УДК 551.466.82

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ШЕЛЬФОВЫХ РАЙОНАХ С ИНТЕНСИВНОЙ ПРИЛИВНОЙ ДИНАМИКОЙ

© 2022 г. Е.И. Свергун^{а, b,} *, А. В. Зимин^{а, b}, Д. А. Романенков^а, Е. В. Софьина^{а, c}

^аИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский проспект, д. 36, Москва, 117997 Россия ^bCaнкт-Петербургский государственный университет,

Университетская набережная, д. 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^сРоссийский государственный гидрометеорологический университет,

Воронежская улица, д. 79., Санкт-Петербург, 192007 Россия

*e-mail: Egor-svergun@yandex.ru Поступила в редакцию 13.07.2022 г. После доработки 29.07.2022 г. Принята к публикации 11.08.2022 г.

В работе сравниваются характеристики короткопериодных внутренних волн и механизмы их генерации в юго-западной части Баренцева моря и Авачинском заливе Тихого океана на основе данных экспедиционных исследований, спутниковых наблюдений и современной глобальной баротропной приливной модели. Сопоставление результатов контактных измерений позволило выявить, что в Баренцевом море в районе чередующихся неоднородностей рельефа дна со средней глубиной около 100 м в контактных данных доминируют слабо нелинейные короткопериодные колебания с максимальной амплитудой 4 м. В Авачинском заливе, где присутствует узкий мелководный шельф и крутой материковый склон, на фоне полусуточных внутренних волн регистрируются сильно нелинейные интенсивные внутренние волны с амплитудой до 8 м. По спутниковым данным было выявлено, что в Баренцевом море регистрировались более крупные пакеты проявлений короткопериодных волн, чем в Авачинском заливе, как по длине волны, так и по длине лидирующего гребня. Направления распространения проявлений волн в исследуемых районах характеризуются узким диапазоном изменчивости, что может указывать на доминирование одного механизма генерации. Анализ данных атласа TPXO9 показал схожесть пространственной структуры полусуточной приливной волны в Баренцевом море и в Авачинском заливе, но максимальная скорость приливных течений в Баренцевом море более чем в три раза выше, чем в Авачинском заливе. Оценка критериев генерации внутреннего прилива позволила выявить, что в Баренцевом море в окрестностях района контактных измерений короткопериодные внутренние волны генерируются по типу запрепятственных волн, а в Авачинском заливе – при дезинтеграции внутреннего прилива.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, контактные измерения, спутниковые наблюдения, бароклинный прилив, ТРХО9, Баренцево море, Авачинский залив DOI: 10.31857/S0002351522060165

введение

Изучение процессов генерации, распространения и диссипации внутреннего прилива является актуальной задачей океанологии, которая решается исследователями с привлечением контактных измерений, спутниковых наблюдений и математического моделирования [1–6]. Считается, что при распаде внутреннего прилива часто генерируются короткопериодные внутренние волны (КВВ) с длинами порядка сотен метров [7], которые в арктических и субарктических регионах обычно приурочены к ядру сезонного пикноклина. КВВ могут принимать вид интенсивных внутренних волн (ИВВ) с амплитудой более 5 м и значительной нелинейностью [8]. ИВВ приливного генезиса значительно трансформируют структуру гидрологических полей и активно изучаются в различных районах Мирового океана [9–13]. КВВ способны перераспределять концентрации биогенов и фитопланктона [14–16], что в конечном результате сказывается на распределении промысловых скоплений гидробионтов [17]. К районам активной добычи рыбных ресурсов с приливной динамикой у побережья РФ относятся юго-западная часть Баренцева моря и тихоокеанская акватория полуострова Камчатка. Данные районы отличаются рельефом дна, широтой места, типом и силой прилива, а также вертикальной структурой вод. При этом в каждом из районов часто регистрируются проявления КВВ [18, 19].

Около северного побережья Кольского полуострова мористее мыса Святой Нос в Баренцевом море по данным контактных наблюдений ранее были зарегистрированы ИВВ с амплитудой до 6 м [20], которые генерировались в переходную фазу прилива, когда отмечалось наибольшее приливное течение. В работе [21] по результатам анализа архива спутниковых данных Envisat ASAR за летний период 2007–2011 годов было продемонстрировано, что район около мыса Святой Нос характеризуется частой встречаемостью проявлений КВВ, которые зачастую распространяются как последовательные пакеты с приливной периодичностью. Результаты математического моделирования [22] демонстрируют возможность генерации ИВВ с амплитудами до 12 м при взаимодействии баротропной приливной волны с областью больших градиентов глубин.

На акватории Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка установлено присутствие разрозненных ярко-выраженных проявлений КВВ по данным спутников Алмаз-1 и Terra/ASTER [23, 24]. Результаты контактных наблюдений в Авачинском заливе позволили выявить ИВВ с амплитудами до 8 м, которые проявляются с приливной периодичностью [25, 26]. Синхронные авиационные и судовые наблюдения в Кроноцком заливе Тихого океана [27], смежном с Авачинским заливом, демонстрируют сложную картину цугов КВВ на шельфе залива и в открытом океане. В работе делается вывод о возможности генерации КВВ в открытой части залива при распространении луча внутреннего прилива.

Практически все упомянутые выше работы демонстрируют связь КВВ в рассматриваемых районах с приливной динамикой. Однако не существует исследования, которое с привлечением контактных и спутниковых данных сравнивало характеристики КВВ и их механизмы генерации в данных районах с различной приливной динамикой и рельефом дна и устанавливало конкретные механизмы генерации КВВ в данных районах. Эти сведения являются значимыми для понимания закономерностей возникновения КВВ, а при сопоставлении с фоновыми гидрологическими и гидробиологическими данными, могут быть использованы при поиске рыбных скоплений. Кроме того, динамика баротропного прилива в Авачинском заливе по современным данным не описана, хотя знание ее особенностей необходимо для анализа механизмов генерации KBB.

