периодом 7 ч, приведенный на рис. 4 а.

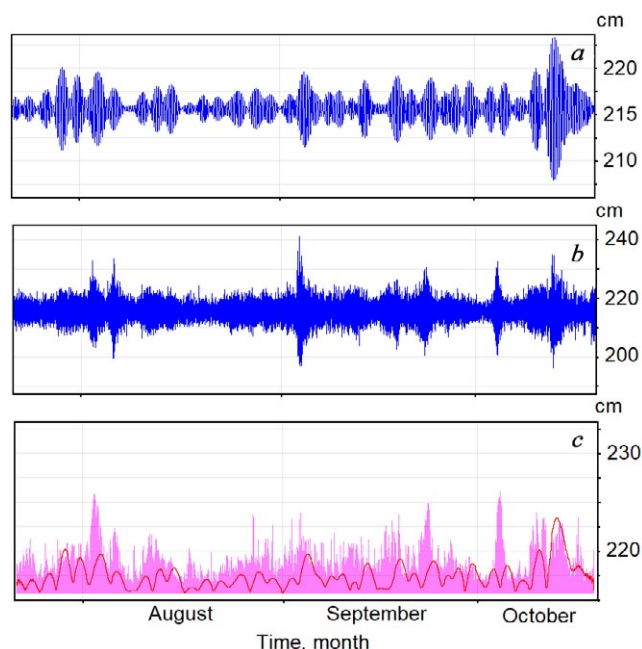


Рис. 4. Временной ряд колебаний уровня моря в 2008 г. с периодом 7 ч (а), временной ряд, содержащий ветровые волны и зыбь (б) и их огибающие (с). Красная кривая для сейш с периодом 7 ч.

Fig. 4. Time series of sea level oscillations in 2008 with a period of 7 hours (a), time series with wind waves and swell (b) and their envelopes (c). Red line is for seiches with a period of 7 hours.

Фильтрация проводилась полосовым фильтром программы Кума в полосе периодов $\pm 5\%$ от периода 7 ч. Далее его сравнили с временными рядами, содержащими прилив, инфрагравитационные волны и колебания уровня, вызываемые ветровым волнением и зыбью (рис. 4 б). Заметим, что последний временной ряд косвенно отображает прохождение вблизи или над районом наблюдений атмосферных возмущений.

Визуальное сравнение временных рядов показало, что максимальные высоты сейш соответствуют максимумам ветрового волнения и зыби. Однако, поскольку периоды волн зыби, ветровых волн и семичасовой сейши существенно различаются, для большей убедительности для рассматриваемых временных рядов были вычислены огибающие этих волновых процессов (рис. 4 с). При этом, чтобы рассматривать $A(t)$ как огибающую быстро осциллирующей функции $\zeta(t)$, необходимо также, чтобы кривая $A(t)$ касалась кривой $\zeta(t)$ в точках максимальных (амплитудных) значений. Этому условию отвечают преобразования Гильберта [21, 22]:

$$\zeta(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta_1(\tau)}{\tau - t} d\tau, \quad (5)$$

$$\zeta_1(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\zeta(\tau)}{\tau - t} d\tau, \quad (6)$$

причем здесь имеются в виду главные значения несобственных интегралов. А функция $\zeta_1(t)$ называется функцией, сопряженной функции $\zeta(t)$.

Для вычисления огибающей использовался алгоритм преобразования Гильберта, встроенный в программу Кума [14, 15]. Огибающая вычисляется как разность исходного значения и результата преобразования Гильберта по формуле:

$$p_1 = p_0 - \sqrt{H_r^2 + H_{im}^2}, \quad (7)$$

где p_0 – исходное значение, p_1 – новое значение, H_r – действительная часть результата преобразования Гильберта, H_{im} – мнимая часть результата преобразования Гильберта.

Использование преобразования Гильберта для сравнения временных рядов колебаний с периодами, различающимися на несколько порядков, оказалось весьма эффективным способом анализа и продемонстрировало хо-

рошее совпадение огибающих волновых процессов, что убедительно показывает передачу энергии от атмосферных возмущений семи-часовой сейше. При этом максимальные амплитуды сейш наступают через 10–15 ч после максимума высот ветровых волн и зыби. Эти два обстоятельства – увеличение высоты сейши при приходе атмосферного возмущения в район Поронайска и время наступления максимумов сейш – необходимо учитывать при выполнении работ в порту.

