

Экспериментальные исследования длинноволновых баротропных и бароклинных колебаний в неглубоких заливах и бухтах окраинных морей (на примере залива Посъет Японского моря)

В. В. Новотрясов^{1, ✉}, Г. В. Шевченко²

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия

² Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии
наук, Южно-Сахалинск, Россия
✉ vadimnov@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 20.05.2025; одобрена после рецензирования 20.06.2025;
принята к публикации 10.11.2025.

Аннотация

Цель. Целью работы является исследование спектрального состава и выявление механизмов формирования субмезомасштабной и мезомасштабной изменчивости гидрологических параметров (уровня, температуры и придонного давления) в прибрежных водах залива Посъета в период максимального развития сезонного пикноклина.

Методы и результаты. Использовались данные измерений уровня (уровнемер), температуры в слое пикноклина и придонного давления, а также методы выделения его бароклинной составляющей для регистрации внутренних гравитационных волн. Применялись стандартные методы спектрального анализа и фильтрации, а также аналитическое моделирование для оценки периодов собственных колебаний бассейна. Установлено, что субмезомасштабная изменчивость формируется нулевой и высшими модами сейшевых колебаний залива, а также шельфовыми сейшми, возбуждаемыми волнами Пуанкаре. Спектры температуры и бароклинного давления имеют сходную структуру, а их спад в высокочастотной области описывается законом $\sim \omega^{-3}$. В мезомасштабном диапазоне (периоды часов – минут) выявлены колебания на приливных частотах (M_2 и ее субгармоники) и квазиинерционные колебания. Доказано присутствие внутренних волн Кельвина, а максимумы в спектре давления на частотах $\sim 1/16$ и $1/17$ ч⁻¹ интерпретированы как результат их доплеровского сдвига в прибрежном течении.

Выводы. Исследование подтвердило предположение о том, что изменчивость гидрологических параметров в заливе Посъета имеет топографическую природу и формируется комплексом резонансных процессов, собственными и вынужденными сейшми, а также внутренними волнами, проявляющими нелинейные свойства. Регистрация бароклинной составляющей придонного давления доказала свою эффективность как метод прямого детектирования внутренних волн Кельвина.

Ключевые слова: залив Посъета, морской шельф, уровень моря, температура морской воды, придонное давление, сейши, шельфовые сейши, внутренние волны Кельвина

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (тема № 1240-2210-0072-5).

Для цитирования: Новотрясов В. В., Шевченко Г. В. Экспериментальные исследования длинноволновых баротропных и бароклинных колебаний в неглубоких заливах и бухтах окраинных морей (на примере залива Посъет Японского моря) // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 1. С. 68–84. EDN GFKEOQ.

Experimental Studies of the Long-Wave Barotropic and Baroclinic Fluctuations in the Shallow Bays and Gulfs of Marginal Seas (Using the Example of Posyet Bay in the Sea of Japan)

V. V. Novotryasov ^{1, ✉}, G. V. Shevchenko ²

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

² Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia
✉ vadimnov@poi.dvo.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the work is to study the spectral composition and identify the mechanisms of formation of submesoscale and mesoscale variability of hydrological parameters (sea level, temperature and bottom pressure) in the Posyet Bay coastal waters during the maximum development of seasonal pycnocline.

Methods and Results. The internal gravity waves (IGW) were recorded using the measurement data on sea level (level gauge), temperature in the pycnocline layer and bottom pressure, as well as the methods for isolating its baroclinic component. Standard methods of spectral analysis and filtration, as well as the analytical modeling were applied for assessing the periods of natural fluctuations of the basin. It has been established that submesoscale variability is formed by the zero and higher modes of the bay seiche oscillations, as well as the offshore seiches induced by the Poincaré waves. The spectra of temperature and baroclinic pressure have a similar structure, and their decrease in the high-frequency area is described by the law $\sim \omega^{-3}$. In the mesoscale range (periods are of hours – minutes), the oscillations at tidal frequencies (M_2 and its subharmonics) and quasi-inertial oscillations are revealed. The presence of internal Kelvin waves has been proved, and the maximums in pressure spectrum at the frequencies $\sim 1/16$ and $1/17 \text{ h}^{-1}$ are interpreted as a result of their Doppler shear in the coastal current.

Conclusions. The study has confirmed the assumption that the variability of hydrological parameters in the Posyet Bay is of a topographic nature and is formed by a complex of resonant processes, its own and forced seiches, as well as by the internal waves manifesting nonlinear properties. Record of the baroclinic component of bottom pressure has proven to be an effective method for directly detecting the Kelvin internal waves.

Keywords: Posyet Bay, sea shelf, sea level, seawater temperature, bottom pressure, seiches, offshore seiches, Kelvin internal waves

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of state assignment of Pacific Oceanological Institute, FEB RAS (theme No. 1240-2210-0072-5).

For citation: Novotryasov, V.V. and Shevchenko, G.V., 2026. Experimental Studies of the Long-Wave Barotropic and Baroclinic Fluctuations in the Shallow Bays and Gulfs of Marginal Seas (Using the Example of Posyet Bay in the Sea of Japan). *Physical Oceanography*, 33(1), pp. 62-77.

Введение

Сейши – стоячие колебания жидкости в замкнутых или полузамкнутых водоемах [1], представляющие собой типичный пример баротропного процесса. Изучение этого явления в морских прибрежных акваториях имеет большое прикладное значение, поскольку резкое усиление сейш при определенных условиях может приводить к кратковременному росту амплитуд при-

ходящих волн различного происхождения. Прежде всего к таким волнам следует отнести волны цунами, характерные периоды которых близки к резонансным периодам большинства заливов и бухт Дальнего Востока России. Сейши также способны усиливать штормовые нагоны, представляющие серьезную опасность для населения и прибрежных сооружений [2].

Помимо баротропных сейш, существенную роль в динамике прибрежных вод играют бароклинные длинноволновые колебания – периодические изменения гидрофизических параметров, вызванные длинными внутренними гравитационными волнами (ВГВ)¹ [3]. Порождаемые ими волновые процессы оказывают значительное влияние на перенос массы и импульса, определяя горизонтальную дисперсию и вертикальное перемешивание, что критически важно для биогеохимических процессов в заливах и бухтах [4, 5].

В полузамкнутых морских бассейнах, таких как заливы и бухты, определяющий вклад в субмезомасштабную и мезомасштабную изменчивость гидрофизических параметров, включая уровень, вносят резонансные сейшевые колебания (СК) на частотах нулевой (фундаментальной) и последующих мод [6]. Механизм генерации подобных СК в таких бассейнах имеет ряд существенных особенностей. Сейши в них возбуждаются преимущественно через открытую границу, то есть являются индуцированными. Значительная роль в субмезомасштабной изменчивости уровня принадлежит колебаниям, индуцированным краевыми и излученными волнами шельфовой зоны, примыкающей к заливам.

