

© Авторы, 2024 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2024.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК 551.465

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.3.201-211> (In English)
<https://www.elibrary.ru/lgdflz> (In English)
<http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-3-3.pdf>

Волны в морской акватории вблизи мыса Свободный (юго-восточная часть о. Сахалин)*

Д. П. Ковалев[@], П. Д. Ковалев, А. С. Борисов, К. В. Кириллов

^{@E-mail:} d.kovalev@imgg.ru

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

Резюме. Проведено исследование волновых процессов вблизи мыса Свободный на юго-восточном побережье о. Сахалин с использованием автономных регистраторов волнения и метеостанции. Анализ пятимесячных данных уровня моря и температуры, атмосферного давления и скорости ветра выявил, что в диапазоне периодов волн 2–600 с отсутствуют значительные пики для ветровых и инфрагравитационных (ИГ) волн, а энергия волн меньше в точке, защищенной мысом Свободный. Во время штормов наблюдается рост энергии ИГ-волн. Обнаружены волны с периодами 14.2 с, 3.62 мин и 8.85 мин, связанные с зыбью и излученными волнами, распространяющимися в сторону моря. Для объяснения коротких волн использована теория Лонге-Хиггинса и Стюарта, которая объясняет рассеяние зыби в зоне прибоя и образование свободных волн. С использованием формулы для стоячих волн проанализированы волны Пуанкаре. Моделирование волновых процессов, распространяющихся к берегу, показало наличие ИГ-волн с периодами 20–110 с и краевых волн с периодами 4.27–7.63 мин, подтвержденных дисперсионным соотношением для волн Стокса при плоском наклонном дне. Колебания температуры морской воды с высотой более 7 °С и периодами 3–100 мин влияют на распространение волн с периодами более 3 мин, разрушая краевые и излученные волны. Анализ характеристик ветрового волнения показал, что в диапазоне периодов 2–20 с отсутствуют значительные волновые процессы, включая ветровые волны. Максимальная высота волн наблюдалась при продолжительных южных ветрах, связанных с циклоном. Проведенное исследование важно для понимания волновых процессов в данной акватории, что помогает прогнозировать их поведение и влияние на береговую линию.

Ключевые слова: ветровые волны, краевые волны, излученные волны, инфрагравитационные волны, зыбь, внутренние волны

Waves in the marine area near Cape Svobodny (south-eastern part of Sakhalin Island)**

Dmitry P. Kovalev[@], Peter D. Kovalev, Aleksander S. Borisov, Konstantin V. Kirillov

^{@E-mail:} d.kovalev@imgg.ru

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

Abstract. A study of wave processes near Cape Svobodny on the south-eastern coast of the island Sakhalin using autonomous wave recorders and a weather station has been performed. Analysis of five-month data of sea level and temperature, atmospheric pressure and wind speed revealed that there are no significant peaks for wind and infragravity (IG) waves in the wave period range 2–600 s, and the wave energy is lower at the point protected by Cape Svobodny. During storms, there is an increase in the energy of IG waves. Waves detected at periods of 14.2 seconds, 3.62 minutes, and 8.85 minutes are related to swell and edge waves propagating seaward. For explanation of short waves, the Longuet-Higgins and Stewart theory was used which describes the dispersion of swell in the surf zone and the formation of free waves. Edge

* Перевод данной статьи на английский язык опубликован в журнале «Геосистемы переходных зон», 2024, т. 8, № 3, с. 201–211.
<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.3.201-211>; <https://www.elibrary.ru/lgdflz>

** Full text of this article in English published in the «Geosystems of Transition Zones» journal, issue 3, 2024, vol. 8, No. 3, pp. 201–211.
<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.3.201-211>; <https://www.elibrary.ru/lgdflz>

waves were analyzed using the Lamb model and the Bessel function of the first kind of zero order. Modelling of wave processes propagating shoreward revealed the presence of IG waves with periods of 20–110 seconds and edge waves with periods of 4.27–7.63 minutes, confirmed by the dispersion relation for Stokes waves on a sloping bottom. Sea water temperature fluctuations of more than 7 °C with periods of 3–100 minutes affect the propagation of waves with periods longer than 3 minutes, destroying the edge and leaky waves. Analysis of wind wave characteristics showed no significant wave processes, including wind waves, in the 2–20 second period range. The maximum wave height was observed during prolonged southern winds associated with a cyclone. This study is important for understanding wave processes in this area, aiding in predicting their behaviour and impact on the coastline.

Keywords: wind waves, edge waves, leaky waves, infragravity waves, swell, internal waves

Для цитирования: Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С., Кириллов К.В. Волны в морской акватории вблизи мыса Свободный (юго-восточная часть о. Сахалин). *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 3. [Electronic resource]. <http://journal.imgg.ru/web/full/f2024-3-3.pdf>

For citation: Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S., Kirillov K.V. Waves in the marine area near Cape Svobodny (southeastern part of Sakhalin Island). *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 3, pp. 201–211. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.3.201-211>; <https://www.elibrary.ru/lgdflz>

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ FWWM-2024-0002).

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the FEB RAS (No. FWWM-2024-0002).

Введение

Лаборатория волновой динамики и прибрежных течений Института морской геологии и геофизики ДВО РАН проводит экспериментальные исследования волновых процессов в прибрежной зоне Охотского моря вблизи мыса Свободный с целью изучения волн при прохождении над районом наблюдения циклонов. Несмотря на то что в прибрежной зоне обычно представляют интерес волны с периодами больше 15 с – инфрагравитационные, краевые, излученные и другие, было решено также изучить более короткие волны – ветровые и зыбь, которые определяют возможность работы маломерных судов и связаны с прибрежным рыболовством в этом районе.

Результаты исследований ветрового волнения и зыби изложены в многочисленных статьях и монографиях (например, [1–3]). Однако ветровое волнение у берега сильно зависит от батиметрических особенностей донного рельефа и аэрографических характеристик побережья, поэтому оно будет различным в каждой конкретной акватории. При изучении волнения в районе мыса Свободный, где в эксперименте устанавливались два донных регистратора волнения и метеостанция на краю мыса, появилась хорошая возможность более детально исследовать данные процессы.

Баротропные излученные волны в зоне шельфа могут существовать только на частотах выше инерционной. Образующиеся в открытом океане волны Свердрупа – прогрессивные волны, под совместным действием сил тяжести и вращения Земли, отражаясь от берега, образуют волны Пуанкаре, которые имеют прогрессивный характер в направлении вдоль берега и стоячий – поперек него [4]. При описании пограничных волн термины «волны Пуанкаре» и «излученные волны» обычно употребляются как синонимы [5].