Также были проанализированы погодные условия для максимальных высот сейш 12 октября с использованием синоптических карт, предоставленных Сахалинским УГМС. Синоптическая карта по состоянию на время подхода циклона к акватории зал. Терпения 11.10.2008 на 6:00 UTC с отмеченным на ней положением центра циклона на 00:00 ч 12.10.2008 показана на рис. 5. Видно, что увеличение высоты сейш с периодом 7 ч (рис. 4 а) наблюдается после прохождения циклона над зал. Терпения. Это также подтверждает связь атмосферных возмущений с высотой сейшевых колебаний уровня с периодом около 7 ч.

Очевидно, что для сейш с периодом 3.5 ч в районе Поронайска, пик которых находится в спектральной плотности временного ряда с вычтенным предвычисленным приливом (рис. 3), энергия возбуждения передается от приливной гармонки, которая присутствует в спектральной плотности временного ряда с приливом (рис. 3). Поскольку периоды обеих волн почти совпадают – разница видна лишь при детальном увеличении и составляет 0.01 ч, это может быть связано с погрешностями вычисления спектральной плотности. Согласно данным [23], приливная гармоника $4M\sigma_7$ для мелкой воды имеет период 3.5 ч, и можно заключить, что именно от этой гармонки энергия напрямую, резонансным способом передается сейше, что возможно при высокой добротности резонансной акватории.

Для зал. Терпения расчет добротности, Q , резонансной системы проводили из спектров, основываясь на том, что добротность обуславливает относительную величину резонансного максимума в энергетическом спектре колебаний [24], и если система обладает достаточно высокой добротностью, то она определяется выражением

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega, \quad (7)$$

где ω_0 – резонансная частота системы (резонансного максимума), $\Delta\omega$ – ширина максимума. При этом ширина максимума определяется как полоса частот, в пределах которой энергия колебаний спадает в 2 раза [24].

Расчет показал, что для зал. Терпения $Q = 11.9$. Это большая для морских акваторий величина. Так, для сильно закрытой Малокурильской бухты ее величина около 8 [25]. Поэтому в данном случае резонансный путь передачи энергии от приливной гармонки не вызывает сомнений.

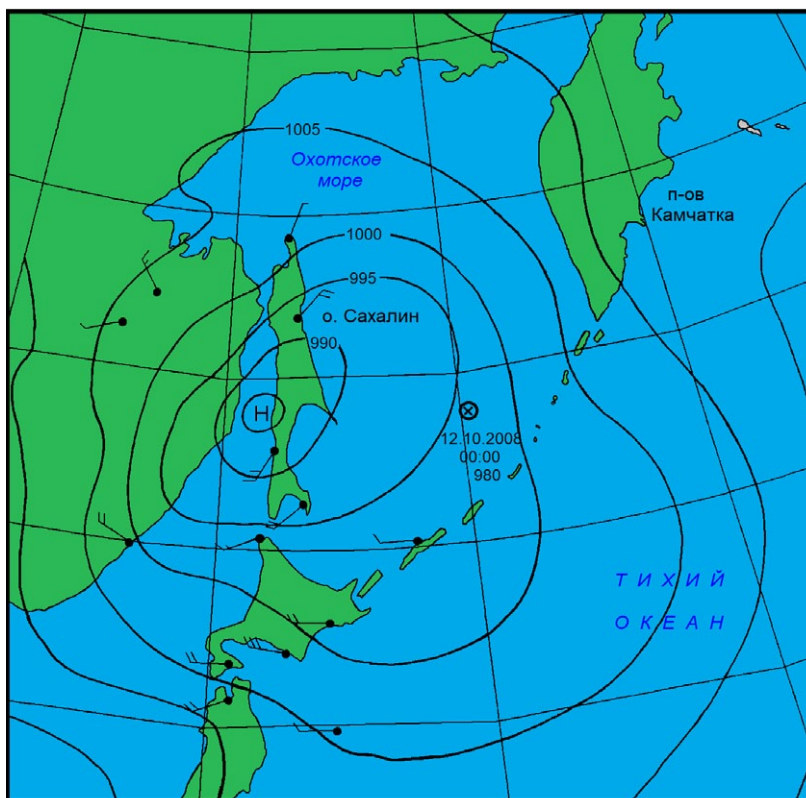


Рис. 5. Синоптическая карта на 11.10.2008 г., 6:00 UTC по данным Гидрометеоцентра Сахалинского УГМС. Показано положение центра циклона на 12.10.2008.

