

## Особенности волнения в южной части Охотского моря – акватории маршрутов водного транспорта к южным Курильским островам

© 2021 Д. П. Ковалев\*, П. Д. Ковалев, А. С. Борисов, К. В. Кириллов

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

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

**Резюме.** Описаны результаты изучения в 2009–2010 гг. волнения в южной части Охотского моря в местах морских трасс между островами Сахалин и Итуруп с использованием автономных регистраторов волнения. Исследования проведены в целях повышения безопасности морской транспортной системы. Исходя из режима волнения и метеоусловий, циклон любого направления, подходящий к южной части Охотского моря, вызывает в рассматриваемой акватории и у берегов о. Итуруп волнение с высотами волн более 1.7 м. Но если циклон подходит к о. Сахалин с северо-запада, то высота ветровых волн и зыби в прибрежной полосе юга – востока острова мала, и здесь существует возможность для судов укрыться от шторма. Анализ длинных волн с периодами приливных гармоник от 4 ч и больше показал, что они имеют практически одинаковую фазу колебаний у обоих островов. Проанализированы внутренние волны, обусловленные местными для каждой прилегающей акватории особенностями батиметрии и рельефа прибрежной зоны. Выявлены поверхностные гравитационные волны с периодом около 2.8 ч, которые присутствуют в Курильском и Куйбышевском заливах и с периодом 2.4 ч вблизи с. Охотское о. Сахалин. Показано, что наибольшей добротностью в районе Курильска обладает резонансная акватория для периодов 4.5 мин и можно ожидать явление тягуна при шторме на море.

**Ключевые слова:** инфрагравитационные волны, колебания уровня моря, приливы, ветровые волны и зыбь, внутренние волны, сейши, циклоны

## Wave characteristics in the southern part of the Sea of Okhotsk – the area of water transport routes to the southern Kuril Islands

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

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

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

**Abstract.** This paper describes the results of studying the waves in the southern part of the Sea of Okhotsk on the sea routes between Sakhalin and Iturup islands by means of autonomous wave recorders. The study was performed in order to improve the safety of the maritime transport system. Analysis of the wave regime and weather conditions in the southern part of the Sea of Okhotsk, has shown that a cyclone of any direction approaching the southern part of the Sea of Okhotsk, causes sea waves with heights of more than 1.7 meters in the considered water area and nearshore of Iturup Island. However, if a cyclone approaches Sakhalin Island from the northwest direction, the height of wind waves and swell in the coastal area of the southeast of the island is small, and here is an opportunity for ships to take shelter from the storm. The analysis of long waves with tidal harmonic periods of 4 hours and more has shown, that they have almost the same oscillation phase for both islands. The internal waves caused by the local features of bathymetry and relief of the coastal zone for each adjacent water area are analyzed. Surface gravitational waves with a period of about 2.8 hours were detected at Kuibyshevsky and Kurilsky bays, and waves with a period of 2.4 hours were detected near the Okhotskoye village at Sakhalin Island. It is shown that the highest Q-factor in the Kurilsk region has the resonant water area for the periods of 4.5 minutes. It is noted that for these waves the phenomenon of a tyagun (harbour oscillations) can be expected during a storm at sea.

**Keywords:** infragravity wave, sea route, sea level fluctuations, tides, wind wave and swell, internal wave, seiches, cyclones

**Для цитирования:** Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Кириллов К.В. Особенности волнения в южной части Охотского моря – акватории маршрутов водного транспорта к южным Курильским островам. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 328–338. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.328-338>

### Благодарности и финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.

### Введение

Изучение волнения в южной части Охотского моря – акватории между островами Сахалин, Хоккайдо, Кунашир и Итуруп – представляет интерес в связи с хозяйственной деятельностью в этом регионе. Здесь пролегают маршруты грузовых и пассажирских судов, связывающих Курильские острова с о. Сахалин и Азиатским континентом.

Район Южных Курильских островов богат рыбой, биоресурсами, поэтому здесь ведется достаточно активный их промысел. Информация о температурном режиме и внутренних волнах в районе необходима рыболовецким судам. Кроме того, знание температуры воды вблизи берегов позволяет правильно организовать добычу придонных биоресурсов, таких как морской еж и грёбешок.

Тем не менее волнение и его связь с метеоусловиями в южной части Охотского моря все еще недостаточно изучены. В лоции Охотского моря [2011] отмечается, что укрытых якорных мест в Охотском море мало. В большинстве бухт и заливов суда имеют возможность укрываться лишь от ветров с берега, а при других ветрах они вынуждены уходить штормовать в море. Поэтому данные о том, при каких ветрах и где суда могут укрываться от шторма, также необходимы. Кроме того, в статье рассмотрен вопрос о возможном воздействии на суда, стоящие на якорной стоянке у берегов, такого опасного явления, как тягун, которое может приводить даже к обрыву якорных цепей.

Учитывая значимость рассматриваемой части Охотского моря для практической деятельности, авторами проведено изучение поверхностных гравитационных и внутренних волн в акватории моря между островами Сахалин и Итуруп с использованием автономных регистраторов волнения АРВ-К12. Это позволило сделать существенные выводы о приливных режимах, ветровых волнах и зыби, проанализировать метеоусловия, при которых наблюдается штормовое волнение.

**For citation:** Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Kirillov K.V. Wave characteristics in the southern part of the Sea of Okhotsk – the area of water transport routes to the southern Kuril Islands. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 328–338. (In Russ., abstr. in Engl.).

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.4.328-338>

### Acknowledgements and Funding

The work was carried out within the framework of state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

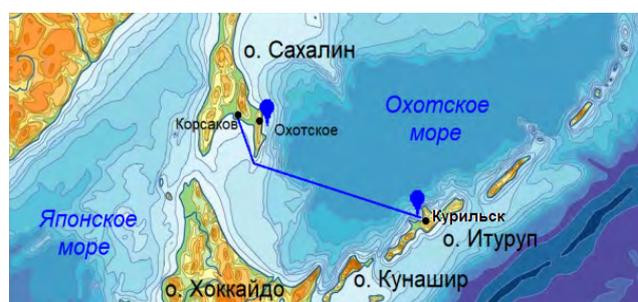
### Результаты и обсуждение

#### 1. Наблюдения

Для изучения волнения в южной части Охотского моря использовались результаты измерений волнения и температуры, полученные в 2009–2010 гг. с помощью измерителей волнения АРВ-К12, расположенных вблизи с. Охотское, на юго-восточном побережье о. Сахалин, и вблизи населенного пункта Курильск, на западном берегу о. Итуруп (рис. 1). Расстояние между пунктами составляет примерно 407 км.

