

Характеристики морского волнения в порту города Холмск (о. Сахалин)

А. С. Борисов

E-mail: a.borisov@imgg.ru

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

Реферат. В строительстве и реконструкции портов руководствуются расчетными характеристиками ветровых волн, штормовых нагонов, низкочастотных колебаний акваторий (сейш). Однако корректное определение этих характеристик невозможно без учета натуральных наблюдений морского волнения в конкретном порту в разных условиях. Настоящая работа дополняет существующие данные по характеристикам волнения в главном порту о. Сахалин на основе измерений уровня моря, проведенных в 2007 г. Выполнена оценка амплитуд колебаний морской поверхности, пиковых составляющих энергетического спектра волнения и соответствующих им периодов колебаний. При этом пиковые составляющие определялись в диапазоне периодов от ветрового волнения до низкочастотных, сейшевых колебаний. Проанализированы штормовые ситуации и условия спокойного моря. Показан резонансный характер колебаний. Установлено, что в тихую погоду пиковые составляющие в энергетическом спектре сосредоточены в области нулевой моды собственных колебаний в порту, соответствующей 500 с. В наиболее активной фазе штормов пиковая составляющая проявляет себя преимущественно в окрестности периода 8 с, а в начале и конце шторма – в окрестности периода 182 с, соответствующего первой моде собственных колебаний. Анализ пиковых спектральных компонент в широком диапазоне периодов позволяет проследить динамику морского волнения в порту и процесс «раскачки» сейшевых колебаний.

Ключевые слова: морское волнение, энергетический спектр, пиковая составляющая, период пиковой составляющей

Sea wave characteristics in the port of Kholmsk (Sakhalin Island)

Alexander S. Borisov

E-mail: a.borisov@imgg.ru

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

Abstract. During construction and reconstruction of ports, they are guided by the calculated characteristics of wind waves, storm surges, low-frequency oscillations of water areas (seiches). However, the correct determination of characteristics is impossible without taking into account field observations of sea waves in a particular port under different conditions. This work supplements the existing data on wave characteristics in the main port of Sakhalin Island on the basis of sea level measurements carried out in 2007. The main characteristics of sea waves in the port area were estimated: amplitudes of sea surface oscillations, peak components of the wave energy spectrum and the corresponding periods of oscillations. In this case, the peak components were determined in the range of periods from wind waves to low-frequency seiche oscillations. Storm situations and calm sea conditions were analyzed. The resonant nature of oscillations is shown. It has been established that in calm weather the peak components in the energy spectrum are concentrated in the region of the zero mode of natural oscillations in the port corresponding to 500 s. In the most active phase of storms, the peak component manifests itself mainly near the period of 8 s, and at the beginning and end of the storm it is near the period of 182 s, corresponding to the first mode of natural oscillations. The analysis of peak spectral components in a wide range of periods allows us tracing the dynamics of sea waves in the port and the process of build-up of seiche oscillations.

Keywords: sea waves, energy spectrum, wave energy, peak wave period

Для цитирования: Борисов А.С. Характеристики морского волнения в порту города Холмск (о. Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2022, т. 6, № 1, с. 54–59. <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.054-059>

For citation: Borisov A.S. Sea wave characteristics in the port of Kholmsk (Sakhalin Island). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 54–59. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2022.6.1.054-059>

Введение

Обычно характеристики морского волнения в портах анализируются в двух диапазонах частот (периодов). Первый находится в пределах от 5–8 до 10–15 с. В этом диапазоне анализируется влияние штормовых волн на подходах к порту на возможные колебания уровня моря в порту. Результаты учитываются при проектировании строительства и модернизации портов с целью обеспечения защищенности находящихся в них судов. Второй диапазон – более низкочастотный, включающий собственные колебания (сейши) внутрипортовой акватории. Анализ собственных колебаний необходим для учета резонансных эффектов, которые могут усиливать приходящие внешние волны, вызывать такие опасные явления, как тягун [1]. Параметры резонансных колебаний достаточно хорошо описаны в научных работах, например применительно к порту Холмск в [2, 3, 4]. Однако анализ волнового процесса во всем частотном диапазоне, сравнение максимальных амплитуд в спектре морского волнения при различных условиях волнения в портах еще не проводился. Такой подход позволит проследить динамику морского волнения – зависимость амплитуд собственных колебаний от амплитуд волн штормового диапазона и ее изменение во времени.