Одним из таких полузамкнутых бассейнов является залив Посъета. Результаты натурных исследований СК уровня в бухтах, входящих в этот залив, опубликованы в работах [7, 8]. Численное моделирование этих процессов в указанных бухтах выполнено в работе [9]. Однако комплексно бароклинные колебания гидрологических параметров в этом заливе и примыкающих к нему бухтах, вызванные ВГВ, ранее не исследовались. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела путем натурального исследования как баротропных (на примере колебаний уровня залива), так и бароклинных (на примере колебаний температуры и придонного давления прибрежных вод в заливе) процессов в заливе Посъета.

Для этого использовались оригинальные данные измерений уровня (уровнемер оригинальной конструкции, установленный на побережье у входа в бухту Витязь, в северо-восточной части изучаемого бассейна), температуры прибрежных вод залива (притопленная буйковая станция, установленная на изобате 35 м в прибрежной зоне п-ова Гамова) и придонного давления (регистратор уровня АРВ К-14 разработки СКТБ «ЭлПА», г. Углич, на изобате ~ 27 м вблизи открытой границы бухты Витязь).

Цель настоящей работы – исследование спектрального состава субмезомасштабных колебаний и интерпретация особенностей мезомасштабных колебаний уровня, придонного давления и температуры прибрежных вод в заливе Посъета. Для ее достижения решались следующие задачи:

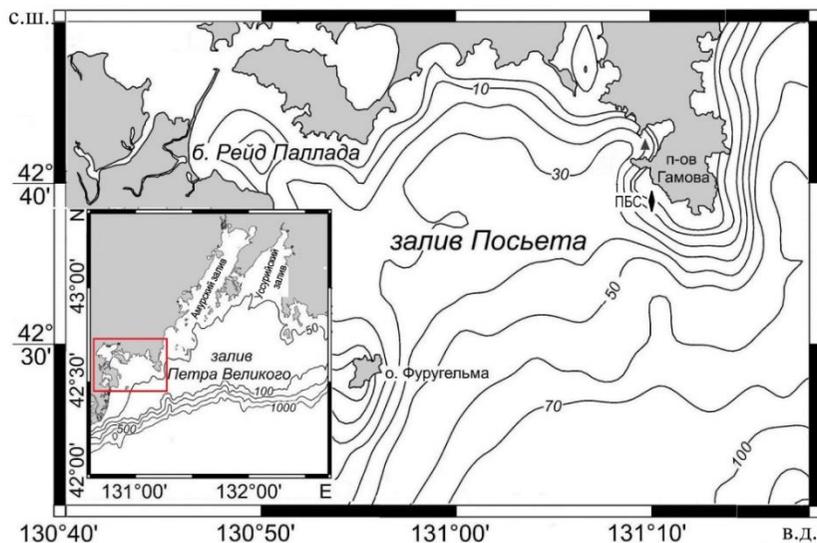
а) выделение и анализ преобладающих частот (периодов) в спектрах колебаний указанных параметров;

¹ Физика океана : [в 2 т.]. Москва : Наука, 1978. 455 с.

б) интерпретация полученных спектров с позиций теории сейшевых и излученных волн, а также с учетом возможного влияния внутренних нелинейных гравитационных волн.

Описание района исследования, используемых данных и методики их обработки

На рис. 1 представлена карта-схема батиметрии залива Посьета и входящих в его состав бухт. На врезке показан залив Петра Великого Японского моря. Данные о топографии и батиметрии получены из навигационных карт².



Р и с. 1. Карта-схема батиметрии залива Посьета и входящих в него бухт (положение датчика давления отмечено треугольником, притопленной буйковой станции – ромбом). На врезке красным прямоугольником обозначено его положение в заливе Петра Великого Японского моря

Fig. 1. Map-scheme of bathymetry of the Posyet Bay and its constituent bays (pressure sensor position is marked with a triangle, and submerged buoy station – with a diamond). The inset shows its position in Peter the Great Bay (the Sea of Japan) with a red rectangle

Спектральный состав колебаний уровня ζ исследовался по данным измерений, выполненных в разные годы уровнемером и датчиком давления производства СКТБ ЭлПА с верхним пределом измерения абсолютного давления (ВПИ), глубиной погружения 50 м, разрешающей способностью 0,0008 % ВПИ и основной приведенной погрешностью +0,06 % ВПИ. Бароклинные колебания в заливе исследовались по данным измерений бароклинной составляющей придонного давления и температуры прибрежных вод, полученным с притопленной буйковой станции (ПБС), выставленной 14 июля 2009 г. на изобате 35 м.

² Атлас залива Петра Великого и северо-западного берега Японского моря до бухты Соколовская (для маломерного флота). Владивосток : Гидрографическая служба КТОФ, 2003. 10 с.

Буйковая станция была оснащена автономным цифровым термографом *HOBO (Onset, США)* с точностью $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от 0 до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ и разрешением $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также памятью 64 Кбайт ($\sim 42\,000$ 12-битных измерений). Термограф размещался в слое сезонного пикноклина на расстоянии 20 м от дна. Регистрация температуры на станциях проводилась с дискретностью 1 мин . Продолжительность измерений составила более 50 сут .

Спектральный состав колебаний уровня ζ , пульсаций температуры T и придонного давления p морских вод в заливе исследовался с помощью методов стандартного спектрального анализа³ [10]. Исходные колебания ζ , T и p разделялись на субмезомасштабную и низкочастотную фоновые составляющие с использованием фильтра Хэмминга с окном длительностью 480 мин . Фоновая составляющая служила для выделения реализаций в субмезомасштабном диапазоне частот $1/8\text{--}1/256\text{ мин}^{-1}$, которые рассчитывались как разность между фоновыми и исходными реализациями уровня, температуры и придонного давления. Полученные временные ряды колебаний ζ , p и T использовались для расчета спектральной плотности колебаний уровня (Sp_{ζ}) пульсаций давления (Sp_{pp}) и температуры (Sp_T).

