

Короткопериодные внутренние волны на тихоокеанской акватории полуострова Камчатка и северных Курильских островов по данным спутниковых радиолокационных наблюдений 2017–2021 гг.

Е. И. Свергун¹, А. В. Зимин^{1,2}, А. А. Коники¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117218, Россия*
E-mail: Egor-Svergun@yandex.ru

² *Санкт-Петербургский государственный университет*
Санкт-Петербург, 199034, Россия

На основе обработки 206 радиолокационных изображений Sentinel-1 рассматривается изменчивость характеристик короткопериодных внутренних волн в августе 2017–2021 гг. на тихоокеанской акватории п-ова Камчатка и северных Курильских о-вов. Согласно результатам анализа частоты встречаемости проявлений за пять лет были найдены «горячие точки» (районы частой встречаемости) в поле внутренних волн, расположенные восточнее Четвёртого Курильского пролива, около м. Лопатка, на юго-восточном шельфе п-ова Камчатка, вокруг п-ова Шипунский, а также в южной части Кроноцкого зал. Установлена стабильность геометрических характеристик проявлений волн и районов их частой встречаемости от года к году. Сопоставление результатов обработки снимков с данными реанализа ERA5 (*англ.* European Reanalysis 5-го поколения) и продукта GLORYS12V1 системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus (*англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS), а также глобальной приливной модели TPXO9 (*англ.* Oregon State University TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution tidal model) показало, что факторами, определяющими количество зарегистрированных проявлений внутренних волн в районе исследования на межгодовом интервале, являются особенности вертикальной стратификации вод, а на внутримесячном — сизигийно-квадратурного цикла прилива. При этом фактором, определяющим возможность достоверного детектирования проявлений внутренних волн, в обоих случаях является приводный ветер. Это даёт основание утверждать, что объективные оценки положения областей горячих точек в поле внутренних волн можно получить только на основе анализа многолетних архивов спутниковых радиолокационных изображений. Отмечено, что районы частой встречаемости проявлений внутренних волн у восточного шельфа Камчатки и в Кроноцком зал. совпадают с областями нереста и ранних стадий развития минтая.

Ключевые слова: радиолокационные изображения, короткопериодные внутренние волны, повторяемость ветра, градиент плотности, приливное течение, Тихий океан, шельф Камчатского полуострова

Одобрена к печати: 21.02.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-251-260

Введение

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) с длиной волны порядка сотен метров и с частотой много больше инерционной частоты широко распространены на акватории Тихого океана, прилегающей к п-ову Камчатка и северным Курильским о-вам. Этому способствует сложный рельеф дна с узким шельфом и крутым материковым склоном, а также выраженная приливная динамика. Короткопериодные внутренние волны регистрируются как по данным контактных измерений (Сабинин, Серебряный, 2007; Свергун, Зимин, 2020; Lavrova et al., 1999; Pao, He, 2002; Serebryanu, 2000), так и по данным спутниковых наблюдений (Епифанова и др., 2019; Свергун и др., 2021; Etkin, Smirnov, 1992; Jackson, 2004; Mitnik, Dubina, 2012; Trochimovsky, 1991). Анализ результатов спутниковых радиолокационных наблюдений за 2019 г. в сочетании с данными глобальной приливной модели (Svergun et al., 2023) позволил выявить, что районы частой встречаемости КВВ в течение года относительно стабильны, а доминирующим механизмом генерации КВВ является дезинтеграция внутренних

приливных волн (ВПВ) за критической широтой. В работах (Сабинин, Серебряный, 2007; Серебряный, 2000) также отмечается, что КВВ могут генерироваться над большими глубинами при выходе на поверхность луча внутреннего прилива, отражённого от материкового склона. Присутствие интенсивного Курило-Камчатского течения может быть как фактором генерации КВВ (Свергун, Зимин, 2023), так и фактором их маскирования на спутниковых изображениях (Lavrova et al., 1999).