В настоящей работе на основе обработки цифровых записей придонного давления определены основные характеристики морского волнения в порту г. Холмск в 2007 г.: пиковые составляющие энергетического спектра волне-



Рис. 1. Место установки регистратора в акватории порта г. Холмск обозначено белой точкой (карта <https://www.google.com/maps/@47.0503978,142.0423041,915m/data=!3m1!1e3>).

Fig. 1. The installation site of the registrar in the water area of the port of Kholmsk is marked by a white dot (the map: <https://www.google.com/maps/@47.0503978,142.0423041,915m/data=!3m1!1e3>).

ния и соответствующие им периоды колебаний, а также амплитуды колебаний морской поверхности (амплитуды волнения). Проанализированы штормовые ситуации и условия спокойного моря. Записи были сделаны с односекундной дискретностью автономным регистратором волнения АРВ-К10, установленным на дне южной гавани морского торгового порта «Холмск» на глубине 5 м. Место установки показано на рис. 1. Принцип действия и технические параметры регистратора подробно описаны в работе [5].

Анализ экспериментальных данных

Измерения в порту проводились с июля по октябрь 2007 г. На рис. 2 представлена запись измерений придонного давления (рис. 2 а), текущий энергетический спектр, т.е. изменение энергетического спектра во времени (рис. 2 б), и усредненные энергетические спектры: для штормовой погоды, для всей записи и для тихой погоды (рис. 2 в). Для вычисления спектров использовалось скользящее временное окно длительностью 100 мин и 50%-е перекрытие.

За время регистрации наблюдались различные состояния моря: спокойное, несколько небольших штормов в июле–сентябре и сильные штормы в сентябре–октябре, что можно видеть на рис. 2 а по отклику поверхности моря в порту. Спектр на рис. 2 б позволяет сделать вывод, что максимальные компоненты энергетического спектра сосредоточены в окрестностях периодов 10, 35, 180 и 500 с. Энергии и соотношения энергий этих компонент не постоянны и зависят от состояния поверхности моря (волнения).

Обращаясь к рис. 2 в, уточним общую картину энергетического спектра. Видно, что спектр носит линейчатый характер, имея несколько устойчивых пиков, которые существуют как в спектре всей реализации, так и в спектрах для штормовой и спокойной погоды. Максимумы в энергетическом спектре находятся на периодах собственных частот акватории порта. При этом период 500 с соответствует периоду нулевой моды собственных колебаний порта [4].

В таблице приведены усредненные значения характеристик максимальных энергетических компонент. Заметим, что значение периода компоненты является также усредненной величиной, поскольку зависит от объема воды в