Результаты и обсуждение

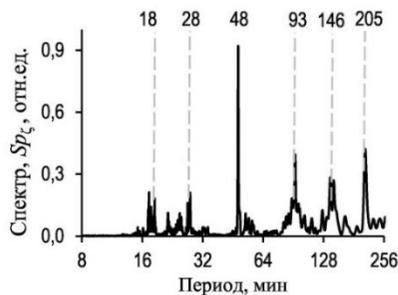
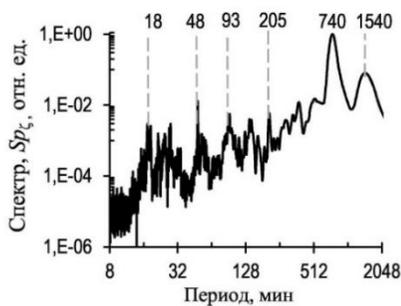
Частотный состав субмезомасштабных колебаний уровня в заливе Посьет

Для анализа использовались данные измерений уровня на входе в б. Витязь, выполненных в 2001 и 2003 г. с помощью оригинального уровнемера (точность $0,5\text{ см}$). Запись производилась на электронный накопитель с внутренней флеш-памятью. Интервал дискретизации сигнала с уровнемера при записи составлял $7,5\text{ мин}$ в 2001 г. и 1 мин в 2003 г.

Спектральная структура колебаний уровня исследовалась на двухнедельной реализации, полученной в августе 2003 г. Для анализа использовалась ее высокочастотная составляющая. На рис. 2 представлен нормированный на максимальное значение спектр колебаний уровня в августе 2003 г. в частотных диапазонах $1/8\text{--}1/2048\text{ мин}^{-1}$ (рис. 2, *a*) и $1/8\text{--}1/256\text{ мин}^{-1}$ (рис. 2, *b*). Основная энергия спектра на рис. 2, *a* сосредоточена на низких частотах, соответствующих периодам $\sim 12,3\text{ ч}$ ($1/740\text{ мин}^{-1}$) и $\sim 25,6\text{ ч}$ ($1/1540\text{ мин}^{-1}$), с быстрым спадом спектра в сторону высоких частот.

Спектр субмезомасштабных колебаний уровня, нормированный на максимальное значение, которое приходится на период $T_0 \sim 48\text{ мин}$, характеризуется узкополосным максимумом на периоде T_0 и менее интенсивными широкополосными максимумами на периодах ~ 93 , ~ 146 и $\sim 205\text{ мин}$ (рис. 2, *b*). Кроме того, в диапазоне периодов от 10 до 40 мин максимумы наблюдаются на периодах ~ 18 , ~ 22 , ~ 25 , $\sim 28\text{ мин}$.

³ Драган Я. П., Рожков В. А., Яворский И. Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 319 с.



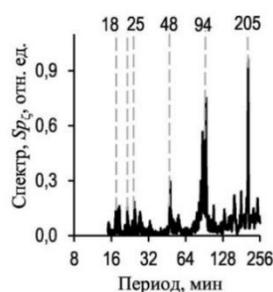
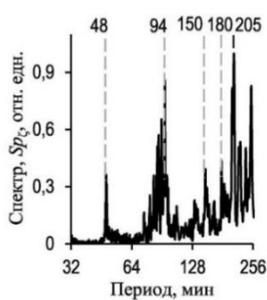
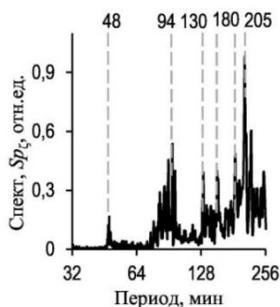
a

b

Р и с. 2. Спектр реализации колебаний уровня (август 2003 г.) в частотных диапазонах $1/8$ – $1/2048$ мин^{-1} (*a*) и $1/8$ – $1/256$ мин^{-1} (*b*). Числа над пиками обозначают периоды в минутах

F i g. 2. Spectrum of realization of level oscillations (August 2003) in the frequency ranges $1/8$ – $1/2048$ мин^{-1} (*a*) and $1/8$ – $1/256$ мин^{-1} (*b*). Numbers above the peaks indicate periods in minutes

Устойчивость спектральной структуры колебаний уровня в заливе оценена по месячным реализациям за осенний период 2001 г. (рис. 3).



a

b

c

Р и с. 3. Спектры колебаний уровня в сентябре (*a*), октябре (*b*) и ноябре (*c*) 2001 г.

F i g. 3. Spectra of sea level fluctuations in September (*a*), October (*b*) and November (*c*), 2001

Здесь и далее на спектрах по оси абсцисс отложен период в логарифмическом масштабе. Спектры рассчитаны с длиной окна 5760 измерений (спектральное разрешение $\Delta\omega \cong 1,45 \cdot 10^{-4}$ рад/мин) и 21 степенью свободы.

Анализ выявил характерные особенности представленных спектров: во-первых, устойчивые узкополосные максимумы на частотах $1/48$, $1/94$ и $1/205$ мин^{-1} ; во-вторых, широкополосные максимумы на высоких частотах $1/18$, ..., $1/27$, $1/32$ мин^{-1} , наиболее выраженные на спектре в сентябре, и, в-третьих, неустойчивые широкополосные максимумы на низких частотах $1/109$, $1/130$, ..., $1/180$ и $1/208$ мин^{-1} .

Таким образом, спектральный анализ колебаний уровня в заливе в частотном диапазоне $1/8$ – $1/256$ мин^{-1} на реализациях продолжительностью в один месяц и в две недели выявил устойчивую характерную спектральную структуру, характеризующуюся тремя узкополосными, четырьмя широкополосными и несколькими неустойчивыми широкополосными максимумами.

Оценка периодов баротропных колебаний на шельфе, прилегающем к заливу Посьета, в Амурском и Уссурийском заливах

Оценки периодов СК уровня для залива Посьета были получены ранее в работе [11] на основе модельного бассейна, аппроксимирующего его акваторию. Модельный бассейн с открытой границей, через которую осуществляется его связь с заливом Петра Великого, имел акваторию полукруглой формы с радиусом $L \approx 14$ км и глубиной на входе $H \approx 50$ м. Для подобных морских бассейнов характерно интенсивное проявление продольной нулевой моды собственных колебаний, где четверть длины волны укладывается в бассейне, а узловая линия находится вблизи его входа. Расчетный период этой так называемой фундаментальной, или нулевой, моды СК в морском бассейне с параметрами, близкими к параметрам залива Посьет, составляет ~ 47 мин. Периоды последующих мод близки к периодам максимумов спектра на частотах $\nu_1 \approx 1/33$ мин⁻¹, $\nu_2 \approx 1/27$ мин⁻¹, $\nu_3 \approx 1/22$ мин⁻¹.

Исследование взаимного влияния двух смежных бухт друг на друга при резонансном отклике в работе [12] показало, что наличие смежной бухты приводит к интенсификации нулевой (фундаментальной) моды в обоих бассейнах. Поскольку в залив Петра Великого, помимо залива Посьета, входят также Амурский и Уссурийский заливы, каждый из них оказывает влияние на колебания уровня в соседних акваториях. В связи с этим выполним оценку периодов нулевой моды для Амурского и Уссурийского заливов с использованием простейших аналитических моделей этих бассейнов.