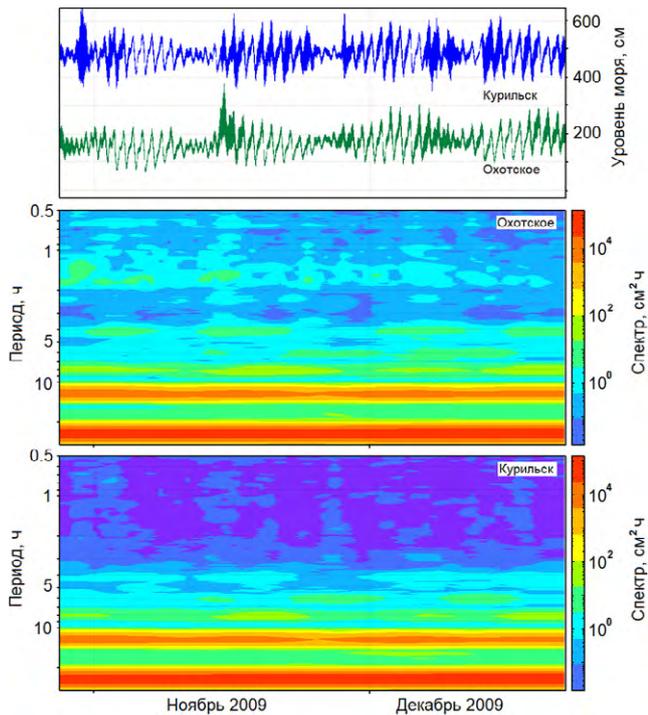
Вблизи Курильска (о. Итуруп) был установлен прибор на глубине около 5 м, измерение волнения проводилось с 1 июля по 22 декабря 2009 г. В с. Охотском (о. Сахалин) прибор был установлен на глубине около 1.7 м, измерения проводились с 28 октября 2009 по 7 марта 2010 г. Таким образом, синхронная регистрация осуществлялась с 28 октября по 22 декабря 2009 г., т.е. почти два месяца. Дискретность обоих измерений составляла 1 с.

На рис. 2 представлены полученные временные серии и их текущие спектры для времени синхронной регистрации на обоих приборах. На рядах колебаний уровня хорошо видны суточные и полусуточные приливы. При этом их величина в обоих пунктах наблюдения была примерно одинаковой и для суточного прилива достигала 1.5 м. Также видно,



**Рис. 1.** Карта южной части Охотского моря. Показаны места расположения измерителей волнения и маршрут водного транспорта Корсаков–Курильск.

**Fig. 1.** Map of the southern part of the Sea of Okhotsk. The locations of the wave gauges and the route of water transport Korsakov–Kurilsk are shown.



**Рис. 2.** Временные серии наблюдений за колебаниями уровня моря и их текущие спектры для времени синхронной регистрации в обоих пунктах.

**Fig. 2.** Time series of observations of sea level fluctuations and their current spectra for synchronous registration time at both points.

что за время наблюдений в рассматриваемом районе наблюдалось несколько штормов с высотой волн в Курильске до 2.3 м и в Охотском до 1.5 м.

## 2. Колебания уровня с приливными периодами

Текущие спектры (рис. 2) построены для диапазона периодов 0.5–30 ч, поскольку на более коротких периодах невозможно ожидать связи между волновыми процессами в пунктах наблюдения. Поэтому особенности более короткопериодного волнения будут рассмотрены ниже. На текущих спектрах (рис. 2), так же как и на временных сериях, хорошо выделяются максимумы, соответствующие суточным  $M_1$  (24.84 ч) и полусуточным мелководным приливам  $M_2$  (12.42 ч).

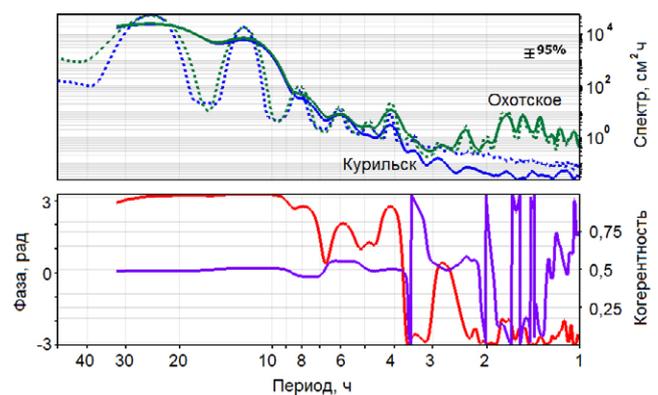
Поскольку текущие спектры позволяют проследить общую тенденцию изменения волнения во времени, но не позволяют с достаточной точностью определить периоды максимумов, для этого же диапазона периодов были рассчитаны спектры и взаимно-спектральные функции – когерентность и фаза (рис. 3). Они позволили уточнить периоды пиков, соответствующих волновым процессам. Эти периоды сведены в таблицу. Там же приведены

периоды гармоник в соответствии с [Parker, 2007]. Кроме того, в спектрах, рассчитанных по данным вблизи пункта Охотское, наблюдаются пики на более коротких периодах – около 1.03, 1.15, 1.31, 1.5, 1.72, 2.0 и 2.32 ч.

Из таблицы следует, что эти пики в спектрах обеих записей соответствуют приливным гармоникам. При этом, как видно из поведения фазы на рис. 3, для суточной, полусуточной и с периодами 2.8, 4.12, 4.83 ч приливных гармоник разность фаз прихода волн в оба пункта наблюдения нулевая, что означает одновременное наступление прилива. Для гармоник с периодами 8.17 и 6.0 ч фаза составляет  $-0.27$  ( $-15$  град) и  $0.38$  (21.8 град) радиан соответственно.

Заметим, что когерентность для рассмотренных гармоник более 0.5 и превышает доверительный интервал, равный 0.4. В спектрах на рис. 3 выделяется пик с периодом около 2.8 ч, являющийся предположительно приливной гармоникой  $2M_2NK_0$ . Разность фаз для колебаний с этим периодом в пунктах наблюдения близка к нулю. Это свидетельствует о том, что данные колебания связаны между собой и проходят в Охотское и Курильск одновременно. Поскольку период достаточно короткий, мы проверили возможность принадлежности этого волнового процесса к сейшам.

Для измеренного по карте расстояния между Охотским и Курильском (примерно 407 км) и средней глубины Охотского моря 821 м [Добровольский, Залогин, 1982], в предположении, что южная часть Охотского моря



**Рис. 3.** Спектры колебаний уровня в Курильске, Охотском (сплошные линии) и когерентность (красная линия), фаза (фиолетовая линия), рассчитанные по синхронным записям. Спектры, рассчитанные по всей длине временных рядов, выполнены пунктирными линиями.