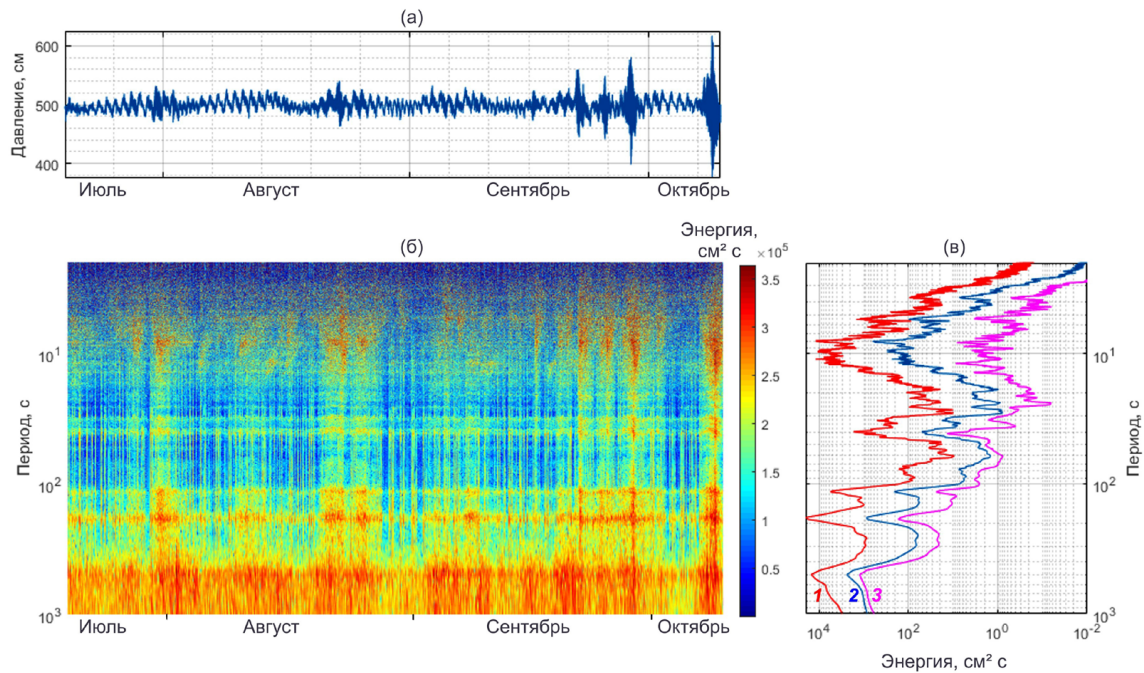


Рис. 2. (а) – запись придонного давления в порту г. Холмск, пересчитанная в см водного столба, в период с 19 июля по 10 октября 2007 г.; (б) – изменение энергетического спектра во времени; (в) – энергетические спектры: 1 – с 8 по 10 октября 2007 г. (шторм), 2 – за все время наблюдений, 3 – с 4 по 9 августа (спокойное море).

Fig. 2. (a) – bottom pressure record in the port of Kholmnsk, converted in cm of water column, for the period from July 19 to October 10, 2007; (б) – change in the energy spectrum in time; (в) energy spectra: 1 – from October 8 to October 10, 2007 (storm), 2 – for the entire observation period, 3 – from August 4 to 9 (calm sea).

гавани, а следовательно, от таких явлений, как приливы, нагоны, штормы, цунами [6]. Приближенная оценка отклонения значения периода от среднего показывает, что девиация не превышает $\pm 7\%$ для первых пяти мод колебаний. Для удобства сравнения энергий на разных периодах величины в таблице были нормированы к максимуму энергетического спектра. Так, для случая энергетического спектра всей реализации (рис. 2 в, 2) максимальное значение в спектре энергии колебаний равно $2387 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ и находится на периоде 500 с, второй по величине максимум соответствует периоду 182 с, третий – 8 с, четвертый – 115.5 с. Далее энергия локальных максимумов в спектре отличается от энергии основного уже более чем в 10 раз. Для энергетического спектра волнения в спокойную погоду (рис. 2 в, 3) первый и второй максимумы также наблюдаются на периодах 500 и 182 с соответственно, при этом значение первого максимума составляет $1232 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$. Третий максимум находится на периоде 115.5 с, однако его величина уже более чем в 50 раз меньше величины первого. В шторм порядок расположения максимальных компонент в энергетическом спектре (рис. 2 в, 1) меняется, и можно выделить

уже 5 наиболее «мощных» компонент. Максимум в спектральной энергии приходится на период 182 с и составляет величину $19\,820 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$, второй по величине максимум обнаруживает себя на периоде 500 с, третий – 8 с, четвертый – 115.5 с и пятый – 39.5 с. Такое перераспределение спектральных максимумов по периодам наблюдается для всех четырех сильных штормов, происходивших в сентябре–октябре.

Проведенные усредненные оценки указывают на резонансный характер колебаний уровня в порту. Максимальная энергия в спектре колебаний сосредоточена на периодах 500 и 182 с. Однако усредненная во времени оценка не дает достаточно полного представления о развитии волнового процесса, о том, меняется ли соотношение энергий на разных периодах в разные моменты времени. Поэтому интерес представляет анализ энергии E_p и периода T_p пиковой составляющей энергетического спектра волнения на более коротких временных участках. Для этого была проведена оценка значений величин E_p и T_p в 100-минутных интервалах (рис. 3 а и б). Для наглядности каждая оценка E_p и T_p в 100-минутном интервале показана в виде точки на соответствующем рисунке. Такое пред-

Таблица. Усредненные значения характеристик максимальных энергетических компонент
Table. Averaged values of characteristics of the peak energy components

Период компоненты, с	Отношение энергий, дБ		
	Для всей реализации	Для фрагмента со штормом	Для фрагмента со спокойной погодой
500	0	-1.2	0
182	-4.4	0	-8.6
115.5	-10.6	-5.5	-17.1
77	–	-20.8	–
39.5	-16.8	-10.7	-19.6
32.5	-21.3	-15.9	-28.7
26	-27.9	-23.1	–
22	–	-23.2	–
20	–	-22.6	–
14	–	–	-25.5
12	–	–	-21.5
8	-5.8	-2.2	-21.7
5.5	-13.9	-11.3	-25.7
3.5	-25.2	-23.2	-33.8

Примечание. Прочерк означает отсутствие в энергетическом спектре максимума на данном периоде.
Note. A dash means the absence of maximum in the energy spectrum for a given period.