Акватория Амурского залива имеет форму, близкую к прямоугольнику с длиной от 50 до 60 км и глубиной на входе от 45 до 50 м. Предположим, что профиль дна залива имеет линейную зависимость. В подобном бассейне нулевая продольная мода залива будет иметь период от 200 до 240 мин. Зададим форму границы акватории Уссурийского залива равнобедренным треугольником неправильной формы протяженностью от устья до вершины – $L \sim 40$ –50 км, глубиной на входе от 50 до 70 м и квадратичным профилем дна. В подобном бассейне период фундаментальной продольной моды будет составлять от 130 до 140 мин, а период первой моды – от 90 до 94 мин.

Колебания уровня, индуцированные шельфовыми сейшмами в заливе Посьета

Как известно, поле поверхностных волн в заливах, бухтах и на примыкающем к ним участке шельфа формируется как собственными колебаниями, так и колебаниями непрерывного спектра излученных шельфом волн. Согласно исследованиям, волны, набегающие из открытого моря (волн Пуанкаре), в результате многократных отражений от берега и границы шельфа могут значительно усиливаться на избранных резонансных частотах. Таким образом, суперпозиция набегающей и отраженной от берега волн Пуанкаре приводит к возбуждению стоячих колебаний уровня с периодами, соответствующими так называемым шельфовым сейшмам⁴.

Для описания непрерывного спектра волн Пуанкаре используется коэффициент амплитудного усиления γ – отношение амплитуды волны у берега

⁴ Волны в пограничных областях океана / [В. В. Ефимов и др.]. Ленинград : Гидрометеорологический издат., 1985. 280 с.

к ее амплитуде в открытом море. Этот коэффициент зависит от частоты ω , вдольберегового волнового числа k и рельефа шельфа. Фактически функцию $\gamma(\omega, k)$ допустимо интерпретировать как передаточную функцию системы открытое море – берег. Поэтому на частотах, где эта функция имеет максимумы (то есть на резонансных частотах), можно ожидать соответствующие максимумы в спектрах колебаний уровня.

Для шельфа с рельефом, заданным простейшим выражением

$$h(x) = \begin{cases} \alpha x & \text{при } 0 < x < L, \\ H & \text{при } x > L, \end{cases}$$

коэффициент усиления имеет вид

$$\gamma(\omega) = [J_0^2(\sigma) + dJ_1^2(\sigma)]^{-1/2}, \quad (1)$$

где $\sigma = \lambda\sqrt{L}$, $\lambda = \sqrt{L(\omega^2 - f^2)}/\sqrt{gh}$, $h = \alpha L$, $d = h/L$.

Рассмотрим модельный шельф с параметрами: $f = \frac{2\pi}{17,7}$ рад/ч, $h = 201$ м,

$L = 35$ км и $H = 4$ км, близкими к соответствующим параметрам шельфа в районе залива. Согласно соотношению (1), коэффициент усиления излученных волн γ для такого шельфа имеет максимумы на периодах: 178, 134, 107 и 90 мин. Эти значения хорошо согласуются с максимумами в спектре колебаний уровня (см. рис. 2 и 3). Таким образом, перечисленные максимумы в спектре на отмеченных периодах, весьма вероятно, сформированы излученными волнами в результате шельфового резонанса между падающей и отраженной волнами Пуанкаре.

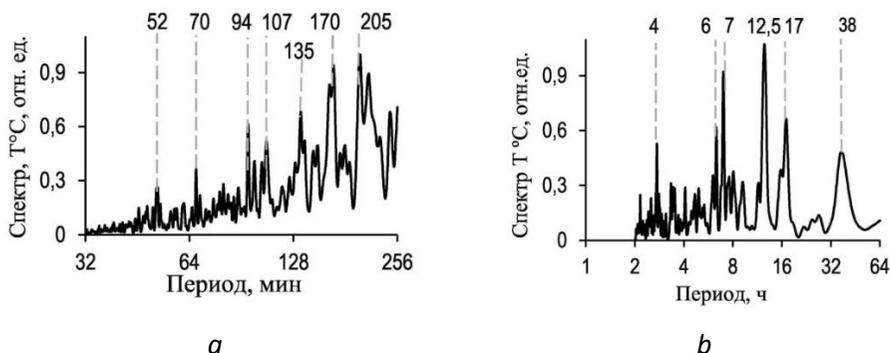
Перейдем к интерпретации особенностей спектра колебаний уровня в заливе, воспользовавшись предположением о том, что эти колебания создаются сейшами, а также излученными волнами над шельфом, примыкающим к заливу. С использованием модельного бассейна с параметрами, близкими к параметрам залива, рассчитаны периоды нулевой ($T_0 \sim 47$ мин) и последующих ($T_1 \sim 33$ мин, $T_2 \sim 26$ мин, $T_3 \sim 23$ мин) мод его сейшевых колебаний. Полученные значения, как нетрудно убедиться, соответствуют положениям максимумов в высокочастотной части спектра (см. рис. 2, *b*).

Другим важным источником колебаний уровня являются излученные волны, сформированные волнами Пуанкаре. Над шельфом шириной ~ 38 км и свалом до глубины на входе (~ 4 км) эти волны формируют стоячие колебания уровня с периодами $T_1 \sim 178$ мин, $T_2 \sim 134$ мин, $T_3 \sim 107$ мин и ~ 90 мин. Полученные модельные периоды соответствуют положениям максимумов в наблюдаемых спектрах колебаний уровня (рис. 3).

Спектральный состав пульсаций температуры и придонного давления в районе исследований

Обратимся к данным измерений температуры прибрежных вод, полученным в районе проведенного эксперимента. Спектральный анализ исходной реализации проведен для двух временных масштабов (рис. 4). В субмезомасштабном диапазоне (интервал дискретизации 6 мин) спектр (рис. 4, *a*) харак-

теризуется максимумами на периодах 205, 170, 135, 107 и 94 мин, которые соответствуют ранее выявленным пикам в спектре колебаний уровня. В мезомасштабном диапазоне (интервал дискретизации 30 мин) наблюдаются максимумы на периодах 12,6; 17,1; 38,0; 7,0 и 6,3 ч (рис. 4, *b*).