**Fig. 3.** Spectra of sea level fluctuations in Kurilsk and Okhotskoye village (solid lines) and coherence (red line), phase (purple line), calculated from synchronous recordings. The spectra calculated along the entire length of the time series are made with dotted lines.

является бассейном, ограниченным о. Сахалин, о. Хоккайдо и островами Курильской гряды, были определены периоды собственных резонансных частот этой акватории по формуле Мериана для полуоткрытых прямоугольных бассейнов с длиной  $L$  и однородной глубиной  $H$  [Райхлен 1970; Рабинович, 1993]:

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

Здесь  $g$  – гравитационное ускорение.

При этом для первой моды был получен период 2.5 ч. Учитывая, что глубина в южной части Охотского моря в районе о. Хоккайдо меньше средней глубины по Охотскому морю, перерасчет средней глубины рассматриваемой акватории показал, что периоду 2.8 ч соответствует глубина примерно 670 м.

Таким образом, беря во внимание приближения глубины и контура акватории, можно заключить, что рассматриваемые колебания с периодом 2.8 ч могут быть не только приливной гармоникой, но также и сейшей.

Обнаруженные колебания с периодами от 1.03 до 2.32 ч наблюдаются только в районе с. Охотское и вблизи Курильска не проявляются. Это, как уже выше отмечалось, указывает на их связь с местными топографическими и батиметрическими особенностями побережья в зал. Мордвинова вблизи с. Охотское. Длины этих волн, рассчитанные из выражения для периода [Кочин и др., 1963]  $T = \sqrt{2\pi\lambda/g}$ , где  $T$  – период волны,  $\lambda$  – длина волны, – достаточно большие, примерно от 4.4 до 10.8 км.

Хотя происхождение этих пиков заранее неизвестно, достаточно большой период и длина волны не позволяют предполагать, что они вызваны краевыми волнами, захваченными в прибрежном волноводе, как показывают наши исследования у юго-восточного побережья о. Сахалин [Kovalev, Squire, 2020; Squire, 2021]. Более вероятно, что они возникают в результате взаимодействия приливных гармоник с донным рельефом или являются шельфовыми сейшами и их гармониками.

Использование формулы Du Boys [Giese, 1987; Rabinovich, 2009] для профиля наклона

морского дна в районе с. Охотское  $h(x)$ , где  $x$  – расстояние от берега, позволяет рассчитать периоды  $T_n$   $n$ -й моды шельфовых сейш для  $n = 0, 1, 2, \dots$  и линейного наклонного шельфа, простирающегося на расстояние  $L = 115$  км от берега до глубины  $h = 100$  м, для которого средний наклон составляет  $\gamma \approx 8.7 \times 10^4$ :

$$T_n = \frac{4}{2n+1} \int_0^L \frac{dx}{\sqrt{gh(x)}} = \frac{8}{2n+1} \sqrt{\frac{L}{g\gamma}} \quad (2)$$

Полученные значения периодов для нескольких первых гармоник показывают, что они соизмеримы с теми, которые наблюдаются в наших данных, учитывая, что предположение о линейно возрастающей глубине воды на прибрежном шельфе является приблизительным и батиметрические измерения в Охотском море грубо аппроксимированы.

### 3. Волновые процессы с периодами от 5 с до 40 мин

Рассмотрим диапазон более коротких колебаний уровня моря. Текущие спектры для этих колебаний с периодами от 5 с до 40 мин приведены на рис. 4. Сразу отметим, что рассчитанная функция когерентности показала, как и предполагалось, отсутствие связи между этими колебаниями для разных пунктов наблюдения из-за большого расстояния между ними. Видно также, что полученные текущие спектры значительно различаются. Подъемы энергии колебаний с течением времени в Курильске наблюдаются значительно чаще. Очевидно, что это происходит из-за более частых штормов в районе Курильска, а район Охотского с запада прикрывает большой остров.

Для пункта измерений в с. Охотское подъемы энергии на коротких периодах происходят реже и наблюдаются для зыби с периодами около 12 с и волн с периодами приблизительно 47 с, которые, вероятнее всего, относятся к инфрагравитационным (ИГ) волнам еще и потому, что их энергия возрастает исключительно во время штормов. Подъемы энергии колебаний уровня с периодами около 10 мин определяются краевыми и лики-волнами [Kovalev, Squire, 2020; Kovalev et al., 2020; Squire, 2021].

Таблица. Периоды (ч) пиков в спектрах, превышающие 95%-й доверительный интервал

Table. Periods (h) of peaks in the spectra exceeding the 95% confidence interval

	$M_1$	$M_2$	$MK_3$	$S_4$	$3KM_5$	$M_6$	$2M2NK_9$
Период гармоник	24.84	12.42	8.17	6.00	4.85	4.14	2.77
Охотское	24.75	12.37	8.17	6.00	4.83	4.12	2.80
Курильск	24.75	12.37	8.17	6.00	4.83	4.12	2.80

Ситуация с волнением на коротких периодах в районе Курильска значительно сложнее. Увеличение энергии волнения в шторм здесь наблюдается и для ветровых волн с периодами от 5 с, и на периодах волн зыби до 12 с. Хорошо видны подъемы энергии, особенно в шторм, на периодах ИГ волн – 25 и 45 с.

Также в текущем спектре для пункта измерений в Курильске выделяются подъемы энергии на периодах 4.5, 6.77, 8.73, 11.22, 19.7 мин и слабый пик на 29.5 мин. Проведенный по формуле Мериана (1) расчет показал, что периоды сейш для акваторий Курильского и Куйбышевского заливов и для их общей акватории между мысом Пржевальского и п-овом Чирип близки к периодам наблюдаемых пиков в спектрах уровня от 4.5 до 29.5 мин. Таким образом, можно заключить, что наблюдаемые волновые процессы являются сейшами прибрежной к Курильску акватории и отражают особенности прибрежного рельефа и батиметрии. При этом наибольшей добротностью обладает резонансная акватория для периодов 4.5 мин. Колебания с таким периодом могут генерироваться в обоих рассматриваемых заливах, и, вероятно, поэтому резонансные особенности на периоде 4.5 мин наиболее выражены. Возможность связи резонанса двух заливов, по видимому, подтверждает диапазон периодов – от 3.8 до 5 мин в нижней части пика на спектре.

Поскольку основной характеристикой прибрежной акватории, показывающей возможность усиления приходящих в нее волн с периодом, близким к резонансному, является добротность, был выполнен ее расчет для резонансной акватории вблизи Курильска с использованием полученных спектров, основываясь на том, что добротность определяет относительную величину резонансного максимума в энергетическом спектре колебаний [Зернов, Карпов, 1972] и если система обладает достаточно высокой добротностью, то она определяется выражением

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega, \quad (3)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота системы (резонансного максимума),  $\Delta\omega$  – ширина максимума, а  $Q$  – его добротность.