Отметим, что исследуемая акватория также представляется нерестовым районом относительно крупной восточнокамчатской популяции минтая. По данным работы (Варкентин, Саушкина, 2022), в глубоководных каньонах Авачинского зал. распределение икры по горизонтам может изменяться под действием ВПВ, как это описано в публикациях (Garwood et al., 2020; Stashchuk, Vlasenko, 2021). В результате возможно попадание икры в неблагоприятные для её развития условия, что может стать одной из причин её гибели. С учётом ключевой роли внутреннего прилива в генерации КВВ в исследуемом регионе изучение закономерностей межгодовой изменчивости районов частой встречаемости КВВ как индикаторов интенсивной генерации и распада внутреннего прилива становится весьма актуальной задачей.

В работах (Свергун и др., 2021, Svergun et al., 2023) было выявлено, что максимальное число проявлений КВВ по спутниковым данным регистрируется в августе, когда сезонный пикноклин наиболее чётко выражен. Однако ещё не сформированы представления о межгодовых особенностях изменчивости поля КВВ у берегов Камчатского п-ова, а также о стабильности выделяемых районов их частой встречаемости. Настоящая работа представляет первые результаты анализа межгодовой изменчивости характеристик проявлений КВВ в указанном регионе на примере августа 2017–2021 гг.

Материалы и методы

Проявления КВВ регистрировались на радиолокационных изображениях (РЛИ) со спутников Sentinel-1A/B в С-диапазоне и в режиме съёмки IW (англ. Interferometric Wide Swath) с пространственным разрешением 20 м и шириной полосы обзора 250 км. Спутниковые снимки были загружены с сайта Аляскинского университета (англ. Alaska Satellite Facility, <https://search.asf.alaska.edu/#/>). Всего за август 2017–2021 гг. было обработано 206 РЛИ. Распределение количества РЛИ по акватории исследуемого региона показано на рис. 1а.

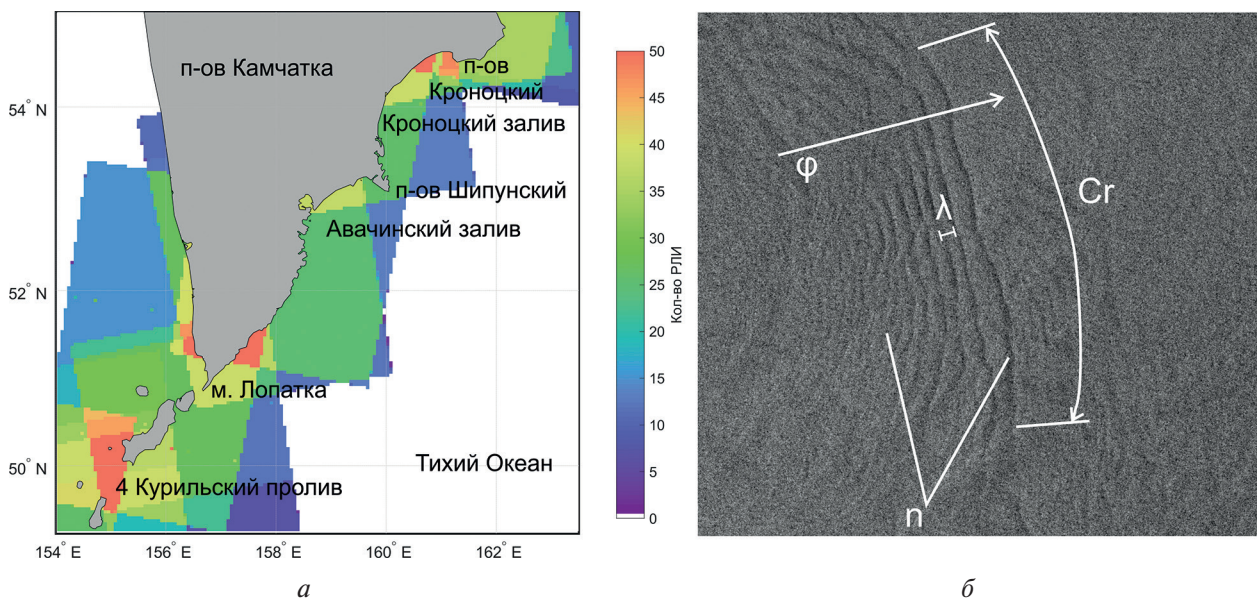


Рис. 1. Распределение количества РЛИ по акватории исследуемого региона за август 2017–2021 гг. (а); пример поверхностного проявления КВВ и схема определения его характеристик (обозначения см. в тексте) (б)