Цель данной работы — на основе данных экспедиционных исследований, спутниковых наблюдений и современной глобальной приливной модели сравнить характеристики КВВ и их механизмы генерации в юго-западной части Баренцева моря и Авачинском заливе Тихого океана.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

1.1 Контактные измерения

В Баренцевом море судовые наблюдения выполнялись в августе 2016 года севернее мыса Святой нос. Глубины в зоне проведения наблюдений составляли 150-200 м, (рис. 1а). В период с 9 по 22 августа на полигоне были произведены учащенные повторяющиеся зондирования (сканирования) водной толщи от поверхности до заданного горизонта (50 м) с дрейфующего судна с помощью CTD-зондов CastAway (США) и SBE-25 (США). Один цикл сканирования "спуск-подъем" зонда занимает 1-2 мин (при глубине зондирования до 50 м). Эти измерения имели продолжительность 5-12 ч за сутки, а общее время сканирований составило 80 ч. Перед началом измерений судно всегда выходило в одну и ту же точку, показанную на рис. 1а. Судно удалялось от исходной точки не более чем на несколько морских миль, а скорость дрейфа не превышала 0.25 узла.

Экспедиционные исследования в Авачинском заливе Тихого океана выполнены в августе – сентябре 2018 г. на полигоне над материковым склоном близ м. Шипунского, характеризующемся глубинами от 150 до 1000 м (рис. 16). Измерения выполнялись с судна, лежащего в дрейфе. Для измерений использовалась гирлянда РМЕ (Великобритания), состоящая из 26 температурных датчиков и датчика давления на нижнем конце, с расстоянием между датчиками 2 м, и общей длиной 50 м. Датчики регистрировали температуру с точностью $\pm 0.05^{\circ}$ С. Суммарная продолжительность измерений на полигоне составляла 44 ч, при этом каждый эпизод измерений имел продолжительность от 6 до 18 ч.

Рисунки 1а и 16 демонстрируют существенное различие рельефа дна в районах проведения измерений в Баренцевом море и в Авачинском заливе. В районе мыса Святой Нос присутствуют чередующиеся банки и подводные каньоны со средним перепадом глубин около 50 м и сред-



Рис. 1. Рельеф дна в районах проведения экспедиционных работ (символ "×" указывает положение точек контактных измерений): (а) Баренцево море; (б) Авачинский залив. Черные кривые отображают положение лидирующих гребней проявлений КВВ по данным из работ [19, 26].

ним уклоном дна около 4 м/км. В окрестностях точки измерений у мыса Шипунский выделяется континентальный шельф шириной около 26 км и материковый склон со средним уклоном дна около 100 м/км.

По результатам измерений производилось построение записей колебаний изотерм. Амплитуды и периоды КВВ определялись по выделенной на записи изотерме в области термоклина по методике из [28]. В теплый период года в исследуемых районах Баренцева моря и Авачинского залива положения термоклина и пикноклина совпадают [29, 26]. Это означает, что колебания изотермы, выделенной в области термоклина, будут с достаточной степенью точности отражать колебания пикноклина.

Рассчитывалась перемежаемость внутреннего волнения как отношение времени существования короткопериодных колебаний термоклина к общему времени наблюдений отдельно для фазы роста и спада приливного уровня по данным атласа ТРХО9 [30].

Для расчета вероятных характеристик интенсивных внутренних волн использовался метод, изложенный в работе [31], с помощью которого были получены ожидаемые амплитуды волн за 10 и 30 дней в предположении о стационарности фоновых условий.

В работах [19, 26] было продемонстрировано, что вертикальная структура вод в исследуемых районах близка к картине двухслойной стратификации, тогда фазовая скорость внутренних волн может быть определена исходя из дисперсионного соотношения в приближении двухслойной стратификации [7]:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{1}{\operatorname{cth}(kh_{\mathrm{l}}) + \operatorname{cth}(k(H - h_{\mathrm{l}}))}},$$
(1)

где: *g* – ускорение свободного падения, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1$, ρ_2 – плотность нижнего слоя, ρ_1 – плотность верхнего слоя, $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$, h_1 – толщина верхнего слоя, H – глубина места.

В ходе контактных измерений прямо не определялась длина волны, поэтому выражение (1) нельзя использовать для определения фазовой скорости в представленном виде. Согласно [19, 26] в исследуемых районах длина волны, определенная по спутниковым данным, приблизительно в 5 превышает глубину места, что позволяет переписать выражение (1) в приближении мелкой воды [7]:

$$c = \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{h_{\rm l}(H - h_{\rm l})}{h_{\rm l} + (H - h_{\rm l})}}.$$
(2)

По методике из [32] рассчитывались параметр нелинейности α , дисперсии β , а также параметр Урселла σ^2 , показывающий вклад нелинейности и дисперсии в КВВ (если он меньше 12, то дисперсия преобладает над нелинейностью, если больше 12, то нелинейность над дисперсией):

$$\alpha = \frac{3}{2}c \frac{1 - h_1/h_2}{h_1},$$
(3)

где: c — фазовая скорость внутренних волн, определяемая по выражению (2), h_2 — толщина нижнего слоя.

$$\beta = \frac{ch_1h_2}{6},\tag{4}$$

$$\sigma^2 = \frac{\alpha}{\beta} \eta (\lambda/2)^2, \qquad (5)$$

где: η – амплитуда КВВ, λ = *cT*, *T* – средний период КВВ. Для расчета использовалась средняя и максимальная наблюдаемая амплитуда КВВ.

Кроме того, производился расчет спектра вертикальных смещений изотермы, выделенной в области термоклина, который сравнивался с теоретическим распределением спектра Гаррета-Манка [33].

1.2 Спутниковые наблюдения

Использовались характеристики поверхностных проявлений КВВ в Баренцевом море и Авачинском заливе из работ [19, 26]. В Баренцевом море проявления КВВ регистрировались на снимках с аппаратов Sentinel 1А и 2А с пространственным разрешением 40 м, а также с аппарата ALOS-2 PALSAR-2 с пространственным разрешением 25 м. Всего было использован 21 снимок, полностью охватывавший район в радиусе 100 км от точки измерений по пространству и перекрывающих период работ по времени. В Авачинском заливе использовались снимки Sentinel 2A и Sentinel 2B в оптическом диапазоне с пространственным разрешением 10 м; Landsat 8 в оптическом диапазоне с разрешением 30 м, Sentinel 1А с разрешением 20 м. Всего было использовано 9 спутниковых изображений. На спутниковых изображениях проявления КВВ регистрировались визуально как чередующиеся темные и светлые дугообразные полосы. Определялись по методике [18] такие характеристики как: положение поверхностного проявления КВВ, длина лидирующего гребня, количество волн в пакете, длина волны, направление распространения. Аналогично работе [34] с использованием значений длин волн, непосредственно измеренных на снимках по выражению (1), определялась фазовая скорость внутренних волн, которая сравнивалась со значением, полученным по контактным данным в соответствии с выражением (2).