ставление позволяет сразу наблюдать тот факт, что пиковые компоненты сосредоточены только в окрестностях трех периодов колебаний: 500, 182 и 8 с. Для удобства сравнения пиковых энергетических компонент и амплитуд колебаний уровня моря на рис. 3 в приведен график колебаний уровня (амплитуды волнения H), из которого удалены приливные составляющие. Колебания уровня пересчитаны из исходной записи придонного давления (рис. 2 а) согласно методике [7], определяющей связь между компонентами давления на заданной глубине и смещением водной поверхности в Фурье-спектрах волновых полей.

Результаты на рис. 3 иллюстрируют, что большую часть времени регистрации, когда наблюдается спокойное море с максимальными амплитудами H , не превышающими 20 см, пиковая энергетическая составляющая спектра находится в области периода 500 с, а ее величина составляет в среднем $1950 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$. Реже пиковая составляющая проявляется в области 182 с с энергией, равной в среднем $235 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$. Следует отметить, что здесь не учитывался интервал времени с 6 до 12 ч 2 августа 2007 г., когда в порт пришло цунами от Невельского землетрясения. Во время прихода цунами значения H в точке измерения достигали 25 см, а пиковая составляющая энергии проявилась на перио-

де $T_p = 500 \text{ с}$ и имела максимальное значение $E_p = 4.3 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$.

Во время умеренных штормов в море, случившихся 9 раз в июле–сентябре, максимальное значение H волн в порту лежало в пределах 25–40 см. Наиболее сильные штормы наблюдались в конце сентября – начале октября. За период с 21 сентября до окончания наблюдений 10 октября произошли четыре сильных шторма, величина H в порту достигала 70–146 см. Для всех штормовых ситуаций характерно то, что в максимальной фазе развития шторма пиковая составляющая проявляется на периоде $T_p = 8 \text{ с}$. Для самого сильного за время наблюдения шторма, который рассматривался выше, средние значения E_p составили $2.8 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ на периоде $T_p = 8 \text{ с}$ и $6.5 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ на периоде $T_p = 182 \text{ с}$.

Двумерная гистограмма распределения пиковой составляющей в энергетическом спектре морского волнения в порту (рис. 4) показывает, что наиболее часто повторяющиеся (порядка 80 % от общего числа оценок) значения T_p находятся в окрестности периода 500 с, однако максимальная энергия E_p в этом диапазоне периодов меньше, чем на периодах в окрестностях 8 и 182 с. Максимальное значение E_p на периоде 500 с составило приблизительно $1.8 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ против значения