Инфрагравитационным и краевым волнам также посвящена многочисленная научная литература [6–8]. Однако, так же как для ветровых волн, детальных исследований для акватории вблизи мыса Свободный не проводилось. Нами здесь изучались внутренние волны, и в 2021 г. в районе мыса были установлены два прибора АРВ 14К, которые измеряют колебания придонного гидростатического давления, которое впоследствии пересчитывается в уровень моря с учетом затухания коротких волн с глубиной, в колебания уровня моря (волнение). Измерители волнения изготавливаются в СКТБ «ЭлПА», г. Углич [<https://sktbelpa.ru>]. Основная приведенная погрешность измерений придонного давления составляет 0.06 %, а разрешающая способность ± 0.0008 % от верхнего предела измерения.

Измерения колебаний атмосферного давления и скорости ветра осуществлялось метеостанцией Vantage Pro2 Weather Station.

Задача исследования заключалась в детальном изучении различных типов волн, включая короткие ветровые волны и зыбь, а также более длинные инфрагравитационные и краевые волны, для оценки их влияния на прибрежные процессы и возможности эксплуатации маломерных судов. Актуальность исследования определяется необходимостью понимания специфики волновых процессов в данной акватории, что важно для прогнозирования их поведения и влияния на береговую линию, а также для поддержки прибрежного рыболовства и других видов деятельности.

Методика и данные наблюдений

Карта района проведения наблюдений – акватории зал. Мордвинова и мыса Свободный в южной части о. Сахалин, с расположением измерителей волнения, приведена на рис. 1. Донные регистраторы волнения АРВ 14К (диапазон измеряемого давления 0–20 м, погрешность $\pm 0.06\%$; разрешающая способность $\pm 0.0008\%$) были установлены на морском дне: прибор с заводским номером 149 на глубине около 14 м, а прибор с номером 150 – на глубине 12 м. Глубина установки приборов

соответствует уклону дна около 0.011. Расстояние между приборами 1.69 км. Оба прибора осуществляли запись колебаний уровня моря и температуры с секундной дискретностью. Метеостанция Vantage Pro2 Weather Station (диапазон измеряемого давления 880–1080 гПа, погрешность ± 0.5 гПа; диапазон измеряемой скорости ветра 0–67 м/с, погрешность ± 1 м/с) установлена на маяке мыса Свободный на высоте около 12 м над уровнем моря. Регистрация атмосферного давления и скорости ветра выполнялась с дискретностью 1 ч. Такая дискретность использовалась из-за ограниченного объема памяти и труднодоступности метеостанции.

Период проведения эксперимента: 9 июля – 31 декабря 2021 г. Период наблюдений охватывал летний и осенний сезоны с преобладанием южных ветров, связанных с прохождением циклонов, что приводило к значительным штормам.

Обработка данных – временных рядов колебаний уровня моря, включая спектральный и взаимно-спектральный анализ, выполнялась с помощью программы Кута [9, 10], которая была разработана для визуализации и анализа временных рядов большого объема. Эта программа использовалась для расчета спектрограмм колебаний уровня моря, анализа распре-

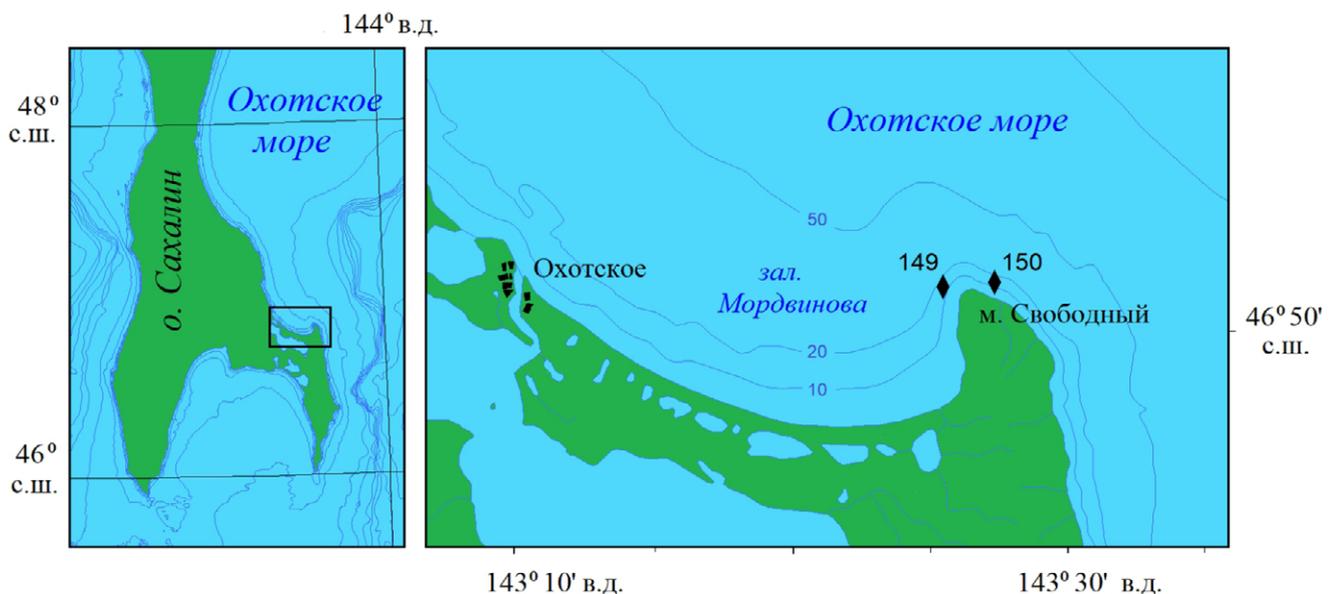


Рис. 1. Южная часть о. Сахалин с указанием района исследования (слева). Акватория зал. Мордвинова и мыс Свободный с точками расположения измерителей волнения и температуры.

Fig. 1. The southern part of Sakhalin Island indicates the research area (on the left). The water body of Mordvinova Bay and Cape Svobodnyy, with the locations of wave and temperature measuring devices.

деления энергии волн в различных диапазонах периодов и определения характеристик волновых процессов. Спектральный анализ данных позволил выделить основные типы волн, в частности инфрагравитационные, краевые и излученные. Для каждого типа волн был проведен детальный анализ, включая использование теоретических моделей, таких как модель Ламба и функции Бесселя, а также дисперсионное соотношение для волн Стокса при анализе краевых волн. Также была исследована взаимосвязь между колебаниями температуры морской воды и распространением волн с периодами более 3 мин, что позволило выявить влияние внутренних волн на краевые волны.

В результате наблюдений в течение 5 мес. в двух точках были получены записи колебаний уровня моря, атмосферного давления и скорости ветра. Фрагменты записей приведены на рис. 2.

На временных сериях колебаний уровня моря (рис. 2 а) выделяются приливные волны и несколько штормов, которые чаще наблюдались в осенние месяцы – сентябрь и октябрь. Наиболее сильный, при котором высота волн достигала 4 м, проходил в середине сентября. Обычно штормам, как видно из сравнения рис. 2 а и 2 с, сопутствуют сильные ветра северных направлений.