При этом ширина максимума определяется как полоса частот, в пределах которой энергия колебаний уменьшается в 2 раза [Зернов, Карпов, 1972]. Расчет показал, что значение добротности рассматриваемой резонансной акватории равно 10.2.

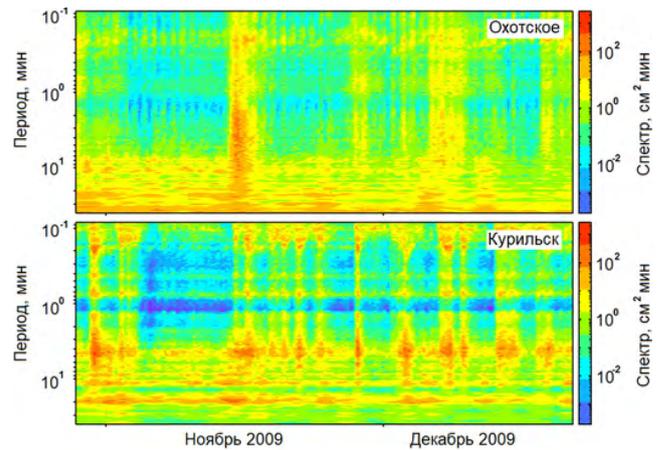


Рис. 4. Текущие спектры колебаний уровня для периодов диапазона 5 с – 40 мин.

Fig. 4. Current spectra of level fluctuations for 5 s – 40 min periods range.

Максимальное (резонансное) значение амплитуды вынужденных колебаний можно определить из выражения [Зернов, Карпов, 1972]

$$A_{рез} = A_{вн} \omega_0^2 / 2\delta \sqrt{(\omega_0^2 - \delta^2)}, \quad (4)$$

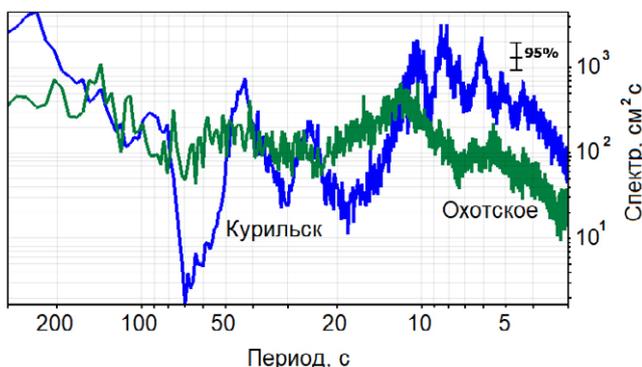
где  $\delta$  – коэффициент затухания ( $\delta = \omega_0 / 2 Q$ ),  $\omega_0$  – резонансная частота системы,  $A_{вн}$  – амплитуда приходящей волны. Расчет показывает, что приходящая в резонансную акваторию волна может максимально увеличиться примерно в 10 раз.

Согласно выводам работы [Рабинович, 1993], на периодах 0.5–6 мин, а иногда и до 20 мин возможно развитие явления тягуна. Оно вызывает сильные возвратно-поступательные движения воды, которые в свою очередь могут приводить к подвижке и повреждению судов, обрыву якорей и швартовых. Учитывая то, что рассматриваемый нами период 4.5 мин относится к диапазону периодов существования тягуна, а также высокую добротность резонансной акватории, судам, стоящим на рейде в Курильском и Куйбышевском заливах, можно ожидать воздействия этого явления при значительном волнении на море.

Отметим одну яркую особенность текущего спектра коротких волн (рис. 4), рассчитанного по наблюдениям вблизи Курильска, которая ранее нами не отмечалась. Хорошо видно значительное понижение энергии колебаний в полосе периодов от 53 до 77 с с хорошо выраженными краями. Эта полоса периодов располагается на низкочастотной границе диапазона существования ИГ волн, которые, как известно, образуются в результате нелинейного взаимодействия волн зыби.

Как показали рассчитанные спектры для синхронного времени измерения, представленные на рис. 5, колебания уровня в диапазоне волн зыби для Курильска отличаются от обычно регистрируемых, например, в Охотском наличием двух значимых пиков на периодах около 8.4 и 10.4 с. Третий пик на 6.1 с и другие на более коротких периодах относятся, скорее, к ветровым волнам. В диапазоне ИГ волн присутствуют только два пика на периодах 24.8 и 43.4 с и «провал» с минимумом на 70 с, который виден на текущем спектре. В то же время спектр по измерениям вблизи Охотского (рис. 5) содержит только один широкий подъем энергии в диапазоне волн зыби с центром на 11.8 с и множественными узкополосными волнами в диапазоне зыби, взаимодействие которых также создает большое число волн в диапазоне ИГ волн, близких по величине к 95%-му доверительному интервалу и заполняющих полосу периодов вблизи 70 с. Хотя некоторое понижение уровня энергии на периодах около 70 с в нем также наблюдается, но оно не такое значительное, как для Курильска.

Анализ показал, что комбинационные гармоники волн зыби вблизи Курильска позволяют получить периоды 22.3 и 43.7 с, т.е. близкие к наблюдаемым пикам ИГ волн. Однако более длинные периоды из их комбинации получить невозможно, и только предполагаемое взаимодействие самих ИГ волн дает период 82.2 с, т.е. значительно больший, чем период наблюдаемого провала. И, видимо, такая ситуация и создает провал в спектре по измерениям вблизи Курильска. А двухпиковый спектр волн зыби связан, по-видимому, со сложной батиметрией в районе Курильска в отличие от почти прямолинейного уклона дна в районе Охотского.



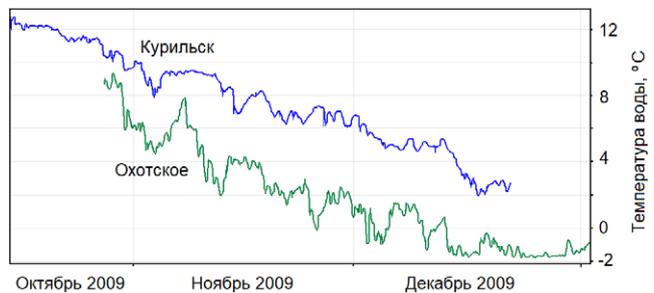
**Рис. 5.** Спектры колебаний уровня моря для диапазона волн зыби и инфрагравитационных волн.