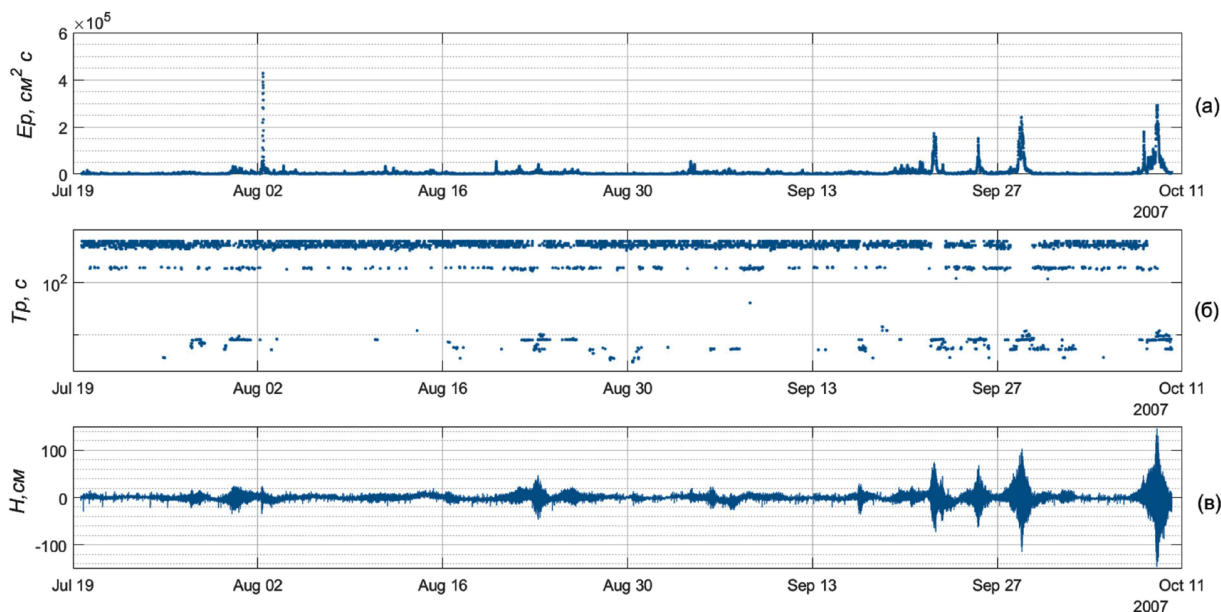


Рис. 3. Характеристики морского волнения в порту г. Холмск: энергия пиковой составляющей в спектре (а), период максимальной составляющей в спектре (б), амплитуда колебаний поверхности моря в точке измерения (в).

Fig. 3. Sea wave characteristics in the port of Kholmok: the energy of the peak component in the spectrum (а), the period of the peak component in the spectrum (б), the amplitude of sea surface oscillations at the measurement point (в).

$E_p = 2.8 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$, зарегистрированного на периодах 8 и 182 с. Исключение составляет случай Невельского цунами, записанного в порту г. Холмск, когда энергия E_p достигала величины $4.3 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$. Повторяемость проявления пиковой составляющей на периодах 8 и 182 с приблизительно одинакова и составляет порядка 10 %. Следует отметить также, что на периодах колебаний в окрестности 182 с E_p имеет две условные области значений: в диапазоне от приблизительно $2.4 \cdot 10^5$ до $2.8 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ и в диапазоне от условно 0 до $0.8 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$. В первом диапазоне пиковая компонента на периоде 182 с наблюдается во время штормов, во втором – в спокойную погоду. Вероятность перехода пиковой составляющей на другие периоды, в частности на видимый на гистограмме диапазон в районе 115.5 с, пренебрежимо мала (менее 0.001 %).

Обсуждение результатов и выводы

В работе выполнен анализ основных характеристик морского волнения в акватории порта Холмск по данным инструментальных измерений в штормовых и спокойных условиях. Измерения проводились в одной точке, что накладывает некоторые ограничения на анализ пространственного распределения волнения. Например, амплитуда колебания на нулевой

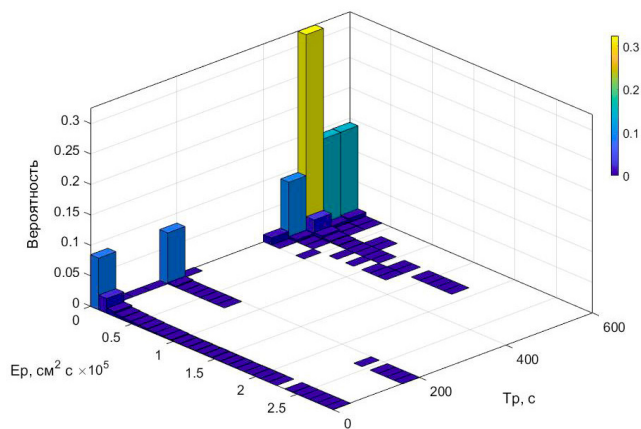


Рис. 4. Гистограмма распределения пиковой составляющей в энергетическом спектре.

Fig. 4. Histogram of distribution of the peak component in the energy spectrum.

моды в дальней части порта будет несколько больше по сравнению с точкой измерения, а амплитуды штормового волнения в кутовой части порта будут меньше измеренных. Однако проведенные исследования позволяют установить общие параметры морского волнения в порту.