Fig. 5. Synoptic map for 11.10.2008, at 6:00 UTC according to the Hydrometeorological Centre of Sakhalin Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. The location of the cyclone centre is shown for 12.10.2008.

Далее рассмотрим возможный источник энергии для сейш с периодом 2.7 ч. Так же, как и в случае анализа для сейш с периодом 7 ч, были вычислены и построены отфильтрованные временные ряды колебаний уровня моря с периодом 2.7 ч (рис. 6 а) и спектрограммы спектральной плотности колебаний уровня для разных диапазонов периодов (рис. 6 с, d), поскольку энергия колебаний в этих диапазонах различается на 2 порядка и на одной спектрограмме колебания с малой энергией плохо отображаются.

Сравнение временных рядов и спектрограмм (рис. 6) показывает, что наибольшие высоты сейш с периодом 2.7 ч наблюдаются на 6–8-е сутки после максимума суточного прилива с периодом 24.68 ч. Этот период в соответствии с данными работы [23] близок к периоду лунной приливной гармонике M_1 . Может показаться, что максимум высоты сейш соответствует максимальной воде полусуточного прилива с периодом 12.3 ч, который соответствует лунной приливной гармонике $M_2(KS)_2$ [23]. Однако при внимательном рассмотрении видно, что для максимума этой приливной волны 19 августа максимум сейш с периодом 2.7 ч отсутствует (рис. 6 с, d). Да и отношение периодов этих волн далеко от целого числа, что показывает невозможность передачи энергии от этой приливной волны сейшам с периодом 2.7 ч.

В работе [12] на основе анализа 10-летнего временного ряда цифровых данных о приливах с о. Магуэйс, Пуэрто-Рико, показано, что в уровне моря, при частоте основного нормального режима сейш на шельфе, имеет место выраженный двухнедельный подъем высоты сейш с максимумом, приходящимся на 6–7 дней после новолуния и полнолуния. В указанной работе также утверждается, что сейши возбуждаются внутренними волнами, создаваемыми сильными приливами в юго-восточной части Карибского моря.

В нашем случае похожая ситуация, однако проверить возможность возбуждения сейш внутренними волнами не представляется возможным по причине неисправности канала измерения температуры у использованных нами приборов.

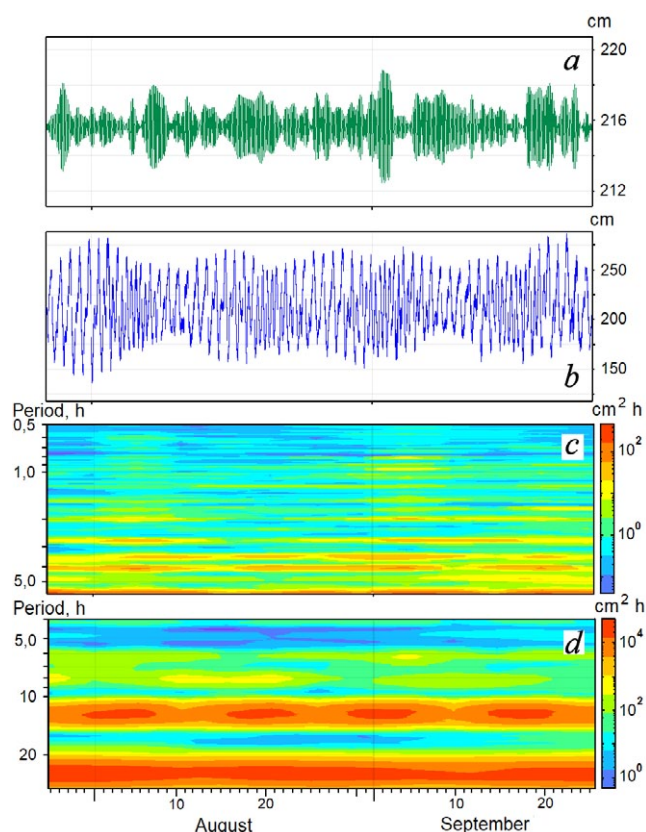


Рис. 6. Колебания уровня моря (cm) с периодом 2.7 ч (а), колебания уровня моря (b) и диаграммы спектральной плотности колебаний уровня моря (cm²·h) (с, d).