Анализ колебаний уровня моря

На рис. 3 а, б приведены рассчитанные с помощью программы Кума [9, 10] спектрограммы колебаний уровня моря в диапазоне периодов ветровых волн, зыби и ИГ-волн. Видно, что энергия ветровых волн и зыби не имеет резко выраженных максимумов и для прибора 149 она несколько ниже, чем для прибора 150. В диапазоне ИГ-волн с периодами от 20 до 250 с подъем энергии наблюдается во время штормов и без выраженной модовой структуры.

Поскольку, как показали предварительные расчеты, диаграммы спектральных плотностей не содержат ярко выраженных особенностей по сравнению с рассмотренными в ранее опубликованных работах, в настоящей статье рассчитывались диаграммы передаточной функции и фазы для пар приборов. Отметим, что зачастую для анализа временных рядов используется функция когерентности, которая в линейной системе указывает на причинно-следственную связь между двумя сигналами. В то же время, как следует из теории статистических выборок, оценки когерентности, помимо того что проявляют статистическую изменчивость, еще и смещены, а также существенно зависят от числа степеней свободы [11]. И предварительный анализ с применением функции когерентности показал значи-

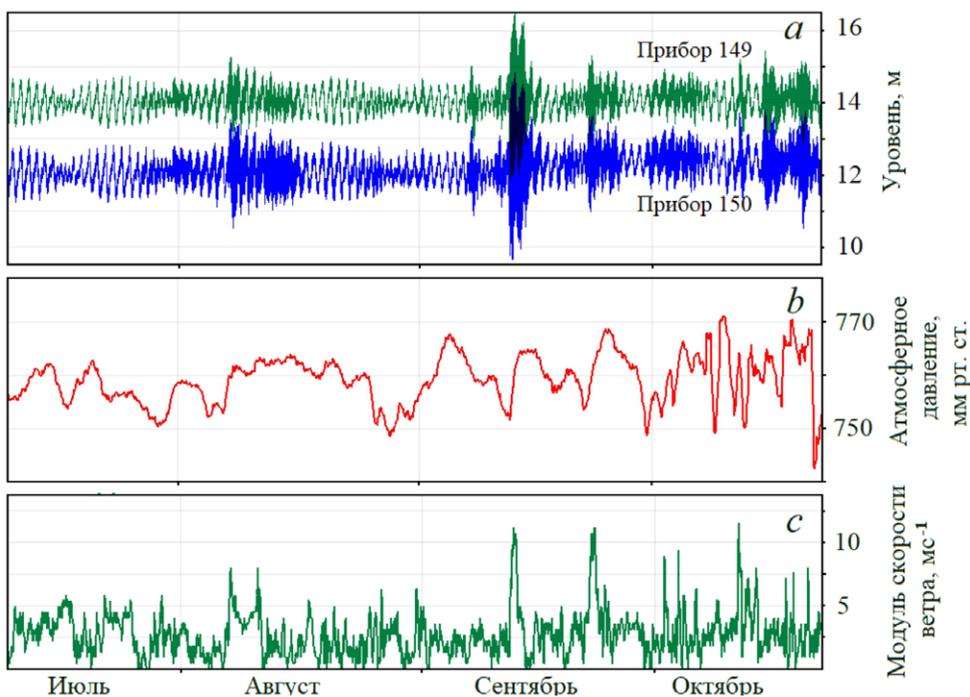


Рис. 2. Временной ход колебаний уровня моря (а), зарегистрированный приборами 149 и 150, колебаний атмосферного давления (б), модуля вектора скорости ветра (с), зарегистрированного метеостанцией Vantage Pro2 Weather Station в летне-осенний период 2021 г.

Fig. 2. Temporal variations in sea level fluctuations (a), recorded by devices 149 and 150; fluctuations in atmospheric pressure (b); and the wind velocity vector magnitude (c), recorded by the Vantage Pro2 Weather Station during the summer-autumn period of 2021.

тельное смещение оценок когерентности для рассматриваемого здесь диапазона периодов волновых процессов. Поэтому спектральный анализ проведен с использованием передаточной функции. И, как видно на рис. 3 с, d, диаграммы модулей передаточной функции оказались достаточно информативными.

В этой статье, в частности, рассчитывается график Боде, или функция частотного отклика, но будем использовать более общий термин – передаточная функция. Как показано в статьях [12, 13], передаточная функция обычно применяется для описания соотношений между двумя рядами, когда один ряд управляет другим. В таких случаях обычно вычисляют функцию усиления, или передаточную из взаимного спектра с использованием функции когерентности [14]. При этом, как показали предлагаемые исследования, передаточная функция $H(j\omega) = G(\omega)\phi(\omega) = |H(j\omega)| \arg(H(j\omega))$ позволяет выявить особенности анализируемых временных рядов. В этом выражении $G(\omega)$ – коэффициент усиления, который явля-

ется безразмерной величиной, а значения фазы $\phi(\omega)$ выражены в радианах между временными рядами пары приборов на каждой частоте.

Передаточная функция является комплексной функцией частоты $k(j\omega) = K(\omega)e^{-j(\omega)}$, она получила название передаточной функции оператора. Ее модуль $K(\omega)$ и аргумент $\phi(\omega)$ показывают, как изменяются амплитуда и фаза каждой гармонической составляющей спектра преобразуемой функции после действия на нее линейного оператора [15]. Модуль передаточной функции $K(\omega)$ в гармоническом анализе называют амплитудно-частотной, а аргумент $\phi(\omega)$ – фазочастотной характеристикой оператора.

Волны, распространяющиеся в открытое море

На диаграмме передаточной функции в направлении от прибора 149 к прибору 150 (рис. 3 с) – в сторону открытого моря выделяются полосы подъема энергии на периодах коротких ветровых волн 2-3 с, а также с пери-