1.3 Данные моделей

Данные о приливных колебаниях уровня моря и течениях получены из атласа ТРХО9. По ним были рассчитаны средние за приливной цикл потоки приливной энергии F_x и F_y а также скорость диссипации приливной энергии придонным трением ε [5]:

$$F_{x} = \frac{1}{2}\rho g Hau \cos(\varphi - \varphi_{u}),$$

$$F_{y} = \frac{1}{2}\rho g Hav \cos(\varphi - \varphi_{v}),$$

$$\varepsilon = \frac{k\rho}{T} \int_{0}^{T} (U^{2}(t) + V^{2}(t))^{3/2} dt,$$
(6)
(7)

где: *р* – стандартная плотность морской воды, равная 1024 кг/м³, *а* – амплитуда приливного уровня, φ – фаза приливного уровня, *и* – зональная составляющая скорости приливного течения, ф, – фаза зональной составляющей скорости приливного течения, у – меридиональная составляющая скорости приливного течения, $\phi_v - \phi$ аза меридиональной составляющей скорости приливного течения, к – коэффициент донного трения, принимаемый равным 0.0026, Т – приливной период, $U(t) = u\cos(\omega t - \varphi_u)$ – мгновенная зональная составляющая скорости приливного течения во время $t, \omega = 2\pi/T$ – приливная циклическая частота, $V(t) = v \cos(\omega t - \phi_v)$ — мгновенная меридиональная составляющая скорости приливного течения во время t.

Выполнялся анализ связи положений поверхностных проявлений КВВ и очагов генерации внутренних приливных волн (ВПВ), выявляемых по критерию tidal body force, который впервые был введен в работе [35] для линеаризованных двухмерных (в вертикальном плане) уравнений движения. В настоящей работе расчет производился по формуле, обобщенной для трехмерного случая, согласно [36]:

$$TBF = \frac{2\pi N^2}{\omega} \left[Q_x \frac{\partial H}{\partial x} + Q_y \frac{\partial H}{\partial y} \right], \tag{8}$$

где: N^2 – частота Вяйсяля-Брента (плавучести), Q_x и Q_y – амплитуды зональной и меридиональной составляющих приливного потока, $\frac{\partial H}{\partial x}$ и $\frac{\partial H}{\partial y}$ – зональные и меридиональные градиенты глубины.

Градиент глубин в Баренцевом море и Авачинском заливе определялся по батиметрии ETOPO1 [37]. Частота плавучести определялась по среднемесячным полям температуры и солености морской воды из реанализа [38]. Из данного реанализа также выбирались среднемесячные поля фоновых течений для Авачинского залива. Для определения интенсивности топографической генерации ВПВ рассчитывалось отношение наклона дна (модуля градиента глубины места) к наклону характеристик ВПВ [39]:

$$\mu = dH / \left(\frac{\omega^2 - f^2}{N^2 - \omega^2}\right),\tag{9}$$

где: $dH = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2}, f = 2\Omega \sin\varphi, \Omega - \text{угло-$

вая скорость вращения Земли, φ – широта места.

Топографический наклон считается докритическим, если отношение наклона дна к наклону характеристик ВПВ <1, критическим, отношение =1, и сверхкритическим, если отношение >1. Наиболее интенсивная генерация ВПВ происходит при критическом топографическом наклоне.

Для определения режима внутреннего прилива в точках контактных наблюдений выполнялся расчет внутреннего числа Фруда [40]:

$$Fr = \frac{V_m}{c},\tag{10}$$

где: $V_m = \sqrt{u^2 + v^2}$.

Если число Фруда <1, то внутренний прилив характеризуется докритическим режимом. При числе Фруда ≥1 наблюдается критический и суперкритический режим, соответственно. При критическом режиме происходит генерация КВВ по механизму запрепятственных волн.

2. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КВВ В ШЕЛЬФОВЫХ ПРИЛИВНЫХ РАЙОНАХ

2.1 Характеристики КВВ по данным контактных наблюдений

Характерные профили вертикального распределения плотности для районов измерений в Баренцевом море и Авачинском заливе представлены на рис. 2а.

Распределение плотности в районах проведения измерений близко к картине двухслойной стратификации (рис. 2а), что позволяет использовать для расчета фазовой скорости КВВ дисперсионное соотношение в двухслойном приближении. Толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) в Авачинском заливе значительно больше, чем в Баренцевом море (30 м против 10 м), при этом градиенты плотности в пикноклине приблизительно равны и составляют около 0.12 у.е. м⁻¹. Равенство градиентов плотности на полигонах измерений позволяет производить непосредственное сравнение характеристик КВВ, несмотря на то, что экспедиционные измерения были выполнены в разные месяцы.

На рис. 26 и 2в показаны записи колебаний изотерм, совмещенные с векторной диаграммой хода приливных течений для Авачинского залива и Баренцева моря, соответственно. Рисунок 26 демонстрирует, что в Баренцевом море доминирующими являются короткопериодные колебания с периодом от 8 до 15 мин и амплитудой до 2.5 м. Полусуточная изменчивость положения изотерм наблюдается в слое 35-50 м и слабо выражена. Около 05:00 по локальному времени отмечается увеличение амплитуд KBB относительно промежутка времени с 02:00 до 05:00, при этом величина приливного течения максимальна. В остальной временной промежуток связь короткопериодных колебаний с ходом вектора приливных течений слабо выражена.

На рис. 2в видно, что в Авачинском заливе в слое от 20 до 40 м прослеживаются длиннопериодные колебания изотерм с амплитудой до 10 метров, обусловленные полусуточной приливной динамикой. На фоне полусуточных колебаний изотерм ярко выделяются КВВ с периодом около 15 мин и амплитудой до 4 метров, которые охватывают слой от 5 до 40 м. Около 10:00 по ло-кальному времени был зарегистрирован цуг ИВВ, состоящий из трех волн с периодом около 10 минут. При этом первая волна в цуге имеет амплитуду 8 м, а замыкающая – 6 м. Данный цуг был зарегистрирован в фазу сильных приливных течений.

В табл. 1 показаны характеристики КВВ в Баренцевом море и Авачинском заливе по данным контактных измерений.