Fig. 6. Sea level oscillations (cm) with a period of 2.7 hours (a), sea level oscillations (b) and the diagrams of spectral density of sea level oscillations (cm²·h) (c, d).

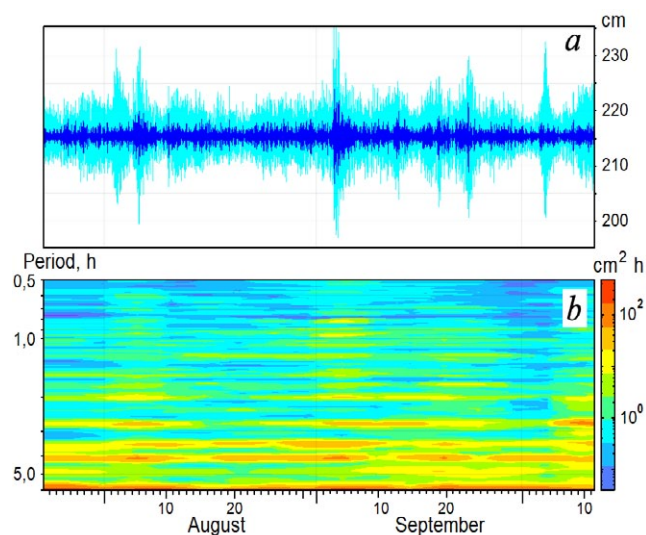


Рис. 7. Временной ряд колебаний уровня моря (cm) с периодом 2 ч (а, синий цвет), временной ряд ветрового волнения и зыби (а, голубой цвет) и спектрограмма колебаний уровня моря (cm²·h) (b).

Fig. 7. Time series of sea level oscillations (cm) with a period of 2 hours (a, blue), time series of wind waves and swell (a, cyan) and spectrogram of sea level oscillations (cm²·h) (b).

Для сейш с периодом около 2 ч также из исходного временного ряда колебаний уровня моря, зарегистрированного прибором № 19, был рассчитан временной ряд колебаний уровня с периодом 2 ч (рис. 7 а, синий цвет) и проведено его сравнение с временными рядами ветрового волнения и зыби (рис. 7 а, голубой цвет), а также со спектрограммой (рис. 7 б).

Из сравнения рис. 7 а и б видно, что максимумы высот сейш с периодом около 2 ч в некоторых случаях совпадают с максимумом высоты сейш с периодом 2.7 ч, например 6 августа и 4 сентября. Но, как было показано выше, приливная волна передает энергию на возбуждение сейш с периодом 2.7 ч. Поэтому нельзя исключать, что некоторая часть энергии приливной волны может передаваться и сейшам с периодом около 2 ч, при совпадении определенной фазы приливной волны и штормового волнения, вызванного атмосферным возмущением.

Выводы

Описаны результаты изучения возможных источников энергии возбуждения сейш в районе Поронайска (о. Сахалин, зал. Терпения, Охотское море) с использованием данных натурных наблюдений за волнением. Измерения проводились с секундной дискретностью с помощью двух автономных регистраторов волнения АРВ 14 в 2008 и 2009 гг. Продолжительность полученных временных рядов составляет около 3 мес.

Расчет спектральных плотностей колебаний уровня моря по исходным временным рядам и временным рядам с вычтенным предвычисленным приливом позволил определить, какие пики в спектрах являются приливными гармониками, а какие могут быть отнесены к сейшам. По результатам анализа спектральных плотностей выделены волновые процессы с периодами около 7, 3.5, 2.7 и 2 ч. Показано, что средние амплитуды в пределах энергетических пиков этих волн находятся в диапазоне от 4.1 см для периода 2 ч до 11.1 см для периода 7 ч. Более короткопериодные волновые процессы, в связи с их небольшой энергией, не рассматривались.