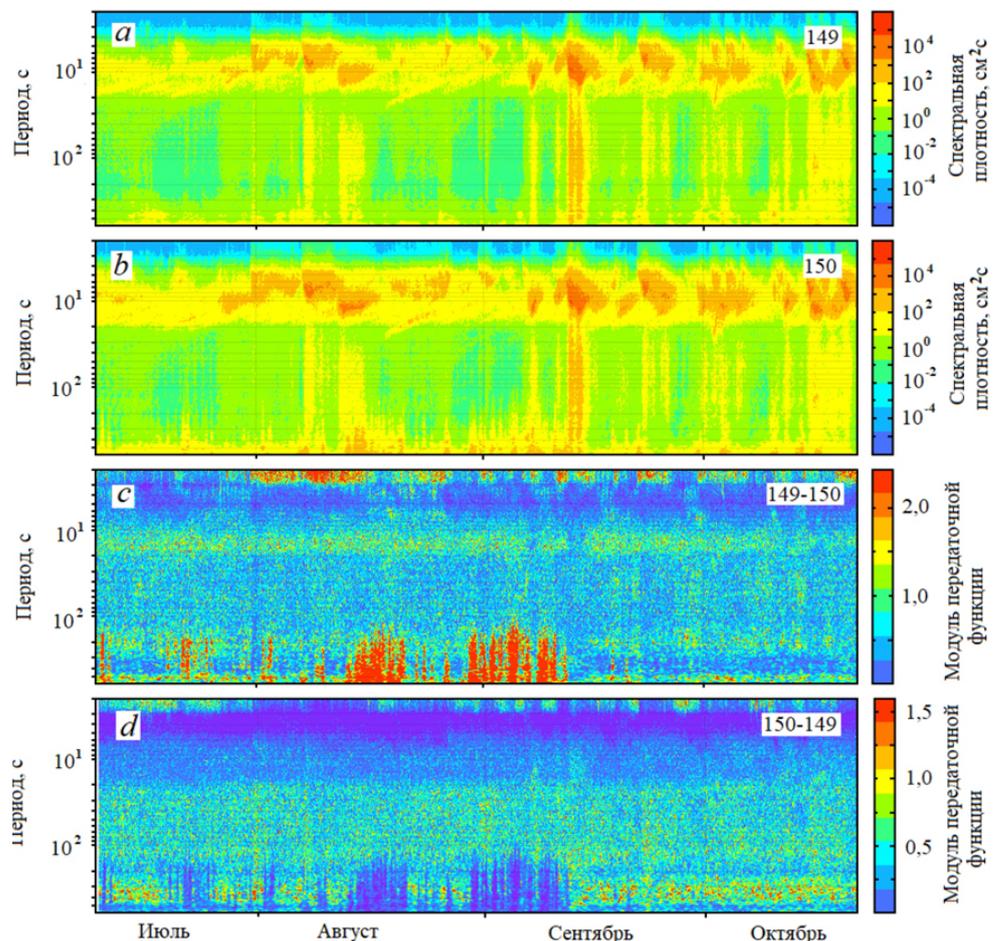


Рис. 3. Спектрограммы колебаний уровня моря (a, b) и диаграммы модулей передаточной функции (c, d)

Fig. 3. Spectrograms of sea level fluctuations (a, b) and magnitude diagrams of the transfer function (c, d).

одом около 14.2 с, которые являются волнами зыби. Кроме того, существуют колебания уровня моря с периодами 3.6 мин в диапазоне ИГ-волн – 0.3–7 мин [16] и немного выходящие за диапазон колебаний с периодом 8.8 мин. В работе [7] подтверждено предположение Лонге-Хиггинса и Стюарта, сделанное в 1962 г. [17], что, хотя падающая зыбь рассеивается в зоне прибоя на мелководье, связанные с ней вынужденные ИГ-волны второго порядка (возбуждаемые нелинейными разностно-частотными взаимодействиями пар компонентов зыби) высвобождаются в виде свободных волн, отражаются от берега и распространяются в сторону моря. При этом уменьшение энергии (за счет обмеления) уходящей свободной излученной волны приблизительно $h^{-1/2}$, и оно более постепенное, чем усиление приходящей вынужденной волны с h^{-5} [7]. Именно на эти излученные волны и указывают подъемы энергии волн на периодах 3.6 и 8.8 мин на рис. 3 с.

Другой причиной проявления волн с периодами 3.6 и 8.8 мин могут являться волны Пуанкаре. Наши промеры глубины эхолотом-картплоттером в районе наблюдений по линии, перпендикулярной линии, соединяющей приборы, показали, что на удалении от берега до 10 км профиль дна достаточно плоский и его можно аппроксимировать моделью с линейным уклоном $h(x) = \alpha x$, где h – глубина, $\alpha \approx 0.011$ – уклон дна и x – координата в направлении от берега. Математическое выражение для описания стоячих волн Пуанкаре над плоским наклонным дном дается функцией Бесселя первого рода нулевого порядка [18]:

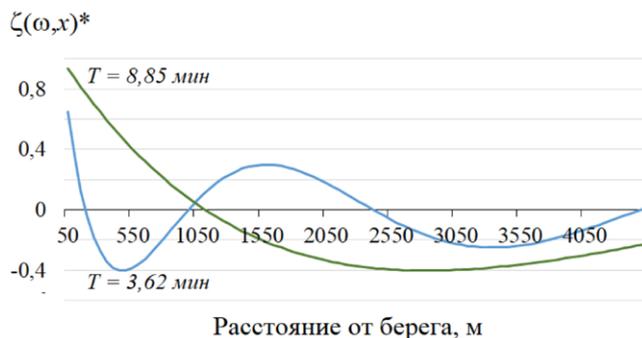


Рис. 4. Зависимость нормированной амплитуды стоячих волн $\zeta(\omega, x)^*$ с периодами 3.6 и 8.8 мин от расстояния от берега.

Fig. 4. The normalized standing wave amplitude $\zeta(\omega, x)^*$, with periods of 3.6 and 8.8 minutes, varies with distance from the shoreline.

$$\zeta(\omega, x) = \zeta_{\text{shore}} J_0(a\sqrt{x}), \text{ где } a = 2\omega/\sqrt{g\alpha} \quad (1)$$

Здесь g – ускорение, вызванное гравитацией, $\omega = 2\pi/\text{период}$ – радианная частота, ζ_{shore} – амплитуда у берега.

С использованием уравнения (1) были рассчитаны нормализованные высоты морской поверхности, как функции расстояния от берега x , для периодов стоячих волн 3.6 и 8.8 мин, определенным по диаграмме модуля передаточной функции, приведенного на рис. 3 с. Расчет показал возможность существования стоячих волн Пуанкаре с наблюдаемыми периодами. При этом на расстоянии от берега около 450 м, на котором были установлены приборы, наблюдаются амплитуды волн, близкие к максимальным, а поскольку эти стоячие волны имеют прогрессивный характер в направлении вдоль берега [4] – вдоль линии соединяющей приборы, то измерители будут регистрировать прогрессивные волны с рассматриваемыми периодами и направлением распространения, параллельным линии, соединяющей приборы, и, как показывают измерения, в сторону моря.

Волны, распространяющиеся вдоль берега

Диаграмма модуля передаточной функции для волн, распространяющихся в сторону берега (рис. 3 d), существенно отличается от предыдущей, с распространением от берега, за исключением энергии на периодах коротких ветровых волн 2-3 с. Выделяется широкая полоса периодов волн в диапазоне ИГ от 20 до 110 с, и резонно предположить, что эти волны и являются инфрагравитационными, учитывая их значительное усиление во время штормов (рис 3 а, b).

На рис. 3 d видна и более узкая полоса волн с большей энергией, с периодами от 4.27 до 7.63 мин. Можно предположить, что последние относятся к краевым волнам, возбуждаемым за счет энергии из двух источников. Во-первых, это ИГ-волны, распространяющиеся в сторону берега, и они, согласно многочисленным исследованиям, могут передавать свою энергию краевым волнам. Другим источником являются распространяющиеся в сторону моря свободные волны, которые могут от-

ражаться обратно к берегу от точки поворота на наклонном пляже или шельфе с образованием краевых волн, а часть в виде излученных волн уходит в океан [7]. Также были разработаны модели резонансного возбуждения краевых волн в результате нелинейного взаимодействия разностных частот пар компонентов волн наклонно падающей зыби [19].