Из табл. 1 видно, что средний период и фазовая скорость КВВ в Баренцевом море и Авачинском заливе практически совпадают. Существенные различия состоят в наблюдаемой и ожидаемой амплитуде волн. Так, в Баренцевом море за период наблюдений не были зарегистрированы ИВВ, а расчет ожидаемых амплитуд волн показал, что ИВВ с амплитудой 5 м могут ожидаться 1 раз за 30 дней. Выполненные ранее измерения в данном районе [20] свидетельствуют о регистрации ИВВ амплитудой до 6 метров на расстоянии около 1 мили от берега. В настоящем исследовании измерения выполнялись мористее. В Авачинском заливе ИВВ с амплитудой до 8 метров регистрировались 6 раз за весь период наблюдений, а 1 раз за месяц может ожидаться волна с амплитудой до 12 м. Перемежаемость внутреннего волнения в Баренцевом море не зависит от фазы прилива и составляет 45%. В Ава-



Рис. 2. КВВ по контактным данным: (a) характерные профили вертикального распределения плотности по данным CTD-зондирований в Баренцевом море (от 09 августа 2016) и в Авачинском заливе (от 05 сентября 2018); (б) запись колебаний изотерм и ход приливных течений гармоники M2 для Баренцева моря; (в) запись колебаний изотерм и ход приливных течений гармоники M2 для Авачинского залива.

чинском заливе перемежаемость КВВ в фазу прилива достигает 90%, а в фазу отлива – 83%, что также, как и в Баренцевом море, указывает на отсутствие зависимости характеристик КВВ от фазы прилива. Но если в Баренцевом море КВВ регистрируются на протяжении приблизительно половины времени измерений, то в Авачинском заливе на протяжении практически всего времени измерений. Параметр Урселла свидетельствует о том, что в волнах от 3 до 4 м в Баренцевом море и в Авачинском заливе дисперсия преобладает над нелинейностью. Внутренние волны амплитудой 4 м в Баренцевом море являются слабо нелинейными, а волны около 8 м в Авачинском заливе являются сильно нелинейными. Это указывает на высокую вероятность обрушения интенсивных волн, что может приводить к интенсификации вертикального обмена в водной толще.

Спектр, рассчитанный по вертикальным колебаниям изотерм в слое пикноклина, сравнивался с высокочастотной частью теоретического спектра Гаррета-Манка (рис. 3).

Нижняя граница диапазона изменчивости частоты колебаний изотерм одинакова в Баренцевом море и в Авачинском заливе и составляет около 0.15 цикла в час. В диапазоне частот от 0.15 до 2.5 циклов/час энергия колебаний в Баренцевом море ниже, чем в Авачинском заливе, при этом она не превышает энергию теоретического

(a) (б) 1000 1000 Спектр смещений изотермы 7°С Спектр Гаррета-Манка 100 100 $E(\omega), M^2 H$ 10 10 $E(\omega), M^2 H$ 1 1 0.1 0.1 Спектр смешений изотерм Спектр Гаррета-Манка 0.01 0.01 10 0.1 0.110 1 1 Частота (ω), циклов/ч Частота (ш), циклов/ч

Рис. 3. Спектр вертикальных смещений изотерм в слое пикноклина, совмещенный с теоретическим спектром Гаррета-Манка: (а) по результатам измерений в Баренцевом море; (б) по результатам измерений в Авачинском заливе.

спектра Гаррета-Манка. В Авачинском заливе энергия колебаний практически на всех частотах выше, чем энергия спектра Гаррета-Манка. Это можно объяснить наличием в Авачинском заливе более интенсивного внутреннего волнения, а именно ВПВ с амплитудой до 10 м и цугов КВВ с высокой перемежаемостью. Можно предположить, что в Авачинском заливе спектр колебаний термоклина в большей степени обогащается на частотах выше 1 цикла/ч вследствие диссипации ВПВ.

2.2 Характеристики КВВ по данным спутниковых наблюдений

По данным анализа РЛИ в Баренцевом море наблюдается сложная картина проявлений цугов КВВ (см. рис. 1а). Выделяется две группы проявлений КВВ: в прибрежной зоне и в мористой части района (назовем ее вдольбереговой группой). Средняя глубина над которой регистрируются проявления составляет 120 м, а максимальная — 200 метров. В Авачинском заливе положение проявлений КВВ приурочено к мате-

Таблица 1.	Сравнение	характеристик	КВВ, получен	ных по данным	и контактных н	аблюдений в I	Баренцевом мо	pe
и Авачинс	ском заливе							

	Характеристика	Баренцево море	Авачинский залив
Наблюдаемая	Средняя	1.5	2
амплитуда, м	Максимальная	4	8
Ожидаемая амплитуда, м	За 10 дней	4.5	10
	За 30 дней	5	12
Средний период, мин		6	8
Перемежаемость, %	Прилив	45	90
	Отлив	45	83
Фазовая скорость, м с $^{-1}$		0.57	0.65
Параметр Урселла	Для средней наблюдаемой амплитуды	5	7
	Для максимальной наблюдаемой амплитуды	15	28

Характ	еристика	Баренцево море	Авачинский залив	
Общее количество проявле	сний	93	72	
Кол-во волн в пакете	Среднее	3	3	
	Максимальное	12	14	
Длина волны, м	Средняя	800	400	
	Максимальная	1900	800	
Длина лидирующего	Средняя	26	14	
гребня, км	Максимальная	50	39	
Фазовая скорость, м/с	•	0.51	0.6	

Таблица 2. Сравнение характеристик проявлений КВВ по данным спутниковых наблюдений в Баренцевом море и Авачинском заливе

риковому склону между изобатами 200 и 800 м, а также к отмели около м. Шипунский, то есть проявления КВВ наблюдаются на довольно узком участке акватории (см. рис. 1б). Незначительное число проявлений зарегистрировано над глубинами, превышающими 2000 м. В табл. 2 представлены характеристики зарегистрированных проявлений КВВ.

Хотя количество волн в пакете для обоих районов является одинаковым, в Баренцевом море по сравнению с Авачинским заливом регистрировались более крупные пакеты как по длине лидирующего гребня, так и по длине волн. Одним из объяснений этого факта может являться то, что глубина залегания пикноклина в Баренцевом море была значительно меньше, чем в Авачинском заливе, что определяет более благоприятные условия для отображения КВВ на морской поверхности. Фазовая скорость КВВ, рассчитанная по данным измерений длины волны на снимках с привлечением данных о вертикальном распределении плотности, в Авачинском заливе и в Баренцевом море имеет схожие значения и совпадает с результатами расчетов по данным контактных наблюдений. Это косвенно подтверждает, что регистрируемые на морской поверхности сигнатуры действительно являются отображением КВВ.