С использованием различных численных методов расчета определены возможные пери-

оды собственных колебаний в зал. Терпения. Полученные значения периодов близки к пикам в спектральных плотностях, вычисленных с использованием натурных данных, следовательно, эти волновые процессы с периодами около 7, 3.5, 2.7 и 2 ч могут быть отнесены к сейшам.

Анализ возможных источников энергии, которые могут возбудить сейши в зал. Терпения, показал, что максимальные высоты сейш с периодом 7 ч соответствуют максимумам ветрового волнения и зыби. Для временных рядов волн зыби, ветровых волн и семичасовой сейши были вычислены огибающие этих процессов, с использованием преобразования Гильберта. Огибающие показали хорошее совпадение пиков в волновых процессах, что подтвердило передачу энергии от атмосферных возмущений семичасовой сейше.

Показано, что для сейш с периодом 3.5 ч в районе Поронайска, пик которых находится в спектральной плотности временного ряда с вычтенным предвычисленным приливом, и приливной гармонике $4M_{\sigma_7}$, которая присутствует в спектральной плотности временного ряда с приливом, периоды обеих волн – приливной и сейши почти совпадают.

Сравнение временных рядов колебаний уровня моря – исходного, второго с периодом 2.7 ч и спектрограммы колебаний уровня моря – показало, что наибольшие высоты сейш с периодом 2.7 ч наблюдаются на 6–8-е сутки после максимума суточного прилива с периодом 24.68 ч, который близок к периоду лунной приливной гармонике M_1 .

Показано, что максимальные высоты сейш с периодом 2 ч соответствуют максимальным высотам ветрового волнения и зыби, т.е. энергия на возбуждение сейш с периодом 2 ч, по крайней мере ее часть, поступает от атмосферных возмущений. Случаи отсутствия генерации сейш при штормовом волнении объясняются тем, что увеличение высоты сейш происходит при ветрах южных румбов, способствующих приходу волн в зал. Терпения.

Изучение энергетических источников возбуждения сейш необходимо для прогнозирования по их поведению возможного значительного роста высоты сейш, что может создавать проблемы при проведении погрузо-разгрузочных работ в порту Поронайск.

Список литературы

1. Ковалев Д.П., Ковалев П.Д. **2020**. Особенности волнового режима в заливе Терпения. *Экологические системы и приборы*, 11: 20–28. <https://doi.org/10.25791/esip.11.2020.1190>
2. Рабинович А.Б. **1993**. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. Л.: Гидрометеиздат, 325 с.
3. Wilson B.W. **1972**. Seiches. *Advances in Hydrosience*, 8: 1–94. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-021808-0.50006-1>
4. Korgen B.J. **1995**. Seiches, transient standing-wave oscillations in water bodies can create hazards to navigation and unexpected changes in water conditions. *American Scientist*, 83: 330–341.
5. De Jong M. **2004**. *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbor basins*. The Netherlands: Partners Ipskamp Beheer B.V., 119 p.
6. Rabinovich A.B. **2009**. Seiches and harbor oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapore: World scientific publ. comp., p. 193–236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009
7. Defant A. **1961**. *Physical oceanography*. Vol. 2. Pergamon Press, 598 p. <https://doi.org/10.1126/science.134.3488.1412>
8. Rabinovich A.B., Monserrat S. **1996**. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: descriptive and statistical analysis. *Natural Hazards*, 13(1): 55–90.
9. Monserrat S., Vilibi'c I., Rabinovich A.B. **2006**. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6: 1035–1051.
10. Hibiya T., Kajiura K. **1982**. Origin of Abiki phenomena (a kind of seiches) in Nagasaki Bay. *J. of Oceanography (of the Oceanographic Society of Japan)*, 38(3): 172–182. <https://doi.org/10.1007/bf02110288>
11. De Jong M.P.C., Holthuijsen L.H., Battjes J.A. **2003**. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *J. of Geophysical Research Atmospheres*, 108(4): 3117. <https://doi.org/10.1029/2002jc001422>
12. Giese G.S., Chapman D.C., Black P.G., Fornshell J.A. **1990**. Causation of large-amplitude coastal seiches in the Caribbean coast of Puerto Rico. *J. of Physical Oceanography*, 20(9): 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)
13. Giese G.S., Chapman D.C. **1993**. Coastal seiches. *Oceanus*, 36(1): 38–46.
14. Плеханов Ф.А., Ковалев Д.П. **2016**. Программа комплексной обработки и анализа временных рядов данных уровня моря на основе авторских алгоритмов. *Геоинформатика*, 1: 44–53.
15. Ковалев Д.П. **2018**. *Кута*: патент RU № 2018618773. Заявл. 20.03.2018; опублик. 19.07.2018.
16. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В. **2008**. *Экспериментальные исследования длинноволновых процессов на северо-западном шельфе Тихого океана*. Владивосток: Дальнаука, 215 с.
17. Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В. **2016**. Исследование свободных колебаний жидкости в ограниченном бассейне, представляющем приближенную модель Азовского моря. *Морской гидрофизический журнал*, 2: 16–26. <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2016-2-14-23>
18. Судольский А.С. **1991**. *Динамические явления в водоемах*. Л.: Гидрометеиздат, 263 с.
19. Райхлен Ф. **1970**. Резонанс гавани. В кн.: *Гидродинамика береговой зоны и эстуариев*: пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, с. 114–166.
20. Арсеньева Н.М., Давыдов Л.К., Дубровина Л.Н., Конкина Н.Г. **1963**. *Сейши в озерах СССР*. Л.: Изд-во ЛГУ, 184 с.
21. Гоноровский И.С. **1967**. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: Сов. радио, т. 1, 439 с.
22. Морс Ф.М., Фешбах Г. **1958**. *Методы теоретической физики*: пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., т. 1, 930 с. URL: <https://www.amazon.com/Methods-Theoretical-Physics-International-Applied/dp/007043316X> (дата обращения 30.05.2022).
23. Parker B.B. **2007**. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver Spring, 378 p.
24. Зернов Н.В., Карпов В.Г. **1972**. *Теория радиотехнических цепей*. Л.: Энергия, 816 с.
25. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. **2013**. Особенности сейшевых колебаний в заливах и бухтах Дальнего Востока: Приморья, Сахалина, южных Курильских островов. *Вестн. Тамбовского университета, Сер. Естественные и технические науки*, 18(4): 1377–1382.