Итак, колебания уровня моря в порту как в спокойную, так и штормовую погоду имеют резонансный характер, т.е. во время штормов не происходит разрушения резонансной структуры колебаний. Но если в спокойную погоду пиковая энергетическая составляющая в спек-

тре морского волнения проявляется преимущественно на периоде 500 с, соответствующем нулевой моде акватории порта, то в штормы пики в энергетическом спектре волнения наблюдаются на периодах 182 с, соответствующем первой моде, и 8 с, т.е. в диапазоне периодов, характерных для штормового волнения. В спокойную погоду значения E_p составляли $10^2 - 10^3 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$, а наибольших значений ($E_p = 2.8 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}$) пиковая составляющая достигала во время штормов. Причем как в диапазоне периодов в окрестности 8 с, так и в диапазоне в окрестности периода 182 с, который считается наиболее опасным с точки зрения возникновения тягуна в порту Холмск.

Проведенные исследования дополняют имеющиеся данные по описанию характеристик морского волнения в порту «Холмск». Предложенный подход, заключающийся в оценке пиковых спектральных компонент в широком диапазоне периодов, позволяет проследить динамику морского волнения в порту и процесс «раскачки» сейшевых колебаний. Оценки пиковых спектральных компонент пропорциональны значимой высоте волны, поэтому могут использоваться в расчетах режима волнения в порту.

Список литературы

1. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В., Ковалев Д.П. 2007. Экспериментальные исследования явления тягуна в порту г. Холмск. *Изв. Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова*, 20: 106–112.
2. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. 2013. Особенности сейшевых колебаний в заливах и бухтах Дальнего Востока: Приморья, Сахалина, южных Курильских островов. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*, 18(4): 1377–1382.
3. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В., Ковалев Д.П., Чернов А.Г., Золотухин Д.Е. 2009. Регистрация Симуширского и Невельского цунами в порту города Холмск. *Тихоокеанская геология*. Т. 28, № 5. С. 36–43.
4. Шевченко Г.В., Лоскутов А.В. 2017. Особенности проявления цунами в портах Сахалинской области по данным инструментальных измерений и

численного моделирования. *Геосистемы переходных зон*, 1(2): 35–49. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.035-049>

5. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. 2010. *Техника исследования опасных морских явлений в прибрежной зоне океана*. Владивосток: Дальнаука, 2010. 152 с.
6. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. 2018. Модуляция коротких инфрагравитационных волн приливом. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 11(1): 21–27.
7. Заславский М.М., Красицкий В.П. 2001. О пересчете данных волнографа с датчиком давления на спектр поверхностных волн. *Океанология*, 41(2): 195–200.

References

1. Kovalev P.D., Shevchenko G.V., Kovalev D.P. 2007. [Experimental studies of the harbor oscillation phenomenon in the port of Kholmok]. *Izv. Akademii inzhenernykh nauk im. A.M. Prokhorova = News Academy of Engineering Sciences A.M. Prokhorov*, 20: 106–112. (In Russ.).
2. Kovalev P.D., Kovalev D.P. 2013. Seiche vibrations features in bays and inlets of Far East: Primorye, Sakhalin, Southern Kuril Islands. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 18(4): 1377–1382. (In Russ.).
3. Kovalev P.D., Shevchenko G.V., Kovalev D.P., Chernov A.G., Zolotukhin D.E. 2009. Registration of the Simushir and Nevelsk tsunamis in the port of Kholmok. *Russian J. of Pacific Geology*, 3(5): 443–449.
4. Shevchenko G.V., Loskutov A.V. 2017. Features of tsunamis in the ports of the Sakhalin Region inferred from the data of instrumental measurements and numerical modeling. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(2): 35–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.035-049>
5. Kovalev P.D., Kovalev D.P. 2010. *Tekhnika issledovaniya opasnykh morskikh yavlenii v pribrezhnoi zone okeana [Technique for the study of hazardous marine phenomena in the coastal zone of the ocean]*. Vladivostok: Dal'nauka, 152 p. (In Russ.).
6. Kovalev P.D., Kovalev D.P. 2018. Modulation of short infragravity waves by tide. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 11(1): 21–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S2073667318010021>
7. Zaslavskiy M.M., Krasitskiy V.P. 2001. [About recalculation wave recorder data with a pressure sensor on the spectrum surface waves]. *Okeanologiya = Oceanology*, 41(2): 195–200. (In Russ.).

Об авторах

Борисов Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.borisov@imgg.ru

Поступила 28.02.2022
После доработки 18.03.2022
Принята к печати 22.03.2022

About Author

Borisov, Alexander S. (<https://orcid.org/0000-0002-9026-4258>), Cand Sci. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.borisov@imgg.ru

Received 28 February 2022
Revised 18 March 2022
Accepted 22 March 2022