На рис. 4а и 4б показаны круговые гистограммы повторяемости направлений распространения проявлений КВВ в Баренцевом море и Авачинском заливе.

В Баренцевом море преобладает два направления распространения проявлений КВВ: вдоль берега на север-запад и от берега на северо-восток. Эти направления четко соответствуют выделенным группам проявлений: прибрежной и вдольбереговой. В Авачинском заливе преобладающее большинство проявлений КВВ распространяются практически строго на север в сторону мыса Шипунского. В Баренцевом море, как и в Авачинском заливе направления распространения находятся в довольно узком диапазоне изменчивости, что может свидетельствовать о доминировании одного из механизмов (источников) генерации КВВ.

2.3 Анализ данных моделей

Согласно [29] в Баренцевом море в колебаниях уровня доминирует правильный полусуточный М2 прилив, а в Авачинском заливе – неправильный суточный [41]. КВВ в основном генерируются при взаимодействии приливного течения с пикноклином. По условию сравнимости [42] характер приливных течений по данным атласа ТРХО9 в окрестности точки контактных измерений в Авачинском заливе близок к неправильному полусуточному. Поэтому для анализа приливной динамики в Баренцевом море и Авачинском заливе будет использована гармоника М2.

На рис. 5 показаны приливная карта (амплитуды и котидали колебаний уровня), приливные эллипсы и энергетические характеристики полусуточного прилива в Баренцевом море.

Структура приливной карты, преобладающее направление эллипсов и потоков энергии (рис. 5) указывает, что приливная полусуточная волна в данной области распространяется вдоль берега, при этом берег остается справа. Такое распространение характерно для волн Кельвина в северном полушарии. Максимальная скорость приливных течений достигается в юго-восточной части области и составляет более 1 м/с, а в районе измерений — около 60 см/с. Учитывая,



Рис. 4. Круговые гистограммы повторяемости направлений распространения проявлений КВВ (а) в Баренцевом море; (б) в Авачинском заливе.

что значение фазовой скорости внутренних волн 0.57 м/с, согласно выражению (10), внутреннее число Фруда для района измерений ≈ 1 , то есть для внутреннего прилива характерен критический режим.

На рис. 6 показаны приливная карта, приливные эллипсы и энергетические характеристики полусуточного прилива в Авачинском заливе.

Структура приливной карты, преобладающее направление эллипсов и потоков энергии (рис. 6) указывает на то, что приливная полусуточная волна в Авачинском заливе, как и в Баренцевом море, является волной Кельвина. Однако на шельфе около м. Шипуский изгиб котидалей может указывать на дифракцию приливной волны. Скорости приливных течений практически всюду незначительны, лишь на шельфе около мыса Шипунский наблюдается усиление приливных течений. Их скорости здесь достигают 30 см/с. При фазовой скорости КВВ около 0.65 см/с, внутренний прилив в данной области будет характеризоваться докритическим режимом вне зависимости от фазы приливного цикла.

Рисунки 7а и 76 демонстрируют композитные карты проявлений КВВ с отношением наклона дна к наклону характеристик ВПВ в Баренцевом море и Авачинском заливе, соответственно. На рис. 7в и 7г показаны композитные карты проявлений КВВ с интегральным по глубине значением tidal body force для гармоники M2 в Баренцевом море и Авачинском заливе. В Баренцевом море группа прибрежных проявлений КВВ не связана с областью критического топографического наклона (рис. 7а). Вдольбереговая группа проявлений расположена рядом с областью критического топографического наклона, но не на одной линии с ней. Таким образом, не удается выявить связь положений проявлений КВВ с областями топографической генерации ВПВ. Прибрежная группа проявлений КВВ находится на одной линии с областью повышенных значений tidal body force (рис. 7в), тогда как вдольбереговая группа не связана с областями повышенных значений критерия.

В Авачинском заливе (рис. 76) доминирует сверхкритический топографический наклон, но выделяются локальные области критического наклона в глубоководной части залива и на шельфе полуострова Шипунский, в которых может происходить интенсивная топографическая генерация ВПВ. Крупное скопление проявлений, зарегистрированных над материковым склоном юго-восточнее мыса Шипунский (рис. 7г), находится в области повышенных значений критерия tidal body force.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно [40] можно выделить основные механизмы генерации КВВ:

1. Образование волн по типу запрепятственных, которые распространяются в противопо-



Рис. 5. Динамические и энергетические характеристики M2 прилива в Баренцевом море: (а) амплитуды и котидали колебаний уровня и эллипсы приливных течений; (б) поток приливной энергии и скорость диссипации приливной энергии вследствие донного трения. Сплошные изолинии глубины проведены через 50 метров до глубины 300 м.



Рис. 6. Динамические и энергетические характеристики М2 прилива в Авачинском заливе: (а) амплитуды и котидали колебаний уровня и эллипсы приливных течений; (б) поток приливной энергии и скорость диссипации приливной энергии вследствие донного трения. Сплошные изолинии глубины проведены через 500 м до глубины 3000 м.

ложную сторону от приливного течения, набегающего на неоднородности морского дна типа кромки шельфа или изолированного поднятия дна. Генерация КВВ наблюдается при критическом режиме приливного потока, индикатором которого может выступать внутреннее число Фруда.

2. Эволюция внутреннего прилива, при которой генерация КВВ происходит при дезинтеграции ВПВ в пакеты КВВ. В таком случае для выявления мест генерации КВВ можно использовать критерии генерации ВПВ, например, "tidal body force" [35]. Очаги генерации идентифицируются по максимальному значению критерия [36, 43].

3. Лучевой механизм генерации, при котором взаимодействие луча энергии внутренней приливной волны первой моды с пикноклином вызывает образование КВВ. Луч приливной энергии возникает над областью критического наклона дна, отражается от морского дна и морской поверхности и взаимодействует с пикноклином на большом расстоянии от континентального шельфа.

4. Резонансная генерация, при которой КВВ образуются в узкостях или над неоднородностями рельефа дна при наличии критического или



Рис. 7. Композитные карты проявлений КВВ с критериями генерации внутреннего прилива: (а) отношением наклона дна к наклону характеристик ВПВ гармоники М2 в Баренцевом море; (б) отношением наклона дна к наклону характеристик ВПВ гармоники М2 в Авачинском заливе; (в) интегральная по глубине величина tidal body force для гармоники М2 в Авачинском заливе.