References

1. Kovalev D.P., Kovalev P.D. **2020**. [Peculiarities of the wave regime in Terpeniya Bay]. *Ekologicheskie sistemy i pribory = Ecological Systems and Devices*, 11: 20–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.25791/esip.11.2020.1190>
2. Rabinovich A.B. **1993**. *Dlinnye gravitatsionnye volny v okeane: zakhvat, rezonans, izluchenie [Long gravitational waves in the ocean: entrainment, resonance, emission]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 325 p. (In Russ.).
3. Wilson B.W. **1972**. Seiches. *Advances in Hydrosience*, 8: 1–94. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-021808-0.50006-1>
4. Korgen B.J. **1995**. Seiches, transient standing-wave oscillations in water bodies can create hazards to navigation and unexpected changes in water conditions. *American Scientist*, 83: 330–341.
5. De Jong M. **2004**. *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbor basins*. The Netherlands: Partners Ipskamp Beheer B.V., 119 p.
6. Rabinovich A.B. **2009**. Seiches and harbor oscillations. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Singapore: World scientific publ. comp., p. 193–236. https://doi.org/10.1142/9789812819307_0009
7. Defant A. **1961**. *Physical oceanography*. Vol. 2. New York: Pergamon, 598 p. <https://doi.org/10.1126/science.134.3488.1412>
8. Rabinovich A.B., Monserrat S. **1996**. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: descriptive and statistical analysis. *Natural Hazards*, 13(1): 55–90. <https://doi.org/10.1007/bf00156506>
9. Monserrat S., Vilibi'c I., Rabinovich A.B. **2006**. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6: 1035–1051.
10. Hibiya T., Kajiura K. **1982**. Origin of Abiki phenomena (a kind of seiches) in Nagasaki Bay. *J. of Oceanography (of the Oceanographic Society of Japan)*, 38(3): 172–182. <https://doi.org/10.1007/bf02110288>
11. De Jong M.P.C., Holthuijsen L.H., Battjes J.A. **2003**. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *J. of Geophysical Research Atmospheres*, 108(4): 3117. <https://doi.org/10.1029/2002jc001422>
12. Giese G.S., Chapman D.C., Black P.G., Fornshell J.A. **1990**. Causation of large-amplitude coastal seiches in the Caribbean coast of Puerto Rico. *J. of Physical Oceanography*, 20(9): 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)