В августе 2017 г. было доступно минимальное количество РЛИ (36), а в августе 2020 г. — максимальное (46). Из *рис. 1а* видно, что наибольшая обеспеченность спутниковыми данными (около 50 РЛИ) характерна для Четвёртого Курильского пролива, юго-восточного шельфа п-ова Камчатка и северной части Кроноцкого зал. На область континентального шельфа и материкового склона приходится от 20 до 35 РЛИ.

Снимки обрабатывались в программном обеспечении SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform). Поверхностные проявления КВВ регистрировались на РЛИ в виде чередующихся полос усиления и ослабления радиолокационного сигнала (*рис. 1б*), соответствующих волновому пакету (Robinson, 2010). Количество волн в пакете подсчитывалось вручную как количество видимых дугообразных полос (n на *рис. 1б*). Длина лидирующего гребня устанавливалась измерением длины кривой, приведённой на *рис. 1б* (Ст). Средняя длина волны (λ на *рис. 1б*) определялась на разрезе, показанном на *рис. 1б*, как среднее расстояние между двумя соседними полосами. Направление распространения определялось по кривизне проявления (стрелка с подписью ϕ на *рис. 1б*).

Для выявления «горячих точек» в поле проявления КВВ (области, где наиболее часто регистрируются КВВ согласно работе (Сабинин, Серебряный, 2007)) рассчитывалась частота встречаемости как отношение количества проявлений КВВ к количеству РЛИ в ячейках с размером $0,2^\circ$ по широте и $0,24^\circ$ по долготе. Горячие точки определялись как области, где частота встречаемости проявлений КВВ превышает фоновую (которая была оценена в 0,1) как минимум в два раза.

Для анализа причин изменчивости проявлений КВВ по годам в области горячей точки около п-ова Шипунский их количество сравнивалось со среднемесячными значениями скорости ветра из реанализа ERA5 (*англ.* European Reanalysis 5-го поколения) (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>) и максимальной в верхнем 60-метровом слое частотой Вьяйсяля – Брента (плавучести), рассчитанной по данным вертикального распределения температуры и солёности продукта GLORYS12V1 из реанализа Copernicus (портал системы Европейских центров морских прогнозов, *англ.* Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS) (https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030/).

С целью оценки причин внутримесячной изменчивости проявлений внутренних волн на всей исследуемой акватории для дат, обеспеченных спутниковым изображениями, рассчитывалась средняя по области покрытия скорость ветра из реанализа ERA5 в сроки, наиболее близкие к моменту получения снимков. Изменчивость количества проявлений КВВ сопоставлялась с полученными оценками средней скорости ветра, максимальными значениями частоты Вьяйсяля – Брента, рассчитанными по суточным данным вертикального распределения температуры и солёности продукта из GLORYS12V1 в верхнем 60-метровом слое, а также с ежечасными значениями скорости приливных течений из атласа TPX09 (*англ.* Oregon State University TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution tidal model) (Egbert, Erofeeva, 2002), полученными для района Авачинского зал.

Результаты и их обсуждение

В ходе анализа РЛИ в августе 2017–2021 гг. было зарегистрировано 519 проявлений пакетов КВВ. Пространственное распределение лидирующих гребней проявлений пакетов КВВ показано на *рис. 2а* (см. с. 254), а частота встречаемости — на *рис. 2б*.