Р и с. 4. Спектр пульсаций температуры в диапазонах $1/32$ – $1/256$ мин^{-1} (*a*) и 1 – $1/64$ ч^{-1} (*b*)
F i g. 4. Spectrum of temperature pulsations in the ranges $1/32$ – $1/256$ мин^{-1} (*a*) and 1 – $1/64$ мин^{-1} (*b*)

Интерпретацию спектральных особенностей пульсаций температуры в мезомасштабном диапазоне следует проводить с учетом динамики бароклинных возмущений в прибрежной зоне окраинных морей. Установлено, что подобные возмущения вызываются баротропным приливным или инерционным потоком [13]. При его взаимодействии с континентальным склоном возникают значительные вертикально-поступательные движения больших масс морской воды, создающие «массовую силу» – источник бароклинных возмущений, эволюционирующих в ВГВ с приливными или инерционными частотами. Спектральный портрет этой «массовой силы» подтверждает смешанный характер баротропного прилива в заливе с преобладанием суточных составляющих.

Бароклинные возмущения условно можно разделить на вынужденные ВГВ с частотами баротропного прилива и пространственными масштабами, которые определяются неоднородностями рельефа дна в зоне генерации, и свободные ВГВ, пространственно-временные масштабы которых детерминируются свойствами среды через дисперсионное соотношение, а временные масштабы ограничены областью существования этого типа волнового движения:

$$f < \omega < N_{\max},$$

где N_{\max} – максимальное значение частоты Вьяйсяля – Брента в изучаемом районе в рассматриваемый период времени.

Интерпретацию мезомасштабной изменчивости гидрологических параметров продолжим с использованием модели слоистой жидкости, возмущенной полем ВГВ. По определению из работы [14], внутренние волны представляют малые отклонения гидрофизических параметров от равновесных значений. Например, вариации температуры δT связаны с полем этих волн соотношением

$$\delta T = i\omega\eta \cdot (d \langle T_0(z) \rangle / dz),$$

где $\langle T_0(z) \rangle$ – фоновое распределение температуры; η – вертикальное смещение «жидких частиц» с частотой ω в волновом поле. Смещение η в стратифицированной жидкости можно представить в виде суперпозиции нормальных мод внутренних волн:

$$\zeta = \sum A_n \cdot \psi_n(z) \cdot \exp\left[i(k_x x + k_y y - \omega t)\right],$$

где $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ горизонтальный волновой вектор; $\psi_n(z)$ – амплитудная функция моды ВГВ с номером n . В приближении Буссинеска набор этих функций является решением краевой задачи на собственные значения:

$$\frac{d^2 \psi_n}{dz^2} + k^2 \frac{N^2 - \omega^2}{\omega^2 - f^2} \psi_n = 0, \quad (2)$$

с граничными условиями «твердой крышки»

$$\psi_n = 0 \text{ при } z = 0 \text{ и } z = -H. \quad (3)$$

Выпишем выражение для пульсаций давления, создаваемого n -й модой ВГВ:

$$p_n = -iC_n \cdot (\omega^2 - f^2) k^{-2} \omega^{-1} (\rho_0 d\psi_n(z)/dz) \cdot \exp\left[i(k_x x + k_y y - \omega t)\right]. \quad (4)$$

Согласно формуле (4), давление, создаваемое ВГВ с частотой $\omega \rightarrow f$, приближается к нулю, то есть любая мода ВГВ с подобными частотами создает пренебрежимо малое давление в придонном слое. Другими словами, близость придонного давления к нулю является характерным признаком краевой ВГВ с частотой, близкой к частоте f , или ВГВ Кельвина.

Переходим к анализу и интерпретации изменчивости температуры прибрежных вод в заливе, вызванной полем ВГВ. Отсутствие в спектре температуры максимума на частоте $1/24 \text{ ч}^{-1}$ объясняется тем, что эта частота лежит за границей существования ВГВ. Пик на частоте $\sim 1/12 \text{ ч}^{-1}$ повсеместно присутствует в спектрах параметров океана и свидетельствует о стоке энергии полусуточного прилива во внутренние волны [15]. В то же время пик в спектре флуктуаций температуры морской воды в районе постановки ПБС на полусуточной частоте соответствует вынужденным волнам.

Максимумы в спектре на периодах 17, 16 и 38 ч могут быть интерпретированы как проявление внутренних волн Кельвина (ВВК), которые формируются у обрывистого берега п-ова Гамова (см. рис. 1) [16, 17]. В правосторонней системе координат, в которой ось Ox направлена вдоль берега, ось Oy – от берега и ось Oz – вертикально вверх, параметры ВВК, бегущих вдоль береговой границы, экспоненциально затухающих при удалении по нормали от нее, имеют вид

$$w = \sum_m C_m \psi_m(z) \exp\left[-f y/c_m + ik_m(x - c_m t)\right]$$

и их можно определить, решив краевую задачу на собственные значения:

$$d^2\psi_m/dz^2 + N^2 c_m^{-2} \psi_m = 0, \quad (5)$$

$$\psi_m = 0 \text{ при } z = 0 \text{ и } z = -H, \quad (6)$$

где c_m – фазовая скорость ВВК с номером m . Из соотношения (5) следует: а) фазовая скорость этой волны не зависит от ее частоты, то есть ВВК бездисперсные; б) при $\omega \cong f$ в краевой задаче (5) и (6) отсутствует сингулярность, которая присутствует в краевой задаче (2) и (3). Следовательно, волна ВВК с инерционной частотой f создает придонное давление, которое при наличии пикноклина в придонных водах принимает максимальное значение.

Анализ краевой задачи (5), (6) показывает, что при фиксированной частоте ω поле ВВК характеризуется дискретным набором амплитудных функций $\{\psi_m\}$ и соответствующим набором фазовых скоростей $\{c_m\}$ или волновых чисел $\{k_m = \omega/c_m\}$. Все эти параметры волнового поля можно найти, решив краевую задачу на собственные значения (5), (6). Ее решение определяется распределением по глубине параметра $N(z)$. Однако в районе наблюдений возможно присутствие прибрежного фоновое течения, что может приводить к адвективному переносу поля волн относительно измерителей. Спектры, получаемые по таким данным, характеризуются распределением энергии волновых колебаний не по истинным частотам ω , а по доплеровским частотам: $\omega_D = \omega \pm kU_0$. Известно [18, 19], что, распространяясь в фоновом потоке, нормальная мода ВГВ с номером n будет вызывать колебания гидрофизических параметров с частотой ω_n , отличной от частоты ω на спокойной воде. В случае вдольберегового фоновое потока со скоростью U_0 две эти частоты либо периода связаны соотношением Доплера:

$$T_m = T (1 - U_0/c_m). \quad (7)$$

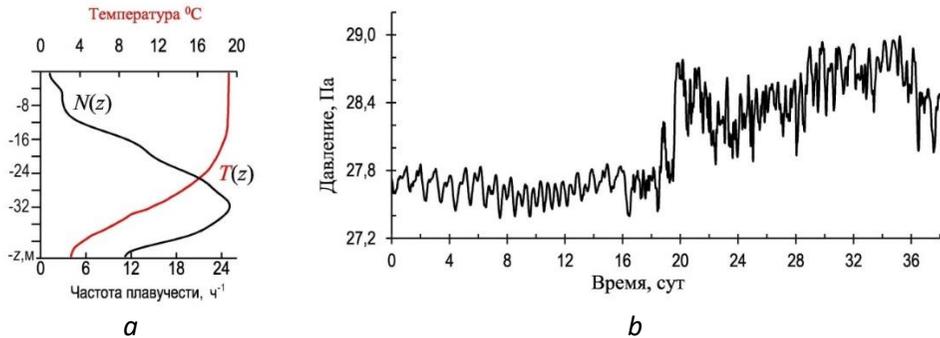
В этом выражении знак «минус» выбран в соответствии с предположением о том, что волны распространяются из мористой зоны залива по прибрежному фоновому потоку, направленному в его куттовую зону.

Таким образом, m -я мода ВВК с номером m и периодом $T_i = 1/f$, где f – инерционная частота, распространяясь в прибрежном потоке залива, вызывает колебания гидрофизических параметров с различными периодами $\{T_m\}$, связанными с инерционным периодом $T_i = T$ соотношением (7). Весьма вероятно, что в 2009 г. в прибрежной зоне п-ова Гамова сложились гидрологические условия, близкие к условиям 2005 г.

Характерный для сентября 2009 г. профиль частоты плавучести $N(z)$, замствованный из работы [20], представленный на рис. 5, а, указывает на осенний тип плотностной стратификации с пикноклином, смещенным к придонному слою.

Еще одна особенность спектра на рис. 4, а связана с наличием максимума на периоде $\sim 6,3$ ч. Ранее было установлено, что ВВК в прибрежной зоне п-ова Гамова проявляют нелинейные свойства [21]. Другими словами, в процессе эволюции форма ВВК приобретает все более ассиметричный вид. Задний фронт становится все более крутым, а передний – более пологим. В спектре волнового поля появляются гармоники несущей частоты $1/12,4 \text{ ч}^{-1}$, то

есть частоты $\sim 1/6$, $\sim 1/4$ ч⁻¹, первая из которых зафиксирована в спектре на рис. 4, *b*.

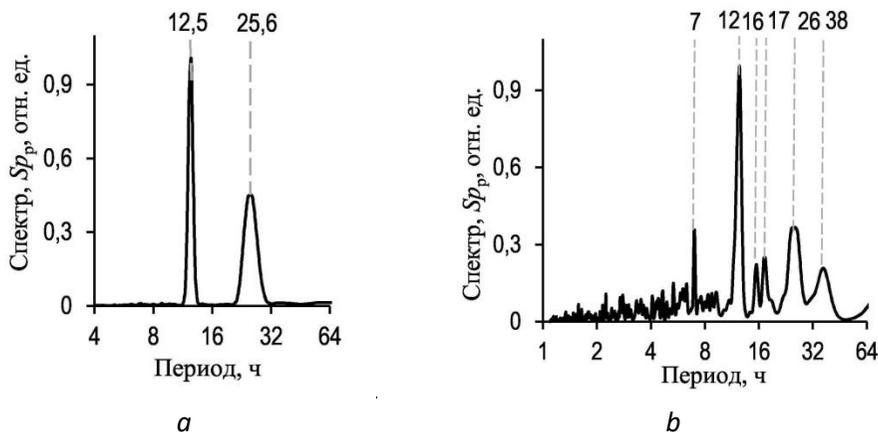


Р и с. 5. Характерные профили температуры T и частоты плавучести $N(z)$ (*a*) и реализация придонного давления (*b*) в районе наблюдений
F i g. 5. Characteristic profiles of temperature T and buoyancy frequency $N(z)$ (*a*), and bottom pressure realization (*b*) in the observation area

Проанализируем данные измерений пульсаций придонного давления в прибрежных водах, зарегистрированных в районе эксперимента. Измерения гидростатического давления производились каждую секунду в сантиметрах ртутного столба. Затем данные пересчитывались в сантиметрах водного столба и усреднялись с периодом 60 с и весовыми коэффициентами фильтра Кайзера – Бесселя (для подавления возможного влияния ветрового волнения, которое возможно при использовании обычного прямоугольного окна). Реализация пульсаций давления в районе постановки датчика давления, полученная за 38 сут (с 28.08.2009 по 14.10.2009), демонстрирует резкое изменение спектрального состава на 16-е сутки наблюдений (рис. 5, *b*), продолжавшееся около трех недель.

В первые 16 суток устройство регистрировало пульсации давления, вызванные приливными колебаниями уровня. Характер прилива, по данным измерений в заливе, смешанный с незначительным преобладанием суточной гармоник. Подтверждением этому служит спектр этих колебаний (рис. 6, *a*). Согласно рисунку, спектр сформирован двумя выразительными максимумами на полусуточной и суточной частотах: $\sim 1/12,4$ и $\sim 1/25,6$ ч⁻¹ соответственно.

Рассмотрим спектральный состав пульсаций давления второй половины реализации L_2 (рис. 6, *b*). Сравнение двух спектров (рис. 6) показывает, что они содержат максимумы на частотах $\sim 1/12,4$ и $\sim 1/26$ ч⁻¹, сформированные приливными колебаниями уровня. При этом спектр реализации L_2 содержит дополнительно максимумы на частотах $1/7$, $1/16$, $1/17$ и $1/38$ ч⁻¹.