**Fig. 5.** Spectra of sea level fluctuations for swell and infragravity waves range.

#### 4. Колебания температуры морской воды

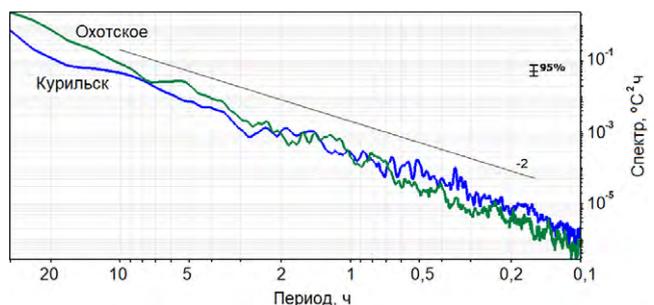
Поскольку приборы, регистрирующие волнение на море, одновременно записывали и температуру воды, представляет интерес рассмотреть полученные ряды колебаний температуры в связи с возможностью проявления внутренних волн, которые оказывают значительное влияние на перемешивание вод. При этом во время синхронных наблюдений температура опускалась в Охотском с 9 °С до почти -2 °С, а в Курильске с 13 до 2 °С. Временной ход температуры воды показан на рис. 6. Также отметим, что поскольку Охотское море, в том числе и рассматриваемая здесь акватория, в зимний период большей частью покрыто льдом [Люция Охотского моря, 2011], то сравнивать температурные параметры будем с арктическими морями.

Для синхронного участка измерений температуры были рассчитаны спектры колебаний температуры и взаимно-спектральные характеристики – когерентность и фаза для разных диапазонов периодов колебаний. Все они показали, что связь между колебаниями температуры для всех периодов между пунктами наблюдений не отмечается. Также, судя по рассчитанным спектрам, колебания температуры с периодами короче примерно 6 мин носят шумовой характер и интереса не представляют. Для периодов длиннее 6 мин полученные спектры приведены на рис. 7.



**Рис. 6.** Временной ход температуры в пунктах наблюдения Охотское и Курильск.

**Fig. 6.** The time series of temperature in the Okhotskoye village and Kurilsk observations points.



**Рис. 7.** Спектр колебаний температуры морской воды.

**Fig. 7.** Spectrum of sea water temperature fluctuations.

Как видно из спектров, колебания температуры с приливными периодами отсутствуют. Это достаточно странно, поскольку обычно поперечные изобатные баротропные приливные течения генерируют внутренние приливы [Colosi, 2001]. Возможно, это связано с тем, что их величина в рассматриваемой акватории мала. Пики в спектрах температуры в основном присутствуют на периодах от 10 мин до 2.5 ч, причем в спектре, полученном по регистрации в районе Курильска, их больше. Однако все они лишь незначительно превышают 95%-й доверительный интервал, и существенно выраженных внутренних волн не обнаруживается. Для периодов короче 5 мин спектры не содержат пиков выше доверительного интервала, похожи на спектр шума и закон их спада близок к степени  $-3$ . Заметим, что такой закон спада спектра в работе [Levine et al., 1985] отмечается для внутренних волн с периодами короче 1 ч.

Пики в спектре записи в Курильске, превышающие доверительный интервал, проявляются на периодах 6.8, 18.9, 19.9, 20.9, 30.5, 33.4, 39.4, 80.7, 105.1, 131.2 и 195.3 мин. Закон спада этого спектра близок к степени  $-2$ . Таков же закон спада спектра внутренних волн для периодов от 1 до 10 ч по данным работы [Levine et al., 1985]. В спектре Охотского пика на периодах 9.9, 11.6, 22.8, 39.7, 80.0 и 88.4 мин. Однако спектр в этом случае спадает несколько круче, чем спектр Курильска. Из сравнения периодов пиков видно отсутствие их на совпадающих периодах между Курильском и Охотским, и можно заключить, что внутренние волны обусловлены местными для каждой прилегающей акватории особенностями батиметрии и рельефа прибрежной зоны.

Причины генерации наблюдаемых внутренних волн могут быть различными. Так, например, авторы [Zakharchuk, Darelius, 2009] полагают, что длинные гравитационные волны и шельфовые волны, которые существуют в виде вихрей [Darelius, 2009], в результате взаимодействия с островами, прибрежным рельефом и континентальным склоном могут породить более короткие волновые процессы. В работе [Darelius, 2009] называется и другая причина генерации внутренних волн, а именно бароклинная неустойчивость. К сожалению, такие механизмы еще мало изучены и в настоящее время представляется затруднительным объяснить генерацию внутренних волн с периодами в несколько часов, которую мы наблюдаем.

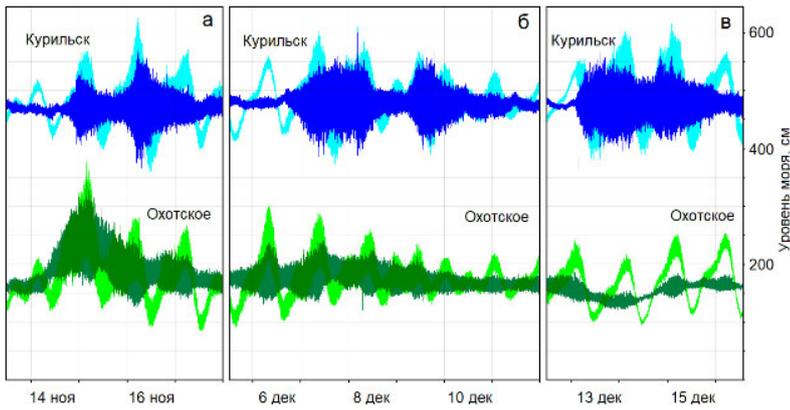
Заметим, что генерация короткопериодных, с минутными периодами внутренних волн приливных течений, протекающих по мелководным берегам в теплое время года, при благоприятствовании топографических характеристик шельфа, была отмечена во многих других морях с определенными батиметрическими особенностями шельфа [Colosi, 2001; Duda, 2004; Lee, 1974].

Авторы настоящей работы допускают и другую, скорее совместную с рассмотренными выше, возможность генерации короткопериодных внутренних волн открытого моря – циркуляцией Ленгмюра [Polton, 2008] над стратифицированной водой. При этом равномерное поверхностное ветровое напряжение и параллельное воздействие дрейфовой волны Стокса быстро создают турбулентный смешанный поток, который (поскольку инерционное движение отклоняется от ветра) генерирует высокочастотные внутренние волны в стратифицированной ниже жидкости. Такой вывод авторами сделан на основании сравнений диапазона периодов внутренних волн 2–20 мин, рассматриваемых в работе [Zakharchuk, 1985], и реально наблюдаемых периодов колебаний по нашим данным от единиц минут до 1 ч.