13. Giese G.S., Chapman D.C. **1993**. Coastal seiches. *Oceanus*, 36(1): 38–46.
14. Plekhanov F.A., Kovalev D.P. **2016**. [Program for complex processing and analysis of time-series of sea level data based on the proprietary algorithms]. *Geoinformatika*, 1: 44–53. (In Russ.).
15. Kovalev D.P. **2018**. *Кума*: patent RU № 2018618773. Appl. 20.03.2018; publ. 19.07.2018. (In Russ.).
16. Kovalev P.D., Shevchenko G.V. **2008**. *Ekspperimental'nye issledovaniya dlinnovolnovykh protsessov na severo-zapadnom shel'fe Tikhogo okeana* [Experimental studies of long-wave processes on the Pacific northwest shelf]. Vladivostok: Dal'nauka, 215 p. (In Russ.).
17. Maniliuk Yu.V., Cherkosov L.V. **2016**. Investigation of free liquid oscillations in a bounded basin representing an approximate model of the Sea of Azov. *Morskoy Gidrofizicheskii Zhurnal = Physical Oceanography*, 2: 16–26. <https://doi.org/10.22449/1573-160x-2016-2-14-23>
18. Sudol'skij A.S. **1991**. *Dinamicheskie yavleniya v vodoemakh* [Dynamic phenomena in water bodies]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 263 p. (In Russ.).
19. Rajkhlen F. **1970**. [Harbour resonance]. In: *Gidrodinamika beregovoi zony i estuariyev*: transl. from Engl. Leningrad: Gidrometeoizdat, p. 114–166.
20. Arsen'eva N.M., Davydov L.K., Dubrovina L.N., Konkina N.G. **1963**. [Seiches on the lakes of the USSR]. Leningrad: Izd-vo LGU, 184 p. (In Russ.).
21. Gonorovskii I.S. **1967**. [Radio engineering circuits and signals]. Moscow: Sovetskoye radio, vol. 1, 439 p. (In Russ.).
22. Morse Ph.M., Feshbakh G. **1958**. *Methods of theoretical physics*: transl. from Engl. Moscow: Izd-vo inostr. lit., vol. 1, 930 p. URL: <https://www.amazon.com/Methods-Theoretical-Physics-International-Applied/dp/007043316X> (accessed 30.05.2022).
23. Parker B.B. **2007**. *Tidal analysis and prediction*. Maryland: Silver Spring, 378 p.
24. Zernov N.V., Karpov V.G. **1972**. [Theory of radio engineering circuits]. Leningrad: Energiya, 816 p. (In Russ.).
25. Kovalev P.D., Kovalev D.P. **2013**. Seiche vibrations features in bays and inlets of Far East: Primorye, Sakhalin, Southern Kuril Islands. *Vestn. Tambovskogo universiteta, Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 18(4): 1377–1382. (In Russ.).

Об авторах

Сотрудники лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск:

Ковалев Дмитрий Петрович (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории, d.kovalev@imgg.ru

Ковалев Петр Дмитриевич (<https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, p.kovalev@imgg.ru

Борисов Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, a.borisov@imgg.ru

Зарочинцев Виталий Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0002-4015-9441>), научный сотрудник, zarochintsev@imgg.ru

Кириллов Константин Владиславович (<https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>), научный сотрудник, k.kirillov@imgg.ru

About the Authors

Employees of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk:

Kovalev, Dmitry P. (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the laboratory, d.kovalev@imgg.ru

Kovalev, Peter D. (<https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>), Doctor of Engineering, Leading Researcher, p.kovalev@imgg.ru

Borisov, Aleksander S. (<https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>), Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, a.borisov@imgg.ru

Zarochintsev, Vitalii S. (<https://orcid.org/0000-0002-4015-9441>), Researcher, zarochintsev@imgg.ru

Kirillov, Konstantin V. (<https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>), Researcher, k.kirillov@imgg.ru

Поступила в редакцию 10.05.2022

После рецензирования 1.06.2022

Принята к публикации 6.06.2022

Received 10 May 2022

Revised 1 June 2022

Accepted 6 June 2022