Проявления КВВ регистрировались практически повсеместно над шельфом, материковым склоном, а также над глубоководной частью Авачинского зал. Выделяется группа проявлений КВВ на границе Авачинского зал., которая регистрируется над глубинами, превышающими 2000 м. Стоит отметить, что проявления КВВ в данном районе регистрируются в 2017, 2018 и 2020 гг. и могут быть связаны с мезомасштабной вихревой активностью, как было показано в работе (Свергун, Зимин, 2022).

Из *рис. 2б* видно, что наибольшая частота встречаемости проявлений КВВ за весь исследуемый период отмечалась восточнее Четвёртого Курильского пролива, около м. Лопатка,

на юго-восточном шельфе п-ова Камчатка, вокруг п-ова Шипунский, а также в южной части Кроноцкого зал. Данные районы в соответствии с принятой методикой можно считать горячими точками в поле проявлений КВВ. Положение выявленных горячих точек совпадает с показанными в работе (Svergun et al., 2023). Стоит отметить, что значительное число проявлений КВВ регистрируется над основными местами нереста минтая (см. рис. 2а). В Авачинском зал. частота встречаемости проявлений КВВ над областями нереста минтая не превышает 0,1, а на юго-восточном шельфе Камчатки и в Кроноцком зал. области нереста минтая относятся к периферии выявленных горячих точек с частотой встречаемости проявлений КВВ 0,2–0,3.

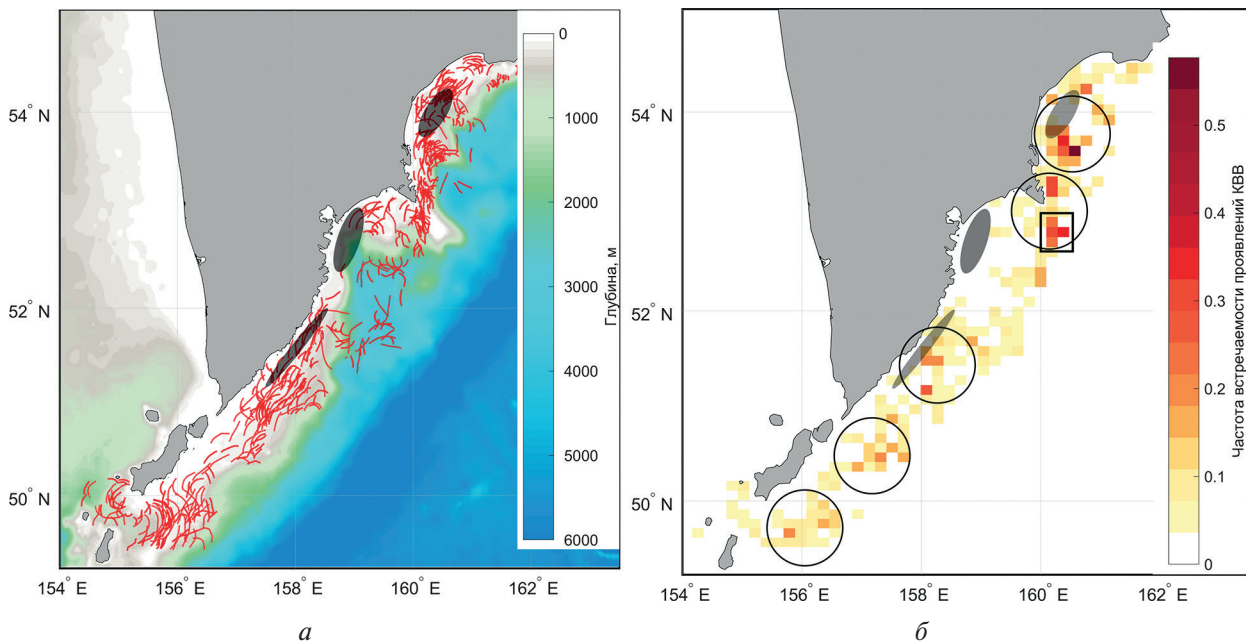


Рис. 2. Пространственное распределение лидирующих гребней проявлений КВВ (а) и частота встречаемости проявлений КВВ (б). Серыми эллипсами показаны основные районы нереста минтая по данным работы (Буслов, Великанов, 2013), чёрными окружностями — области горячих точек в поле проявлений КВВ; чёрный прямоугольник выделяет область исследования межгодовой изменчивости проявлений КВВ в августе 2017–2021 гг.