Рассмотрим возможность генерации краевых волн с указанными выше периодами для конкретного профиля дна в районе мыса Свободный. Поскольку профиль дна на удалении от берега около 10 км достаточно плоский, то вдольбереговая структура краевых волн может быть описана с использованием дисперсионного соотношения для волн Стокса в приближении плоского наклонного дна [16]:

$$\omega_n^2 = gk \sin[(2n + 1)\beta], \quad (2)$$

где ω_n – частота моды n краевой волны, g – ускорение свободного падения, k – вдольбереговое волновое число, β – угол наклона дна.

Периоды генерации краевых волн ограничиваются величиной $T^2 = 2\pi\lambda/g$ ($k \geq \omega^2/g$ [20]), и при любом угле наклона дна β всегда существует ограниченное число мод краевых волн $n \leq \pi/4\beta - 1/2$ [16].

С использованием формулы (2) рассчитана дисперсионная диаграмма для первых трех мод краевых волн, показанная на рис. 5. На вертикальную ось нанесены метки, соответствующие обнаруженным периодам волн

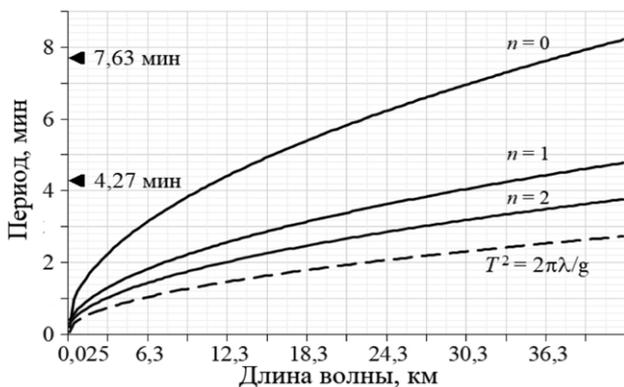


Рис. 5. Дисперсионная диаграмма краевых волн для трех мод. Отмечены периоды обнаруженных волн. Ниже кривой $T^2 = 2\pi\lambda/g$ расположен континуум волн Пуанкаре.

Fig. 5. Dispersion diagram of edge waves for three modes. Observed wave periods are marked with vertical lines. The poincare wave continuum lies below the $T^2 = 2\pi\lambda/g$ curve, which represents the dispersion relation for shallow water waves.

в диапазоне периодов ИГ-волн. Видно, что краевые волны с периодом 7.63 мин могут возбуждаться для нулевой моды, а с периодом 4.27 мин – еще и для первой моды. Таким образом, расчет показал, что в прибрежной зоне мыса Свободный возможно существование краевых волн на периодах обнаруженных подъемов энергии.

С использованием формулы, полученной Экартом [21] при решении уравнений движения для мелководья, рассчитаны поперечные к берегу профили краевых волн с периодами 4.27 и 7.63 мин мод в зависимости от расстояния от берега. Выражение для потенциала скорости имеет вид

$$\phi(x) = e^{-kx} L_n(2kx), \quad (3)$$

где x – расстояние от берега, k – волновое число, L_n – полином Лагерра. На рис. 6 приведены рассчитанные профили мод для краевых волн с периодами 4.27 и 7.63 мин. Видно, что поперечные к берегу профили для разных периодов имеют аналогичный характер, но моды с длинным периодом затухают при удалении от берега более медленно.

Выполненный анализ показал возможность генерации краевых волн с периодами 4.27 и 7.63 мин. Тем не менее, он не дает однозначного ответа на вопрос, принадлежат ли обнаруженные волны к типу краевых волн или к другому типу. При исследовании структуры волн, возбуждаемых вследствие передачи им

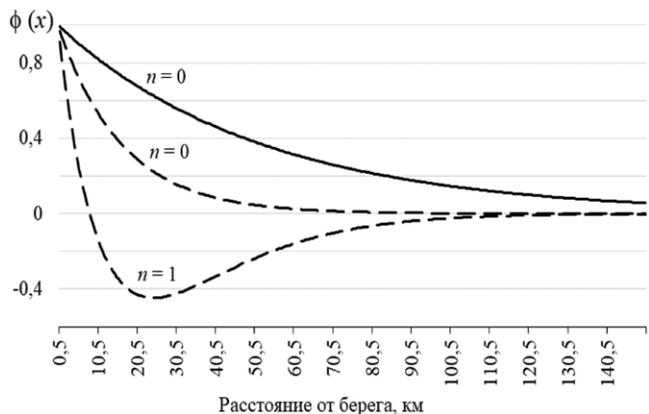


Рис. 6. Формы поперечного к берегу профиля краевых волн для моды волны с периодом 7.63 мин (сплошная линия) и волны с периодом 4.27 мин (штриховая линия)

Fig. 6. Cross-shore profile shapes for edge wave modes with periods of 7.63 minutes (solid line) and 4.27 minutes (dashed line).

энергии ИГ-волн, существует проблема из-за сходства мод краевых и излученных волн на небольших расстояниях от берега для случая плоского пляжа. В работе [20] приведен критерий $k = \geq \omega^2/g$, который разделяет области существования краевых волн с Пуанкаре и излученными волнами. В то же время возможно существование перечисленных волн с одинаковыми периодами, и различить их можно в случае проведения наблюдений двумя приборами по длине и направлению распространения, что и показано выше.

Влияние колебаний температуры морской воды на распространение волн с периодами больше 3 мин

Существует еще одно интересное обстоятельство, влияющее на распространение волн с периодами более 3 мин как в сторону берега, так и в открытое море. Как видно на диаграммах модулей передаточной функции (рис. 7 а, б), в августе и сентябре в диапазоне периодов 3–100 мин наблюдаются два основных события с аномальными значениями модуля передаточной функции. Спектрограммы разности фаз (рис. 7 с, d) не содержат для этих событий значительных отклонений. При этом было замечено, что данные события связаны со значительными колебаниями температуры с периодами короче суточных (рис. 7 е), а не с продолжительными, в несколько суток (рис. 7 f).

В работе [22] показано, что для диапазона периодов колебаний температуры морской воды 1–80 ч выделяются спектральные пики для прибора 150 на периодах 25.5, 16.7, 12.9 и 6.7 ч, а для прибора 149 – на периодах 13.2, 6.5, 5.3 ч. При этом когерентность для временных рядов температуры существенно ниже доверительного уровня. Также отмечается, что периоды спектральных пиков колебаний температуры воды для периодов длиннее 5 ч не совпадают с периодами пиков колебаний уровня моря, а значит, эти пики колебаний температуры определяются внутренними волнами. Кроме того, в спектре колебаний температуры прибора 150 имеются пики на периодах 25.5, 16.7 ч, которые относятся к диапазону околорезонансных внутренних волн.