сдвигового потока. При схожести с механизмом в пункте 1, отличительной особенностью является наличие сдвигового в вертикальном плане потока, к тому же начальное возмущение формируется не вертикальным поднятием дна, а горизонтальным топографическим сужением.

5. Генерация внутренних волн речными плюмами. При распространении плюма происходит замедление потока и его переход из суперкритического режима в докритический. При этом КВВ, которые возникают при взаимодействии лидирующей кромки плюма с пикноклином, излучаются в виде свободно распространяющихся волн.

В Баренцевом море лучевой механизм генерации, по-видимому, нереализуем из-за слож-

ного рельефа дна с многочисленными неоднородностями при относительно малых глубинах. В Авачинском заливе, с одной стороны, нельзя исключать лучевой механизм генерации, поскольку были выявлены области критической топографии, откуда могут распространяться лучи внутреннего прилива (рис. 76). Но с другой стороны, острый угол между направлением распространения проявлений КВВ и изобатами (рис. 16) указывает на то, что действие лучевого механизма маловероятно.

В окрестностях мыса Святой Нос и в Авачинском заливе нет крупных рек, поэтому механизм, описанный в пункте 5 нереализуем.

Как было показано ранее в разделе 2.3, вдольбереговая группа проявлений КВВ в Баренце-

вом море не связана с районами генерации больших ВПВ. Учитывая, что данные пакеты распространяются из области локального поднятия дна в направлении, противоположном набегающему приливному течению, можно предположить, что в данном случае наиболее вероятен механизм образования запрепятственных волн. В пользу данного вывода свидетельствует то, что значение числа Фруда в точке наблюдений близко к единице, а значит приливное течение характеризуется критическим режимом. Косвенно подтверждает данный вывод отсутствие полусуточной изменчивости положения изотерм, связанной с ВПВ, на записях колебаний температуры. В работе [44] был сделан вывод, что в проливе Карские ворота, схожем по морфометрическим условиям и приливной динамике с рассматриваемым районом, КВВ генерируются по типу запрепятственных волн. Однако около мыса Святой Нос возможен и резонансный механизм генерации, поскольку в области, откуда распространяются пакеты проявлений, присутствует узкий подводный каньон (рис. 1а).

Прибрежная группа проявлений КВВ связана с областью повышенных значений критерия tidal body force (рис. 7в). Можно предположить, что КВВ могут образовываться в результате дезинтеграции ВПВ. Согласно [20], в прибрежной области были зарегистрированы полусуточные ВПВ с амплитудами от 1 до 5 м в зависимости от фазы сизигийно-квадратурного цикла, на фоне которых регистрируются короткопериодные ИВВ с амплитудами до 6 м. Короткопериодные волны интенсифицируются при переходе от большой воды к малой. Наличие ВПВ и ИВВ в данных измерений может являться дополнительным подтверждением выявленного механизма генерации КВВ в прибрежной зоне.

В Авачинском заливе подавляющая часть проявлений КВВ находится в области повышенных значений критерия tidal body force (рис. 7г). Наиболее вероятным механизмом генерации КВВ является дезинтеграция ВПВ в условиях нелинейности. Подтверждением данного вывода служит наличие выраженных ВПВ в записях колебаний температуры, а также докритический режим приливного течения. Однако вызывает вопрос отсутствие проявлений КВВ в области генерации ВПВ на шельфе поблизости Кроноцкого залива (см. рис. 7г), несмотря на обеспеченность данного района спутниковыми снимками. В работе [45] отмечается, что в Кроноцком и Авачинском заливах в поле фоновых непериодических течений могут присутствовать крити-

ческие зоны, приводящие к захвату волн. Среднемесячная скорость непериодических течений на границе шельфа в области полуострова Шипунский по данным реанализа достигает в сентябре 2018 года 70 см/с. Вполне вероятно, что данная зона может быть "барьером" для распространения внутренних волн. Что касается глубоководной части залива, здесь регистрируется малое количество проявлений КВВ. Их положение хаотично и не связано с областями повышенных значений tidal body force (рис. 7в). Можно предположить, что они возникают при взаимодействии меандров Камчатского течения, которые широко распространены в данном районе [46], с мелко залегающим пикноклином. Такой механизм генерации был описан в [47].

Полученные результаты справедливы для рассматриваемых локальных областей Баренцева моря и Курило-Камчатского региона. Возникает вопрос, характерны ли различия в характеристиках КВВ и справедливы ли выводы о механизмах генерации для Баренцева моря и Курило-Камчатского региона в целом?

По результатам анализа архива из более чем 4000 РЛИ за 2019 год для Баренцева моря и Курило-Камчатского региона были выявлены районы регулярной встречаемости проявлений КВВ. На рис. 8 приведены карты частоты встречаемости, которая рассчитывалась как отношение количества проявлений КВВ к количеству РЛИ в ячейках с размером 0.46° по долготе и 0.32° по широте для акватории Курило-Камчатского региона и 1° по долготе и 0.3° по широте для Баренцева моря. Частота встречаемости была нормализована на максимум.

Проявления КВВ на РЛИ обнаружены в Баренцевом море с июня по сентябрь 2019 года, а на акватории Курило-Камчатского региона – практически в течении всего года. Наряду с другими, районы измерений около мыса Святой Нос в Баренцевом море и около мыса Шипунский в Курило-Камчатском регионе являются районами регулярной встречаемости проявлений. Прояснить различия характеристик и механизмов генерации КВВ на столь различных по рельефу дна регионах помогут дальнейшие исследования с применением комплексного подхода с прямым сопоставлением данных синхронных контактных и спутниковых наблюдений, а также результаты моделирования.