В таблице приведены средние характеристики проявлений КВВ, зарегистрированных в августе 2017–2021 гг.

Средние характеристики проявлений КВВ в августе 2017–2021 гг.

Год	Количество	n	λ , м	σ , км
2017	125	9	440	9
2018	150	8	520	9
2019	83	5	540	20
2020	70	6	590	13
2021	92	7	580	9

Максимальное количество проявлений КВВ было зарегистрировано в 2018 г., а минимальное — в 2020 г. При этом суммарное количество РЛИ в месяц существенно не менялось (37 против 44). Отметим стабильность длин волн в пакетах от года к году: их изменчивость не превышает 15 %.

Для оценки возможных причин непостоянства количества зарегистрированных проявлений КВВ была проанализирована повторяемость ветра со скоростью более 8 м/с. В качестве примера приведём карты (рис. 3) за 2017 и 2020 гг., когда количество проявлений КВВ различалось практически в два раза. В оба года выделялись горячие точки около м. Лопатка, на юго-восточном шельфе Камчатки и вокруг п-ова Шипунский. В 2017 г. выделялась также горячая точка в южной части Кроноцкого зал., которая в 2020 г. не отмечается. В горячих точках в 2017 г. частота встречаемости проявлений КВВ варьируется от 0,6 до 1, а в 2020 г. — от 0,4 до 0,6. При этом в 2017 г. практически всюду на акватории исследуемого региона повторяемость ветра со скоростью более 8 м/с не превышает 2 дней, лишь в отдельных районах у м. Лопатка и около Четвёртого Курильского пролива достигая 4–6 дней. В 2020 г. повторяемость скорости ветра более 8 м/с в прибрежных районах исследуемого региона не превышает 2 дней, а на остальной части региона варьируется от 4 до 12 дней, что практически в 2 раза превышает повторяемость сильного ветра в 2017 г. То есть высокая повторяемость ветра со скоростью более 8 м/с может обуславливать маскирование поверхностных проявлений КВВ, что приводит к существенному уменьшению их количества на РЛИ.