##### **5. Воздействие метеоусловий на волнение**

Представляет интерес проанализировать метеорологические условия над юго-восточной частью Охотского моря с целью определения факторов, влияющих на волнение в районах рассматриваемых пунктов наблюдения и по трассе с. Охотское – Курильск. Дело в том, что штормовое волнение не всегда одновременно присутствует в обоих пунктах наблюдения. Были выделены три синхронные ситуации волнения в с. Охотское и Курильске. Первая, когда штормовое волнение есть в районе обоих пунктов, но в Охотском волны выше и шторм начинается примерно на половину суток раньше (рис. 8 а), вторая, когда шторм есть и в Охотском, и Курильске (рис. 8 б), и третья, при которой шторм в Курильске, а в Охотском небольшое волнение (рис. 8 в). Ситуация, обратная третьей, когда в Охотском шторм, а в Курильске его нет, не наблюдалась. И ситуация с отсутствием штормов в обоих пунктах не рассматривалась из-за очевидности спокойной погоды во всем регионе.

Были проанализированы синоптические ситуации, соответствующие рассматриваемым фрагментам временных рядов.

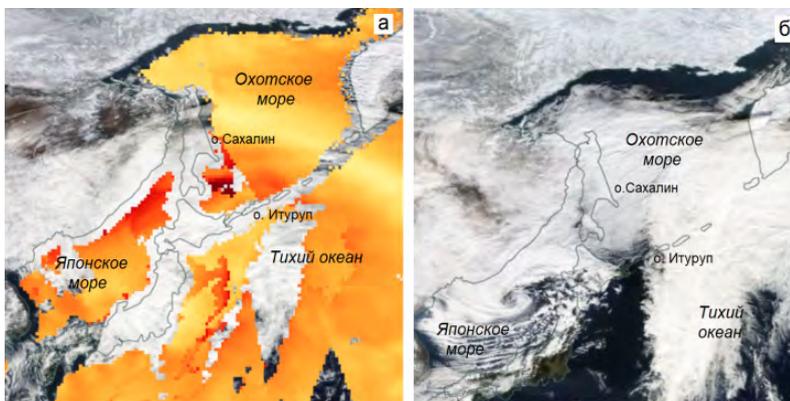


**Рис. 8.** Фрагменты временных рядов колебаний уровня моря. Светлым тоном показаны фрагменты зарегистрированных временных рядов колебаний уровня, а темным – фрагменты с вычтенным предвычисленным приливом. Пояснения см. в тексте.

**Fig. 8.** Fragments of time series of sea level fluctuations. Fragments of the recorded time series of level fluctuations are shown in a light tone, and fragments with the subtracted precalculated tide are shown in a dark tone. See the text for explanations.

В первой ситуации (рис. 8 а, 9 а) 14 ноября 2009 г. область сильных ветров со скоростями более 30 м/с располагалась вблизи о. Сахалин близко к его южной оконечности. При этом над акваторией в районе Курильска скорость ветра составляла 10.8–11.1 м/с. Такое поле ветра в рассматриваемой части Охотского моря создавал перемещающийся с юга Японского моря вдоль азиатского континента циклон, центр которого 15 ноября находился в центре Японского моря (рис. 9 б). Но, несмотря на штормовое волнение в южной части Охотского с высотой волн до 2 м, скорость ветра у восточного побережья о. Итуруп не превышала 8.1 м/с.

Во второй ситуации (рис. 8 б) поле сильных ветров со скоростями ветра 21.0–21.3 м/с располагалось между островами Сахалин и Итуруп (рис. 10 а). Это поле ветров определял ци-



**Рис. 9.** Карта поверхностного ветра (а) за 14 ноября 2009 г. и карта облачности (б) за 15 ноября 2009 г. (по данным <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

**Fig. 9.** Surface wind map (a) for November 14, 2009, and cloud cover map (b) for November 15, 2009. (date from <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

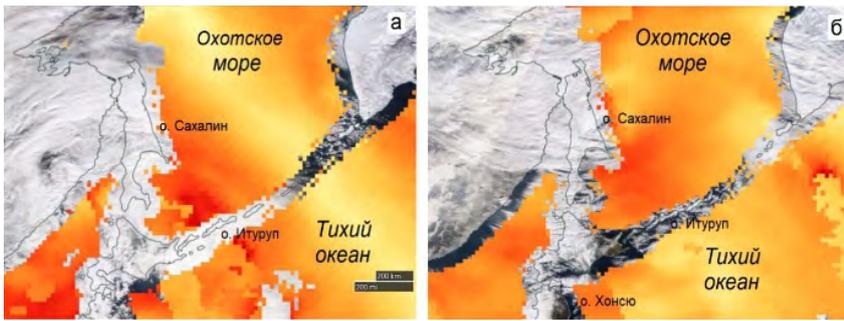
клон, центр которого перемещался с юга в северо-восточном направлении над Тихим океаном вдоль Японских островов. При этом, судя по карте поверхностного ветра и наблюдаемым колебаниям уровня моря, штормовое волнение в Курильске достигало 1.5 м и присутствовало на всей акватории по трассе о. Сахалин – о. Итуруп.

В третьей ситуации (рис. 8 в) 12 декабря 2009 г. центр одного циклона располагался в Тихом океане на широте середины о. Хонсю на расстоянии от него примерно в 300 км и смещался на северо-восток, а 13 декабря – в Тихом океане на широте северной оконечности о. Хонсю на расстоянии от него около 1000 км. Но этот циклон сопровождался слабым волнением

в районе юга о. Сахалин. Второй циклон двигался с северо-запада и к 14 декабря подошел уже к мысу Терпения о. Сахалин. За время своего перемещения он сопровождался ветрами западного направления у о. Итуруп со скоростями 12.6–12.9 м/с и вызвал шторм в южной части Охотского моря с высотой волн до 1.7 м, начавшийся в Курильске 13 декабря и продолжавшийся до конца суток 15 декабря. Отметим, что при этом скорость ветра у восточного побережья о. Итуруп не превышала 8.4 м/с.

В то же время о. Сахалин прикрывал от ветров западного направления, сопровождающих второй циклон, свою прибрежную юго-восточную часть, и поэтому на карте ветров (рис. 10 б) вдоль побережья острова на расстоянии примерно до 10 км от берега скорость ветра была 11.1–11.4 м/с, а на расстоянии 50 м от берега с. Охотское, где располагался прибор, наблюдалось слабое волнение с высотой волн 10–30 см.