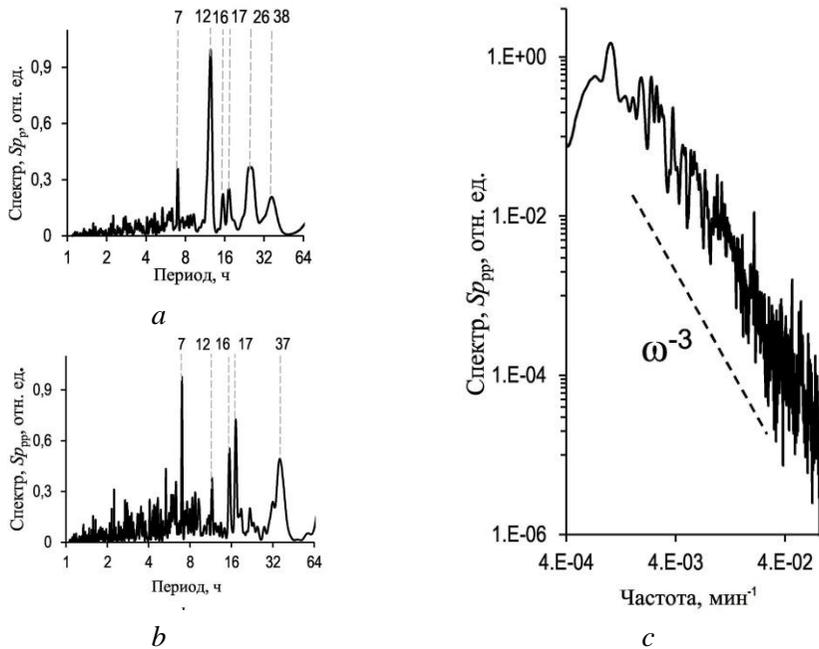


Р и с. 6. Спектры пульсаций давления в первые две недели (*a*) и спектр пульсаций в последующие три недели (*b*)
F i g. 6. Spectra of pressure pulsations in the first two weeks (*a*), and pulsation spectra in the following three weeks (*b*)

Весьма вероятно, что причина этих различий двух спектров вызвана бароклинностью прибрежных вод залива. Известно о том, что пульсации давления прибрежной зоне моря складываются из пульсаций баротропной и бароклиной составляющих. Причем баротропной составляющей соответствуют приливные колебания уровня, а мезомасштабные колебания температуры имеют бароклиную природу. После исключения баротропной составляющей получен спектр остаточных бароклиных пульсаций давления (рис. 7, *b, c*).

Его главное отличие от спектра на рис. 7, *a* состоит в отсутствии максимума на частоте $\sim 1/25,6 \text{ ч}^{-1}$ (рис. 7, *b*), то есть пульсации давления на частоте колебаний суточного прилива отсутствуют. Подобной особенностью, как известно, обладает внутренний прилив в зал. Петра Великого: этот волновой процесс может существовать только в условиях плотностной стратификации (бароклинности) прибрежных вод. Остаточные пульсации придонного давления на частоте $1/12,4 \text{ ч}^{-1}$ также указывают на их бароклиную природу, а спектр этих пульсаций представляет собой спектр пульсаций давления, создаваемого внутренними волнами. Еще одним подтверждением этого предположения может служить значительное сходство спектров пульсаций температуры, вызванных ВГВ, и спектра пульсаций бароклиной составляющей придонного давления.

Другая особенность спектра на рис. 7 состоит в том, что периоды колебаний 16 и 17 ч, на которых располагаются его максимумы, близки к инерционному периоду $T_i = 1/f$, где $f = 2\Omega |\sin\phi|$ – параметр Кориолиса на широте наблюдений ϕ . Широта, на которой проводились наблюдения, равна $\phi \sim 42^\circ 35'$. Таким образом, период T_i составляет 17,7 ч. Причем, как следует из рис. 7, пульсации на периодах, близких к T_i , имеют дуплетную структуру, связанную с максимумом на периоде 16 ч. Интерпретация формирования подобной структуры дана в тексте выше и обусловлена прибрежным фоновым течением, направленным в куттовую зону залива.



Р и с. 7. Спектры пульсаций баротропной (*a*) и бароклиной (*b* – по периоду, *c* – по частоте) составляющих придонного давления

Fig. 7. Pulsation spectra of the barotropic (*a*) and baroclinic (*b* – by period, *c* – by frequency) components of bottom pressure

И, наконец, в спектре обращает на себя внимание узкополосный максимум явно резонансной природы на частоте $1/7 \text{ ч}^{-1}$, происхождение которого требует дополнительного изучения. Следует лишь заметить, что сумма частот $1/12,4$ и $1/17,7 \text{ ч}^{-1}$ близка к $1/7 \text{ ч}^{-1}$, а их разность – к $1/38,4 \text{ ч}^{-1}$, что указывает на возможное нелинейное взаимодействие внутренних волн.

Результаты представленного анализа указывают на сходство спектра пульсаций температуры в пикноклине и спектра бароклиной составляющей придонного давления. В работе [22] высказано предположение о том, что в прибрежной зоне п-ова Гамова возможно существование ВВК. Характерным признаком этих волн являются интенсивные пульсации давления на частотах, близких к инерционной. Именно эта особенность спектра пульсаций давления была зафиксирована датчиком давления. Следовательно, зарегистрированные пульсации давления и соответствующий им спектр сформированы ВВК. Таким образом, открывается еще одна возможность регистрации ВВК наряду с измерениями вертикальных смещений частиц жидкости посредством регистрации пульсаций бароклиной составляющей давления.

В высокочастотной части спектра (диапазон $4,0\text{E-}04$ – $4,0\text{E-}02 \text{ мин}^{-1}$) бароклиного давления его характер меняется от дискретного (узкие пики на рис. 7, *a*, *b*) к непрерывному, а спад энергии следует закону, близкому к $\sim \omega^{-3}$ (рис. 7, *c*). Такая асимптотика отличается от канонического спектра линейных внутренних волн ω^{-2} [23]. Однако она регистрировалась в исследованиях нелинейных внутренних волн [24, 25], где ее связывают с процессом

эволюции волнового поля: нарастанием асимметрии волны, генерацией гармоник несущей частоты и их последующим нелинейным взаимодействием, ведущим к формированию частотного континуума. Это согласуется с данными о проявлении нелинейных свойств ВГВ в заливе Посьета, приводящих к генерации гармоник и формированию спектра с ω^{-3} -асимптотикой.

Заключение

На основе анализа временных рядов наблюдений мы исследовали изменчивость уровня, температуры и придонного давления в прибрежных водах залива Посьета. Установлено, что субмезомасштабная изменчивость уровня (периоды $\sim 18, \sim 22, \sim 25, \dots, \sim 47, \sim 94, \sim 107, \dots, \sim 205$ мин) формируется резонансными процессами: нулевой и высшими модами собственных (сейшевых) колебаний модельного бассейна, аппроксимирующего залив, а также шельфовыми сейшами, возбуждаемыми излученными волнами Пуанкаре над прилегающим склоном. Спектры субмезомасштабных пульсаций температуры и бароклинной составляющей придонного давления демонстрируют сходную с уровнем спектральную структуру, что указывает на их общую топографическую природу.

Мезомасштабная изменчивость гидрологических параметров определяется волновыми воздействиями (гармоники M_2) и атмосферными форсингами (квазиинерционные колебания). Ключевой особенностью спектра бароклинного давления является: а) отсутствие максимума на суточной приливной частоте ($\sim 1/25,6 \text{ ч}^{-1}$); б) наличие узкополосных максимумов на частотах, близких к инерционной ($\sim 1/16$ и $1/17 \text{ /ч}^{-1}$).