Рис. 8. Нормализованная частота встречаемости проявлений КВВ: (а) в Баренцевом море; (б) на акватории Курило-Камчатского региона. Прямоугольником отмечены районы контактных измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были продемонстрированы различия характеристик КВВ в районах с интенсивной приливной динамикой в Баренцевом море и Авачинском заливе. В Баренцевом море в районе неоднородностей рельефа дна со средней глубиной около 100 м по контактным данным доминируют короткопериодные колебания с максимальной амплитудой 4 м. Расчет ожидаемых амплитуд волн показал, что 1 раз за месяц может наблюдаться ИВВ с амплитудой 5 м. В Авачинском заливе, где присутствует узкий мелководный шельф и крутой материковый склон, на фоне полусуточных внутренних волн регистрируются ИВВ с амплитудой до 8 м, а один раз в месяц можно ожидать ИВВ с амплитудой до 12 м. В Авачинском заливе короткопериодные колебания имеют более высокую энергию, чем в Баренцевом море, и превышают энергию теоретического спектра Гаррета-Манка.

Как в Баренцевом море, так и в Авачинском заливе направления распространения находятся в довольно узком диапазоне изменчивости, что может указывать на доминирование одного из механизмов генерации КВВ.

Было показано, что приливная динамика в Баренцевом море интенсивнее, чем в Авачинском заливе. В Баренцевом море по всему рассматриваемому региону наблюдаются высокие скорости течений от 40 см/с. Для Авачинского залива была впервые продемонстрирована структура и энергетика баротропного прилива по данным современного глобального атласа ТРХО9. Было выявлено, что на акватории Авачинского залива приливные скорости течения незначительны, и лишь над материковым склоном и континентальным шельфом в окрестностях м. Шипунский они усиливаются до значений 20–30 см/с. Можно предположить, что данная область является зоной "фокусирования" приливной энергии, вероятно именно это нашло отражение в наблюдаемых оценках спектра короткопериодных колебаний.

По данным анализа критериев генерации внутреннего прилива с привлечением приливного атласа ТРХО9 были выявлены возможные механизмы генерации КВВ. В Баренцевом море наиболее вероятным механизмом генерации является образование КВВ при обтекании приливным потоком неоднородностей рельефа дна по типу запрепятственных волн. В Авачинском заливе вероятен механизм дезинтеграции ВПВ в пакеты КВВ.

Анализ значительного массива спутниковых данных показал, что рассматриваемые районы являются зонами регулярной встречаемости проявлений КВВ. Более детально изучить механизмы генерации КВВ в областях их частой встречаемости помогут исследования в других районах Баренцева моря и тихоокеанского шельфа Курило-Камчатского региона, выделенных по спутниковым данным.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2021-0014 (обработка данных контактных измерений) и гранта РФФИ № 20-35-90054 Аспиранты (обработка спутниковых данных и анализ критериев генерации внутреннего прилива).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Merrifield M.A., Holloway P.E., & Johnston T.M. The generation of internal tides at the Hawaiian Ridge // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. № 4. P. 559–562.
- 2. Jachec S.M., Fringer O.B., Gerritsen M., & Street R.L. Numerical simulation of internal tides and the resulting energetics within Monterey Bay and the surrounding area. Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. L12605.
- Alford M.H., MacKinnon J.A., Zhao Z., Pinkel R., Klymak J.M., & Peacock T. Internal waves across the Pacific // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. L24601.
- Xie X., Cuypers Y., Bouruet-Aubertot P., Ferron B., Pichon A., Lourenço A., & Cortes N. Large-amplitude internal tides, solitary waves, and turbulence in the central Bay of Biscay // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40. P. 2748–2754.
- Subeesh M.P., Unnikrishnan A.S., Francis P.A. Generation, propagation and dissipation of internal tides on the continental shelf and slope off the west coast of India // Continental Shelf Research. 2021. V. 214. 104321.
- Purwandana A., Cuypers Y., Bouruet-Aubertot P. Observation of internal tides, nonlinear internal waves and mixing in the Lombok Strait, Indonesia // Continental Shelf Research. 2021. V. 216. 104358.
- 7. *Коняев К.В., Сабинин К.Д.* Волны внутри океана. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.
- Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А. Интенсивные внутренние волны в Мировом Океане // Океанология. 2004. Т. 44. № 6. С. 805–810.
- Lee J.H., Lozovatsky I., Jang S.-T., Jang C.J., Hong C.S., and Fernando H.J.S. Episodes of nonlinear internal waves in the northern East China Sea // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L18601.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Внутренние волны на материковом и островном шельфах открытого океана: сравнительный анализ на примере наблюдений на Нью-Йоркском и Гавайском шельфах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 5. С. 694–702.
- Shroyer E.L., Moum J.N., & Nash J.D. Nonlinear internal waves over New Jersey's continental shelf // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116. C03022.
- 12. Талипова Т.Г., Пелиновский Е.Н., Куркин А.А., Куркина О.Е. Моделирование динамики интенсивных внутренних волн на шельфе // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 6. С. 714–722.

- Fer I., Koenig Z., Kozlov I.E., Ostrowski M., Rippeth T.P., & Padman L., et al. Tidally forced lee waves drive turbulent mixing along the Arctic Ocean margins // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. e2020GL088083.
- Lucas A.J., Franks P.J.S., Dupont C.L. Horizontal internal-tide fluxes support elevated phytoplankton productivity over the inner continental shelf // Limnology and Oceanography: Fluids and Environments. 2011. V. 1. P. 56–74.
- Навроцкий В.В., Ляпидевский В.Ю., Павлова Е.П. Внутренние волны и их биологические эффекты в шельфовой зоне моря // Вестн. Дальневосточного отд-ния РАН. 2012. Т. 6. С. 22–31.
- 16. *Garwood J.C., Musgrave R.C., Lucas A.J.* Life in internal waves // Oceanography. V. 33. № 3. P. 38–49.
- 17. Бондур В.Г., Серебряный А.Н., Замшин В.В. Регистрация косяков рыб, привлекаемых солитонами интенсивных внутренних волн // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 2. С. 94–98.
- Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Сандвен С. Некоторые результаты исследования внутренних волн в Баренцевом море методами радиолокационного зондирования из космоса // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3. С. 60–69.
- Свергун Е.И., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Жегулин Г.В., Романенков Д.А., Коник А.А., Козлов И.Е. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря по данным контактных и спутниковых наблюдений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 4. С. 78–86.
- 20. Лавренов И.В., Морозов Е.Г. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 363 с.
- Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В., Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Шапрон Б., Мясоедов А.Г. Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 338–345.
- Талипова Т.Г., Куркина О.Е., Терлецкая Е.В., Куркин А.А., Рувинская Е.А. Моделирование внутренних волн в прибрежной зоне Баренцева моря // Экологические системы и приборы. 2014. № 3. С. 26–38.
- 23. Дикинис А.В. Иванов А.Ю., Карлин Л.Н., Мальцева И.Г., Маров М.Н., Неронский Л.Б., Рамм Н.С., Фукс В.Р., Авенариус И.Г., Березин Н.П., Дудкин С.Ю., Зайцев В.В., Леонтьев Е.В., Рынская А.К., Степанов П.В., Федосеева Н.В. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом "Алмаз-1". М.: ГЕОС, 1999. 119 с.
- 24. *Jackson C.R.* An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004. 560 p.