Из рассмотренных синоптических ситуаций можно сделать вывод, что практически любой циклон любого направления, подходящий к южной части Охотского моря, вызывает там и у берегов о. Итуруп волнение с высотами волн более 1.7 м. Но если циклон подходит к о. Сахалин с северо-западного направления, то высота волн в юго-восточной прибрежной полосе не превышает 30 см. При этом возможны работа рыбаков в прибрежной зоне и погрузо-разгрузочные работы порта Корсаков, а также укрытие судов.



**Рис. 10.** Карты поверхностного ветра за 6 декабря 2009 г. (а) и 14 декабря 2009 г. (б) (по данным <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

**Fig. 10.** Surface wind maps for December 6, 2009 (a) and December 14, 2009 (b) (date from <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

### Заключение

Проведено детальное изучение волнения в южной части Охотского моря между островами Сахалин и Итуруп с использованием синхронных записей колебаний уровня моря – волнения и температуры морской воды с использованием автономных регистраторов волнения АРВ-К12, осуществляющих запись с секундной дискретностью. Приборы установлены вблизи с. Охотское (о. Сахалин) и Курильск (о. Итуруп).

Анализ приливного режима южной части Охотского моря показал, что длинные волны с периодами приливных гармоник от 2.8 ч и больше имеют практически одинаковую фазу колебаний у обоих островов и поэтому следует ожидать максимальной и минимальных вод одновременно в прибрежной зоне обоих островов.

Выявленные поверхностные гравитационные волны, предположительно приливной гармоникой, с периодом около 2.8 ч, которые присутствуют в обоих пунктах наблюдения, были проверены на возможную их принадлежность к сейшам. С помощью формулы Мериана показано, что данные волны могут являться и первой модой сейшевых колебаний южной части Охотского моря – полуоткрытой резонансной акватории, ограниченной островами Сахалин, Хоккайдо, Кунашир и Итуруп.

С использованием приближенной модели линейного профиля наклона морского дна в районе с. Охотское и формулы Du Bois установлено, что обнаруженные вблизи о. Сахалин колебания с периодом 2.32 ч являются шельфовыми сейшами.

Проведенный анализ короткопериодных колебаний – от 3 с до 1 ч – для прибрежной акватории вблизи Курильска показал, что хорошо выделяющиеся в спектрах колебаний подъемы энергии, особенно в шторм на периодах волн, приблизительно равных 25 и 45 с,

связаны с инфрагравитационными волнами. Пики с минутными периодами обусловлены сейшевыми колебаниями для резонансных акваторий Курильского и Куйбышевского заливов и для их общей акватории между мысом Пржевальского и п-овом Чирип.

Установлено, что наибольшей добротностью обладает резонансная акватория для периодов 4.5 мин в районе Курильска. Колебания с таким периодом могут генерироваться

в обоих рассматриваемых заливах – Курильском и Куйбышевском, и, видимо, поэтому резонансные особенности на периоде 4.5 мин наиболее выражены. Поскольку рассматриваемый период 4.5 мин относится к диапазону периодов существования тягуна, а также учитывая высокую добротность резонансной акватории, можно ожидать воздействия этого явления на суда при значительном волнении на море и связанную с этим опасность для судов, стоящих в это время на рейде в Курильском и Куйбышевском заливах.

По рассчитанным спектрам колебаний уровня отмечена особенность волнения в диапазоне волн зыби для Курильска, которая характеризуется наличием двух значимых пиков на периодах около 8.4 и 10.4 с и отличается от обычных и часто наблюдаемых спектров, например, в Охотском. Такое волнение с двумя выраженными периодами может являться причиной «провала» в спектре на периодах около 70 с.

Анализ колебаний температуры воды показал, что пики в спектрах температуры в основном присутствуют на периодах от 10 мин до 2.5 ч, причем в спектре, полученном по регистрации в районе Курильска, их больше. Установлено также отсутствие колебаний с приливными периодами. Авторы настоящей работы допускают совместную с рассмотренными ранее возможность генерации короткопериодных внутренних волн открытого моря циркуляцией Ленгмюра над стратифицированной водой.

Исходя из особенностей режима волнения и метеоусловий в южной части Охотского моря, различные пути подхода циклона к исследуемым акваториям вызывают различный отклик в этих акваториях, от опасного волнения с условием прекращения работ до незначительного волнения, при котором возможна работа рыбаков в прибрежной зоне и проведение погрузо-разгрузочных работ.

## Список литературы

1. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. **1982.** *Моря СССР*. М.: Изд-во МГУ, 192 с.
2. Зернов Н.В., Карпов В.Г. **1972.** *Теория радиотехнических цепей*. Л.: Энергия, 816 с.
3. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. **1963.** *Теоретическая гидромеханика*. Ч. 1. Изд. 6. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 583 с.
4. *Лотсия Охотского моря*. **2011.** Книга 1406, вып. 1, 57 с. URL: <http://parusa.narod.ru/bib/books/fareast/1406-1.htm>
5. Рабинович А.Б. **1993.** *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. Л.: Гидрометеиздат, 325 с.
6. Райхлен Ф. **1970.** Резонанс гавани. В кн.: *Гидродинамика береговой зоны и эстуариев*: пер. с англ. Л.: С. 114–166.
7. Colosi J.A., Beardsley R.C., Lynch J.F., Gawarkiewicz G., Chiu C.S., Scotti A. **2001.** Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer shelf break primer study. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5): 9587–9601. <https://doi.org/10.1029/2000jc900124>
8. Darelius E., Smedsrud L.H., Osterhus S., Foldvik A., Gammelsrod T. **2009.** Structure and variability of the Filchner overflow plume. *Tellus A*, 61(3): 446–464. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00391.x>
9. Duda T.F., Lynch J.F., Irish J.D., Beardsley R.C., Ramp S.R., Chiu C.S., Tang T.Y., Yang Y.-J. **2004.** Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 29(4): 1105–1130. <https://doi.org/10.1109/joe.2004.836998>
10. Giese G.S., Hollander R.B. **1987.** The relationship between coastal seiches at Palawan Island and tide-generated internal waves in the Sulu Sea. *J. Geophysical Research: Oceans*, 92: 5151–5156. <https://doi.org/10.1029/jc092ic05p05151>
11. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Squire V.A. **2020.** Crack formation and breakout of shore fast sea ice in Mordvinova Bay, south-east Sakhalin Island. *Cold Regions Science and Technology*, 175: 103082. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103082>
12. Kovalev P.D., Squire V.A. **2020.** Ocean wave/sea ice interactions in the south-eastern coastal zone of Sakhalin Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 238: 106725. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106725>
13. Lee C.Y., Beardsley R.C. **1974.** Generation of long nonlinear internal waves in a weakly stratified shear-flow. *J. of Geophysical Research*, 79(3): 453–462. <https://doi.org/10.1029/jc079i003p00453>
14. Levine M.D., Paulson C.A., Morison J.H. **1985.** Internal waves in the Arctic Ocean – Comparison with lower-latitude observations. *J. of Physical Oceanography*, 15: 800–809. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<0800:iwitao>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<0800:iwitao>2.0.co;2)
15. Parker B.B. **2007.** *Tidal analysis and prediction*. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3, 378 p.
16. Polton J.A., Smith J.A., MacKinnon J.A., Tejada-Martinez A.E. **2008.** Rapid generation of high-frequency internal waves beneath a wind and wave forced oceanic surface mixed layer. *Geophysical Research Letters*, 35(13602): 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008gl033856>
17. Rabinovich A.B. **2009.** Seiches and harbour oscillations. In: Kim Y.C. (ed.) *Handbook of coastal and ocean engineering*. Singapore: World Scientific, p. 193–236. doi:10.1142/9789812819307\_0009
18. Squire V.A., Kovalev P.D., Kovalev D.P., Zarochintsev V.S. **2021.** On the trapping of energy from storm surges on the coasts of the Sea of Okhotsk. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 250: 107136. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107136>
19. Zakharchuk E.A. **1999.** Internal waves in the Laptev Sea. In: *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic Dynamics and History*. Springer, p. 43–51. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60134-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60134-7_5)