Хорошо видно, что значительные колебания температуры в диапазоне периодов 3–100 мин – внутренние волны с высотой более 7 °С разрушают краевые волны с периодами 4.27 и 7.63 мин (рис. 7 с), распространяющиеся вдоль берега, и излученные волны с периодами 3.6 и 8.8 мин, распространяющиеся в сторону моря (рис. 7 а). При этом энергия к внутренним волнам с периодами 3–100 мин, как видно на рис. 7 е, поступает от более длинных внутренних волн с периодами, близкими к полусуточным и суточным. Отметим, что в работе [22] предложен механизм бароклинной неустойчивости для объяснения передачи энергии от больших масштабов к малым.

Ветровое волнение в районе мыса Свободный

Представляет интерес рассмотреть характеристики ветрового волнения и зыби в исследуемой акватории, поскольку она активно используется для рыбного промысла. На рис. 8 представлены рассчитанные спектральные плотности волнения в диапазоне от 2 до 200 с, включающем ветровые волны и зыбь. Видно, что кривые в области от 2 до 20 с не содержат значительно выделенных пиков, в том числе и выраженного диапазона ветровых волн, и, как показали наши настоящие и предыдущие исследования, в диапазоне ИГ-волн также нет выраженной модовой структуры.

Для характеристики волн в физической океанографии используют термин значительная высота волны, обозначаемая H_s , которая определяется как средняя высота волны от впадины до гребня самой высокой трети волн $H_{1/3}$.

$$H_{1/3} = \frac{1}{\frac{1}{3}N} \sum_{m=1}^{\frac{1}{3}N} h_m$$

где h_m представляет отдельные высоты волн, отсортированные в порядке убывания высоты по мере увеличения m от 1 до N . При этом используется только самая высокая треть, поскольку это лучше всего соответствует визуальным наблюдениям. Значительная высота волны также может определяться как четырехкратное стандартное отклонение высоты по-

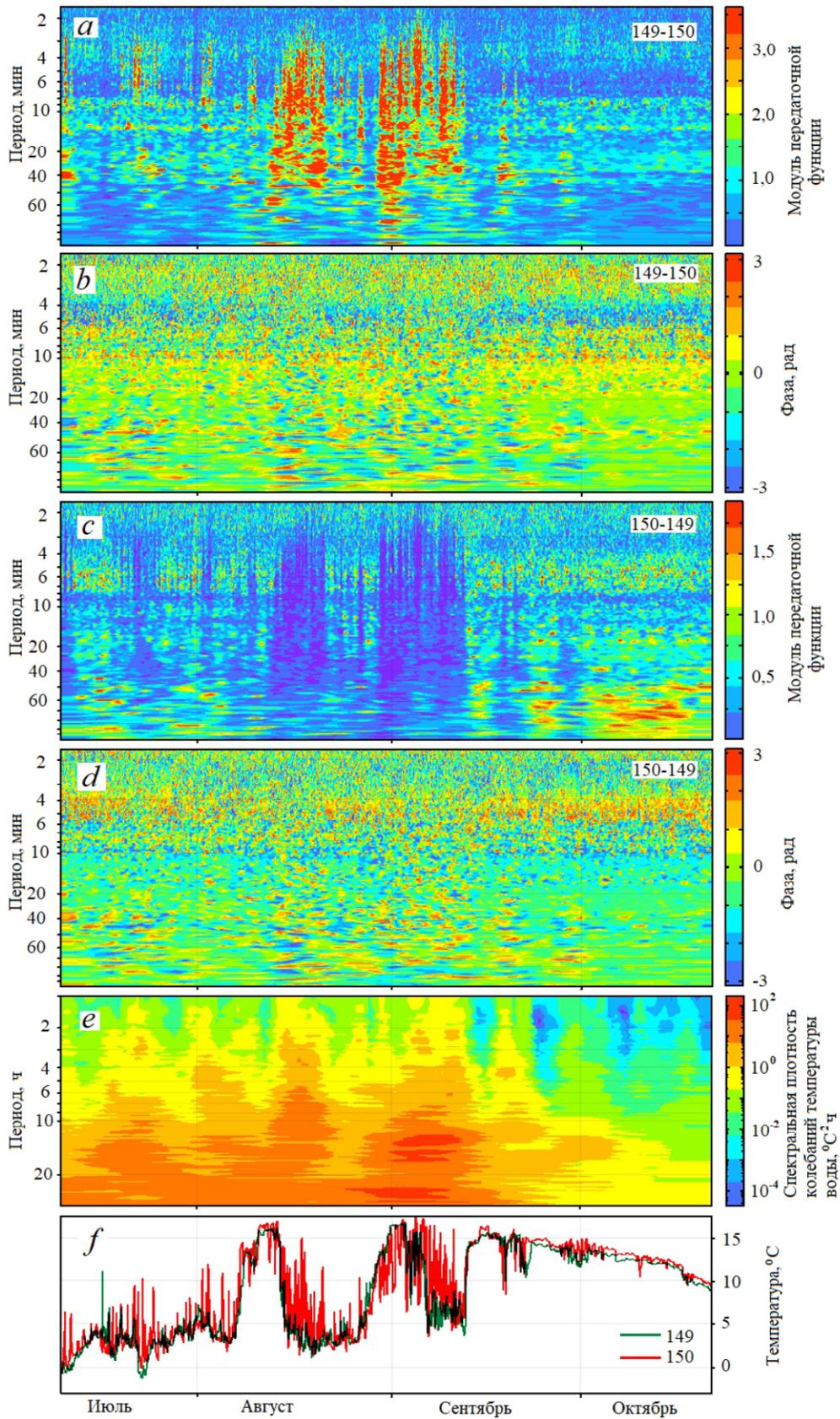


Рис. 7. Диаграммы модулей передаточной функции (a, b), спектрограммы разности фаз (c, d) для периодов колебаний уровня моря 1–100 мин, временной ход (f) и спектральная плотность колебаний температуры морской воды для прибора 150 (e).

Fig. 7. Transfer function magnitude diagrams (a, b) and phase difference spectrograms (c, d) for sea level fluctuations (periods: 1–100 minutes), along with time series (f) and spectral density of seawater temperature fluctuations for instrument 150 (e).

верхности или как четырехкратный квадратный корень из момента нулевого порядка [3].

На рис. 8 б, с представлены графики, отражающие изменение значительной высоты волн для периодов 5, 8, 11.5 с. Темный тон на них соответствует периоду 5 с. Хорошо видно, что ветровое волнение и зыбь в точке постановки прибора 150 примерно на 12 % больше, чем для прибора 149, который немного прикрыт мысом от приходящих из Охотского моря волн. Наибольшая высота волн наблюдалась при продолжительных – около суток – ветрах южного направления, которые связаны с проходившим над районом наблюдения циклоном. Непродолжительный, но сильный ветер со скоростью до 8 м/с не способствует генерации такой же, как при циклоне, высоты волн, в этом случае они в два раза ниже.