Доказано, что эти особенности связаны с генерацией и распространением ВВК. Наличие максимумов в спектре придонного давления интерпретировано как результат доплеровского сдвига частоты ВВК в придонном прибрежном потоке, направленном в куттовую часть залива. Это подтверждает эффективность метода регистрации бароклинной составляющей придонного давления для детектирования данного типа волн.

В процессе эволюции волнового поля в его спектре появляются гармоники инерционной частоты, то есть растет его нестационарность. Дальнейшее взаимодействие гармоник формирует у спектра непрерывную зависимость от частоты (частотный континуум) с асимптотикой вида ω^{-3} . Подобная асимптотика впервые задокументирована у спектра пульсаций бароклинной составляющей придонного давления прибрежных вод залива Посьета в представленной статье.

Для выяснения механизмов формирования сходной структуры у субмезомасштабных колебаний уровня, придонного давления и температуры прибрежных вод залива Посьета, а также причины и механизма формирования резонансного пика на частоте $\sim 1/7 \text{ ч}^{-1}$ и широкополосного максимума на частоте $\sim 1/40 \text{ ч}^{-1}$, необходимы дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wilson B. W. Seiches // *Advances in Hydrosience*. London : Academic Press, 1972. Vol. 8. P. 1–94. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-021808-0.50006-1>

2. *Rabinovich A. B.* Seiches and Harbor Oscillations // Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Ed. Y. C. Kim. Singapore : World Scientific Publishers, 2009. Chapter 9. P. 193–236. EDN WWGXHT. http://dx.doi.org/10.1142/9789812819307_0009
3. *Miropol'sky Yu. Z.* Dynamics of internal gravity waves in the Ocean / Ed. O. D. Shishkina. Dordrecht : Springer, 2001. 406 p. (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library ; vol. 24).
4. *Lemmin U.* Internal seiches // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs / L. Bengtsson, R.W. Herschy, R.W. Fairbridge (eds). Dordrecht : Springer, 2012. P. 411–414. (Encyclopedia of Earth Sciences Series). http://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_160
5. Резонансное возбуждение короткопериодных внутренних волн баротропными сейшмами в покрытом льдом мелководном озере / С. Ю. Волков [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 4. С. 407–423. EDN EUVONQ. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-407-423>
6. *Рабинович А. Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1993. 325 с.
7. Собственные колебания уровня воды в бухтах залива Посьета Японского моря / Г. И. Долгих [и др.] // Метеорология и гидрология. 2016. № 8. С. 57–63. EDN WIMTMB.
8. Study of Free Oscillations of Bays in the Northwestern Part of Posyet Bay / V. Chupin [et al.] // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, iss. 8. 1005. EDN ETGQOI. <https://doi.org/10.3390/jmse10081005>
9. Исследование резонансных колебаний в восточной части залива Посьета / С. В. Смирнов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 37–44. EDN YPPJMR.
10. *Thomson R. E., Emery W. J.* Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Amsterdam, Netherlands : Elsevier Science, 2001. 654 p.
11. *Новотрясов В. В.* Возбуждение внутренних волн в неглубоком морском бассейне с открытым входом в условиях параметрического резонанса // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 690–705. EDN ENUJFN.
12. *Манилюк Ю. В., Лазоренко Д. И., Фомин В. В.* Резонансные колебания в системе смежных бухт // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 5. С. 423–436. EDN NJQMMV. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2019-5-423-436>
13. *Baines P. G.* On internal tide generation models // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. 1982. Vol. 29, iss. 3. P. 307–338. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(82\)90098-X](https://doi.org/10.1016/0198-0149(82)90098-X)
14. *Коняев К. В., Сабинин К. Д.* Волны внутри океана. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
15. *Munk W., Wunsch C.* Abyssal recipes II: energetics of tidal and wind mixing // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1998. Vol. 45, iss. 12. P. 1977–2010. EDN ACLLAP. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00070-3)
16. *LeBlond P. H., Mysak L. A.* Waves in the Ocean. Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 602 p. (Oceanographic Series ; vol. 20).
17. *Gill A. E., Clarke A. J.* Wind-induced upwelling, coastal currents and sea-level changes // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1974. Vol. 21, iss. 5. P. 325–345. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(74\)90038-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(74)90038-2)
18. *White W. B.* Doppler shift in the frequency of inertial waves observed in moored spectra // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. 1972. Vol. 19, iss. 8. P. 595–600. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(72\)90042-3](https://doi.org/10.1016/0011-7471(72)90042-3)
19. *Gerkema T., Maas L. R. M., van Haren H.* A note on the role of mean flows in Doppler-shifted frequencies // Journal of Physical Oceanography. 2013. Vol. 43, iss. 2. P. 432–441. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-090.1>
20. *Новотрясов В. В., Ванин Н. С.* Низкочастотные внутренние волны в прибрежной зоне Японского моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 4. С. 557–565.

21. *Новотрясов В. В., Ванин Н. С., Карнаухов А. А.* Проявление нелинейных свойств у внутренних волн Кельвина в прибрежной зоне Японского моря // Известия РАН. Физика Атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 5. С. 673–681. EDN HSCRZF.
22. *Новотрясов В. В., Карнаухов А. А.* О нелинейном взаимодействии внутренних волн в прибрежной зоне Японского моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 2. С. 276–285. EDN JXOTFJ.
23. *Garrett C., Munk W.* Space-time scales of internal waves // *Geophysical Fluid Dynamics*. 1972. Vol. 3, iss. 3. P. 225–264. <https://doi.org/10.1080/03091927208236082>
24. *van Haren, H.* Some observations of nonlinearly modified internal wave spectra // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004. Vol. 109, iss. C3. C03045. <https://doi.org/10.1029/2003JC002136>
25. *Filonov E. A., Lavin M. F.* Internal tides in the Northern Gulf of California // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, iss. C5. 3151. <https://doi.org/10.1029/2002JC001460>

Об авторах:

Новотрясов Вадим Васильевич, ведущий научный сотрудник отдела физики океана и атмосферы, ФГБУН ТОИ ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), доктор физико-математических наук, доцент, **ORCID ID: 0000-0003-2607-9290**, **SPIN-код: 4584-8071**, vadimnov@poi.dvo.ru

Шевченко Георгий Владимирович, зав. лабораторией океанографии, Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) (Россия, 693023, Южно-Сахалинск, ул. Комсомольская, д. 196), ведущий научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693023, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-0785-4618**, **SPIN-код: 8230-2974**, shevchenko_zhora@mail.ru