## References

1. Dobrovolskiy A.D., Zalugin B.S. **1982.** *Morya SSSR [Seas of the USSR]*. M.: MGU Publ., 192 p.
2. Zernov N.V., Karpov V.G. **1972.** *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey [Theory of radioelectric circuits]*. Leningrad: Energiya, 816 p.
3. Kochin N.E., Kibel I.A., Roze N.V. **1963.** *Teoreticheskaya gidromekhanika [Theoretical hydromechanics]*. Pt 1. 6<sup>th</sup> ed. Moscow: Gos. izd-vo fiz.-mat. lit., 583 p.
4. *Lotsiya Okhotskogo morya [Sailing directions of Sea of Okhotsk]*. **2011.** Книга 1406, Iss. 1, 57 p. URL: <http://parusa.narod.ru/bib/books/fareast/1406-1.htm>
5. Rabinovich A.B. **1993.** *Dlinnye gravitatsionnye volny v okeane: zakhvat, rezonans, izluchenie [Long ocean gravity waves: Trapping, resonance, and leaking]*. Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 325 p.
6. Raykhlen F. **1970.** [Harbor resonance]. In: *Gidrodinamika beregovoy zony i estuariyev*. Leningrad, p. 114–166. (Transl. from English: A.T. Ippen (ed.). *Estuary and coastline hydrodynamics*. New York: McGraw-Hill Comp., 1966).

7. Colosi J.A., Beardsley R.C., Lynch J.F., Gawarkiewicz G., Chiu C.S., Scotti A. **2001**. Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer shelf break primer study. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 106(C5): 9587–9601. <https://doi.org/10.1029/2000jc900124>
8. Darelus E., Smedsrud L.H., Osterhus S., Foldvik A., Gammelsrod T. **2009**. Structure and variability of the Filchner overflow plume. *Tellus A*, 61(3): 446–464. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00391.x>
9. Duda T.F., Lynch J.F., Irish J.D., Beardsley R.C., Ramp S.R., Chiu C.S., Tang T.Y., Yang Y.-J. **2004**. Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the northern South China Sea. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 29(4): 1105–1130. <https://doi.org/10.1109/joe.2004.836998>
10. Giese G.S., Hollander R.B. **1987**. The relationship between coastal seiches at Palawan Island and tide-generated internal waves in the Sulu Sea. *J. Geophysical Research: Oceans*, 92: 5151–5156. <https://doi.org/10.1029/jc092ic05p05151>
11. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Squire V.A. **2020**. Crack formation and breakout of shore fast sea ice in Mordvinova Bay, south-east Sakhalin Island. *Cold Regions Science and Technology*, 175: 103082. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103082>
12. Kovalev P.D., Squire V.A. **2020**. Ocean wave/sea ice interactions in the south-eastern coastal zone of Sakhalin Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 238: 106725. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106725>
13. Lee C.Y., Beardsley R.C. **1974**. Generation of long nonlinear internal waves in a weakly stratified shear-flow. *J. of Geophysical Research*, 79(3): 453–462. <https://doi.org/10.1029/jc079i003p00453>
14. Levine M.D., Paulson C.A., Morison J.H. **1985**. Internal waves in the Arctic Ocean – Comparison with lower-latitude observations. *J. of Physical Oceanography*, 15: 800–809. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<0800:iwitao>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<0800:iwitao>2.0.co;2)
15. Parker B.B. **2007**. *Tidal analysis and prediction*. NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3, 378 p.
16. Polton J.A., Smith J.A., MacKinnon J.A., Tejada-Martinez A.E. **2008**. Rapid generation of high-frequency internal waves beneath a wind and wave forced oceanic surface mixed layer. *Geophysical Research Letters*, 35(13602): 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008gl033856>
17. Rabinovich A.B. **2009**. Seiches and harbour oscillations. In: Kim Y.C. (ed.) *Handbook of coastal and ocean engineering*. Singapore: World Scientific, p. 193–236. doi:10.1142/9789812819307\_0009
18. Squire V.A., Kovalev P.D., Kovalev D.P., Zarochintsev V.S. **2021**. On the trapping of energy from storm surges on the coasts of the Sea of Okhotsk. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 250: 107136. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.107136>
19. Zakharchuk E.A. **1999**. Internal waves in the Laptev Sea. In: *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic Dynamics and History*. Springer, p. 43–51.

## Об авторах

КОВАЛЕВ Дмитрий Петрович (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [d.kovalev@imgg.ru](mailto:d.kovalev@imgg.ru)

КОВАЛЕВ Петр Дмитриевич (<https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [p.kovalev@imgg.ru](mailto:p.kovalev@imgg.ru)

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

КИРИЛЛОВ Константин Владиславович (<https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>), научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, [k.kirillov@imgg.ru](mailto:k.kirillov@imgg.ru)

## About the Authors

KOVALEV Dmitry P. (<https://orcid.org/0000-0002-5184-2350>), Doctor of Physics and Mathematics, Leader of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [d.kovalev@imgg.ru](mailto:d.kovalev@imgg.ru)

KOVALEV Petr D. (<https://orcid.org/0000-0002-7509-4107>), Doctor of Engineering, Leading Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [p.kovalev@imgg.ru](mailto:p.kovalev@imgg.ru)

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

KIRILLOV Konstantin V. (<https://orcid.org/0000-0002-0822-3060>), Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, [k.kirillov@imgg.ru](mailto:k.kirillov@imgg.ru)