Выводы

Проанализированы различные типы волн в акватории моря у мыса Свободный (юго-восточное побережье о. Сахалин). Регистрация выполнена двумя автономными регистраторами волнения и температуры морской воды АРВ 14 К, а также метеостанцией Vantage Pro2 Weather Station в 2021 г. Использованы пяти-месячные временные ряды колебаний уровня моря и температуры с секундной дискретностью. Атмосферное давление и скорость ветра регистрировались с часовой дискретностью.

Спектральный анализ показал, что спектральные плотности волн в диапазоне 2–600 с не имеют выраженных пиков. Энергия волн в точке прибора 149 ниже, чем у прибора 150, что связано с защитой от волн мысом Свободный. Наблюдается подъем энергии в диапа-

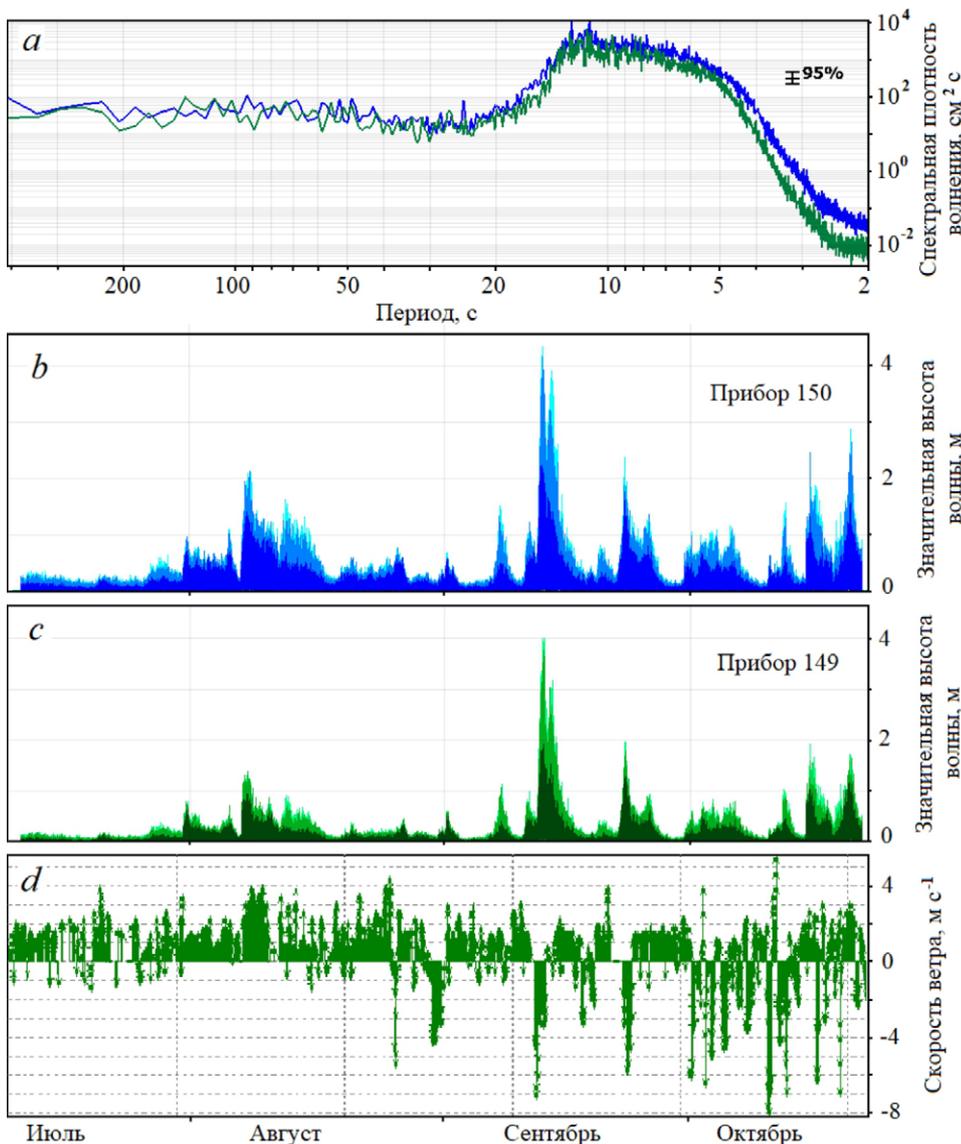


Рис. 8. Спектральные плотности волнения (а); значительная высота волн для периодов 5, 8, 11.5 с (b, c) выделена разным по тону цветом, темный соответствует периоду 5 с; векторы скорости ветра, зарегистрированные метеостанцией Vantage Pro2 Weather Station (d). Положительное направление векторов скорости ветра соответствует северным ветрам.

Fig. 8. Wave spectral densities (a); significant wave height for periods of 5, 8, and 11.5 seconds (b, c), highlighted in different shades (dark = 5 seconds); wind speed vectors recorded by the Vantage Pro2™ Weather Station (d). The positive direction of the wind speed vectors corresponds to northwesterly winds.

зоне ИГ-волн с периодами от 20 до 250 с во время штормов, но без выраженной модовой структуры.

Проанализированы волны с периодами 14.2 с, 3.6 мин и 8.8 мин. Теория Лонге-Хиггинса и Стюарта объясняет короткие волны, связанные с рассеянием зыби в зоне прибоя и образованием свободных волн. Модель Ламба и функция Бесселя подтвердили существование излученных волн с периодами 3.6 и 8.8 мин.

Волновые процессы, распространяющиеся к берегу, включают волны с периодами от 20 до 110 с и вдольбереговые процессы с периодами 4.27–7.63 мин. Рассмотрена возможность генерации краевых волн для профиля дна у мыса Свободный с использованием дисперсионного соотношения для волн Стокса. Колебания температуры морской воды влияют на распространение волн с периодами более 3 мин, разрушая краевые волны и излученные волны. Внутренние волны с периодами 3–100 мин и высотой более 7 °С влияют на энергию короткопериодных волн.

Анализ характеристик ветрового волнения и зыби показал, что в диапазоне периодов 2–20 с отсутствуют значительные волновые процессы. Наибольшие высоты волн наблюдались при продолжительных южных ветрах, связанных с циклоном, в то время как сильные ветра до 8 м/с не генерировали такие высокие волны.