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 6 2022

- Pao H.P., He Q. Generation and Transformation of Intense Internal Waves on Shelves // COAA Scientific Workshop, The University of Maryland, Collage Park, July 13, 2002.
- Svergun E.I., Zimin A.V. Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Avacha Bay Based on the In Situ and Satellite Observations in August-September, 2018 // Physical Oceanography. 2020. V.27. № 3. P. 278–289.
- Sabinin K.D., Serebryany A.N. "hot spots" in the field of internal waves in the ocean // Acoustical Physics. 2007. V. 53. № 3. P. 357–380.
- Жегулин Г.В., Зимин А.В., Родионов А.А. Анализ дисперсионных зависимостей и вертикальной структуры внутренних волн в Белом море по экспериментальным данным // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 4. С. 47–59.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского. // Л.: Гидрометеоиздат. 1990, 281 с.
- Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Oceanic Atmos. Technol. 2002. V. 19. P. 183–204.
- 31. Иванов В.А., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г. Частота повторяемости интенсивных внутренних волн. // Доклады АН СССР. 1991. Т. 318, № 6. С. 1470–1471.
- Серебряный А.Н. Внутренние волны в прибрежной зоне приливного моря // Океанология. 1985. Т. 25. № 5. С. 744–751.
- 33. Garret C.G.R., Munk W.H. Space-time scales of internal waves. J. Geophys. Res. 1975. V. 180. № 3. P. 291–297.
- 34. Зимин А.В., Романенков Д.А., Козлов И.Е., Шапрон Б., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Мясоедов А.Г., Коллар Ф. Короткопериодные внутренние волны в Белом море: оперативный подспутниковый эксперимент летом 2012 г. // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 41–55.

- 35. *Baines P.G.* On internal tide generation models // Deep Sea Res. 1982 Part A. V. 29 № 3. P. 307–338.
- Pichon A., Morel Y., Baraille R., & Quaresma L. Internal tide interactions in the Bay of Biscay: Observations and modelling // Journal of Marine Systems 2013. V. 109– 110. P. S26–S44.
- 37. https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.dem:316.
- https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/ GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030/INFOR-MATION.
- Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K. Baroclinic Tides: Theoretical Modelling and Observational Evidence. New York: Cambridge University Press, 2005. 351 p.
- Jackson C.R., da Silva J.C.B., Jeans G. The generation of nonlinear internal waves // Oceanography. 2012 V. 25. P. 108–123.
- 41. Богданов К.Т. Приливные явления в Тихом океане. М.: Наука, 1994. 143 с.
- 42. *Калле К.* Общее мореведение (Введение в океанографию) / Пер. В.Ю. Веспе; Под ред. А.О. Шпайхера. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1961. 461 с.
- Azevedo A., da Silva J.C.B., New A.L. On the generation and propagation of internal solitary waves in the southern Bay of Biscay // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2006. V. 53. P. 927–941.
- 44. *Морозов Е.Г., Козлов И.Е., Щука С.А., Фрей Д.И.* Внутренний прилив в проливе Карские ворота // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 13–24.
- Lavrova O.Y., Sabinin K.D., Badulin S.I. Radar observation of internal wave and current interactions // IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99. 1999. P. 159–161.
- Rogachev K.A., Shlyk N.V. Characteristics of the Kamchatka Current Eddies // Russ. Meteorol. Hydrol. 2019. V. 44. P. 416–423.
- 47. *Lavrova O.Y., Mityagina M.I., Sabinin K.D.* Study of internal wave generation and propagation features in non-tidal seas based on satellite synthetic aperture radar data // Dokl. Earth Sc. 2011. V. 436. P. 165–169.

Short-Period Internal Waves in the Shelf Areas with Intense Tidal Dynamics

E. I. Svergun^{1, 2, *}, A. V. Zimin^{1, 2}, D. A. Romanenkov¹, and E. V. Sofina^{1, 3}

¹Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Nakhimovsky Prospekt, 36, Moscow, 117997 Russia ²Saint-Petersburg State University, Universitetskaya Embankment, 7/9, Saint Petersburg, 199034 Russia ³Russian State Hydrometeorological University, Voronezhskaya Street, d. 79, Saint Petersburg, 192007 Russia *e-mail: Egor-svergun@yandex.ru

The paper compares the characteristics of short-period internal waves and the mechanisms of their generation in the southwestern part of the Barents Sea and the Avacha Bay of the Pacific Ocean on the basis of data from in situ measurement, satellite observations and a modern global barotropic tidal model. Comparison of the results of contact measurements revealed that in the Barents Sea, in the area of alternating inhomogeneities of the bottom relief with an average depth of about 100 m, weakly nonlinear short-period internal waves with a maximum amplitude of 4 meters dominate in the contact data. In the Avacha Bay, where there is a narrow shallow shelf and a steep continental slope, strongly nonlinear intense internal waves with an amplitude

704

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ШЕЛЬФОВЫХ РАЙОНАХ

of up to 8 meters are recorded against the background of semidiurnal internal waves. According to satellite data, it was revealed that larger packets of short-period wave manifestations were recorded in the Barents Sea than in the Avacha Bay, both the wavelength and the length of the leading crest. The directions of propagation of wave manifestations in the areas under study are characterized by a narrow range of variability, which may indicate the dominance of one generation mechanism. Analysis of the TPXO9 atlas data showed the similarity of the spatial structure of a semidiurnal tidal wave in the Barents Sea and in the Avacha Bay, but the maximum velocity of tidal currents in the Barents Sea is more than thrice higher than in the Avacha Bay. Assessment of the generation criteria for the internal tide revealed that in the Barents Sea, in the vicinity of the contact measurement area, short-period internal waves are generated by the lee-wave mechanism, and in the Avacha Bay – during the disintegration of the internal tide.

Keywords: short-period internal waves, in situ measurements, satellite observations, baroclinic tide, TPXO9, Barents Sea, Avacha Bay