Список литературы

1. Абузаров З.К. **1981**. *Морское волнение и его прогнозирование*. Л.: Гидрометеоздат, 166 с.
2. *Ветер, волны и морские порты*. **1986**. Авт.: Галенин Б.Г., Дугинов Б.А., Кривицкий С.В., Крылов Ю.М., Подмогильный И.А. Л.: Гидрометеоздат, 264 с.
3. Holthuijsen L.H. **2007**. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 387 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511618536>
4. Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. **1985**. *Волны в пограничных областях океана*. Л.: Гидрометеоздат, 280 с.
5. Munk W.H., Snodgrass F.E., Wimbush M. **1970**. Tides off-shore: Transition from California coastal to deep-sea waters. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1(1-2): 161–235. <https://doi.org/10.1080/03091927009365772>
6. Mysak L.A. **1980**. Topographically trapped waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 12: 45–76. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.12.010180.000401>
7. Herbers T.H.C., Elgar S., Guza R.T. **1995**. Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geo-*

physical Research: Oceans, 100(C12): 24863–24872. <https://doi.org/10.1029/95jc02680>

8. Brunner K., Rivas D., Lwiza K.M.M. **2019**. Application of classical coastal trapped wave theory to high-scattering regions. *Journal of Physical Oceanography*, 49: 2201–2216. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0112.1>
9. 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.
10. Ковалев Д.П. **2018**. *Кута: программа для ЭВМ*. RU 2018618773. №2018612587, 20.03.2018; опубл. 19.07.2018.
11. Отнес Р., Энноксон Л. **1982**. *Прикладной анализ временных рядов*. М.: Мир, 432 с.
12. Yaffee R.A., McGee M. **2000**. *Introduction to time series analysis and forecasting with applications of SAS and SPSS*. New York: Academic press, 528 p.
13. Bendat J.S., Piersol A.G. **2010**. *Random data: Analysis and measurement procedures*. New York: John Wiley & Sons, 640 p. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118032428>
14. Denman K.L. **1975**. Spectral analysis: a summary of the theory and techniques. *Fisheries and Marine Service*, Report No. 539. 37 p.
15. Marple S.L. **1987**. *Digital spectral analysis: with applications*. New Jersey: Prentice Hall, 390 p.
16. Рабинович А.Б. **1993**. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. Л.: Гидрометеоздат, 240 с.
17. Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W. **1962**. Radiation stress and mass transport in surface gravity waves with application to ‘surf beats’. *Journal of Fluid Mechanics*, 13: 481–504. <https://doi.org/10.1017/s0022112062000877>
18. Ламб Г. **1947**. *Гидродинамика*. М.: ОГИЗ, 928 с.
19. Foda M.A., Mei C.C. **1981**. Nonlinear excitation of long-trapped waves by a group of short swells. *Journal of Fluid Mechanics*, 111: 319–345. <https://doi.org/10.1017/s0022112081002401>
20. Holman R.A., Bowen A.J. **1984**. Longshore structure of infragravity wave motions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C4): 6446–6452. <https://doi.org/10.1029/jc089ic04p06446>
21. Eckart C. **1951**. *Surface waves on water of variable depth: Lecture Notes*. Marine Physical Laboratory, Scripps Institute Oceanography. Wave Report, 100(S10). 99 p.
22. Kurkin A., Kovalev D., Kurkina O., Kovalev P. **2023**. Features of long waves in the area of Cape Svobodny (South-Eastern part of Sakhalin Island, Russia). *Russian Journal of Earth Sciences*, 23, ES3003. <https://doi.org/10.2205/2023es000852>

References

1. Abuzyarov Z.K. **1981**. [*Sea waves and its forecasting*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 166 p.

2. *Wind, waves and seaports*. Authors: Galenin B.G., Duginov B.A., Krivitskii S.V., Krylov Yu.M., Podmogil'nyi I.A. **1986**. Leningrad: Gidrometeoizdat, 264 p.
3. Holthuijsen L.H. **2007**. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 387 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511618536>
4. Efimov V.V., Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Fain I.V. **1985**. [*Waves in the boundary regions of the ocean*]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 280 p.
5. Munk W.H., Snodgrass F.E., Wimbush M. **1970**. Tides off-shore: Transition from California coastal to deep-sea waters. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1(1-2): 161–235. <https://doi.org/10.1080/03091927009365772>
6. Mysak L.A. **1980**. Topographically trapped waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 12: 45–76. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.12.010180.000401>
7. Herbers T.H.C., Elgar S., Guza R.T. **1995**. Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12): 24863–24872. <https://doi.org/10.1029/95jc02680>
8. Brunner K., Rivas D., Lwiza K.M.M. **2019**. Application of classical coastal trapped wave theory to high-scattering regions. *Journal of Physical Oceanography*, 49: 2201–2216. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0112.1>
9. Plekhanov F.A., Kovalev D.P. **2016**. [A program for complex processing and analysis of time series of sea level data based on the author's algorithms]. *Geoinformatics*, 1: 44–53.
10. Kovalev D.P. **2018**. *Кыма: The software*. RU 2018618773. No. 2018612587, application 20.03.2018; publ. 19.07.2018. (In Russ.).
11. Otnes R., Enokson L. **1982**. [*Applied time series analysis*]. Moscow: Mir, 432 p.
12. Yaffee R.A., McGee M. **2000**. *Introduction to time series analysis and forecasting with applications of SAS and SPSS*. New York: Academic press, 528 p.
13. Bendat J.S., Piersol A.G. **2010**. *Random data: Analysis and measurement procedures*. New York: John Wiley & Sons, 640 p. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118032428>
14. Denman K.L. **1975**. Spectral analysis: a summary of the theory and techniques. *Fisheries and Marine Service, Report No. 539*. 37 p.
15. Marple S.L. **1987**. *Digital spectral analysis: with applications*. New Jersey: Prentice Hall, 390 p.
16. Rabinovich A.B. **1993**. [*Long gravitational waves in the ocean: capture, resonance, radiation*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 240 p.
17. Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W. **1962**. Radiation stress and mass transport in surface gravity waves with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanics*, 13: 481–504. <https://doi.org/10.1017/s0022112062000877>
18. Lamb H. **1945**. *Hydrodynamics*. 6th ed. New York: Dover publications. (Art. 260–261, p. 445–450). <https://doi.org/10.5962/bhl.title.18729>
19. Foda M.A., Mei C.C. **1981**. Nonlinear excitation of long-trapped waves by a group of short swells. *Journal of Fluid Mechanics*, 111: 319–345. <https://doi.org/10.1017/s0022112081002401>
20. Holman R.A., Bowen A.J. **1984**. Longshore structure of infragravity wave motions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C4): 6446–6452. <https://doi.org/10.1029/jc089ic04p06446>
21. Eckart C. **1951**. *Surface waves on water of variable depth: Lecture Notes*. Marine Physical Laboratory, Scripps Institute Oceanography. Wave Report, 100(S10). 99 p.
22. Kurkin A., Kovalev D., Kurkina O., Kovalev P. **2023**. Features of long waves in the area of Cape Svobodny (South-Eastern part of Sakhalin Island, Russia) during the passage of cyclones. *Russian Journal of Earth Sciences*, 23, ES3003. <https://doi.org/10.2205/2023es000852>

Об авторах

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

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

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, Russia:

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

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

Поступила 20.06.2024

Принята к публикации 17.08.2024

Received 20 June 2024

Accepted 17 August 2024