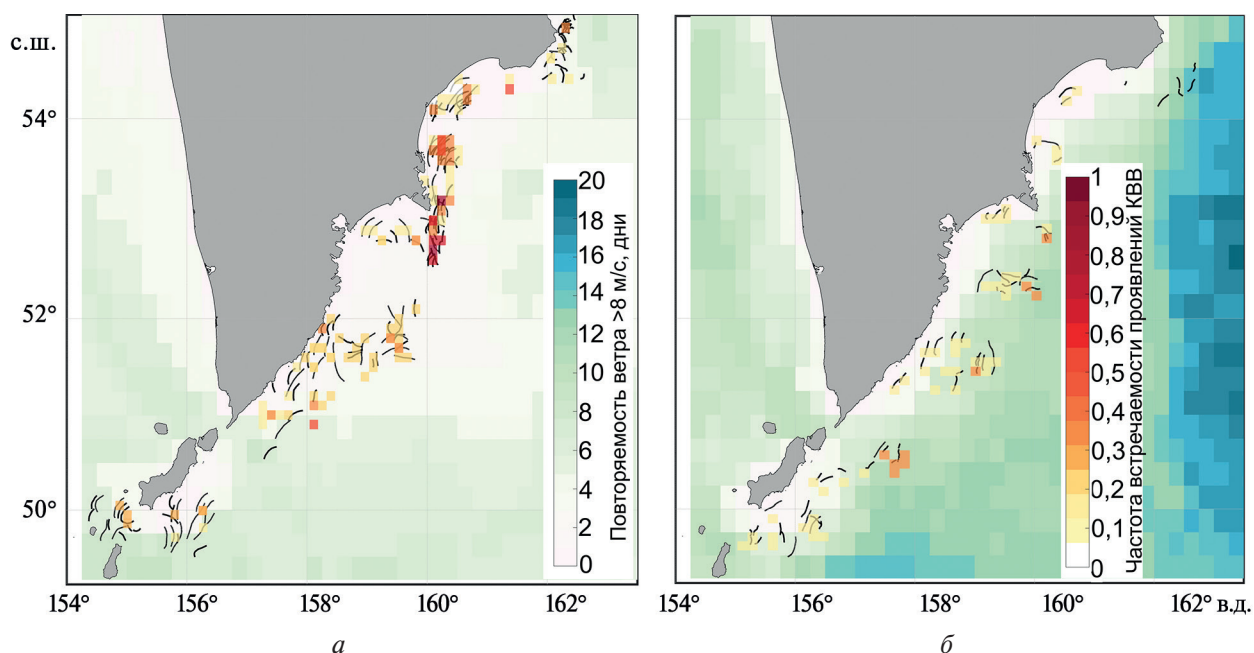


Рис. 3. Композитные карты положения лидирующих гребней проявлений КВВ, частота встречаемости проявлений КВВ и повторяемости скорости ветра более 8 м/с за месяц: а — в августе 2017 г.; б — в августе 2020 г.

Рассмотрим более детально межгодовую изменчивость количества проявлений КВВ в августе за 2017–2021 гг. в области горячей точки около п-ова Шипунский (обозначена чёрным прямоугольником на рис. 2б), близкой к районам нереста минтая в Авачинском зал. На рис. 4 (см. с. 256) показана изменчивость количества проявлений КВВ в августе, среднемесячная скорость ветра и частота плавучести.

В августе 2017 и 2018 гг. около п-ова Шипунский отмечалось максимальное число проявлений КВВ (более 20), при этом среднемесячная скорость ветра не превышала 5,3 м/с, а частота плавучести была максимальна (19 циклов/ч). В 2019–2021 гг. количество проявлений КВВ сократилось приблизительно на треть, при этом среднемесячная скорость ветра варьировалась от 6 до 7 м/с, а частота плавучести составляла 15–16 циклов/ч. Таким образом, видно, что значительное влияние на изменчивость количества проявлений КВВ оказывает ветер, маскируя проявления КВВ, а также изменчивость гидрологической структуры вод, когда усиление стратификации соответствует увеличению количества детектируемых на поверхности «отпечатков волн».

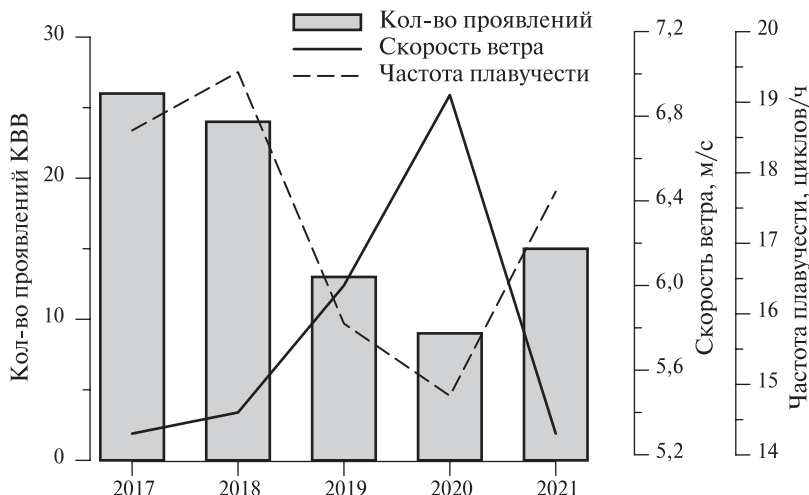


Рис. 4. Количество проявлений КВВ в области у п-ова Шипунский, среднемесячная скорость ветра и частота плавучести

Наряду со значительной межгодовой изменчивостью количества проявлений КВВ была отмечена также внутримесячная изменчивость. В работе (Svergun et al., 2023) была продемонстрирована изменчивость генерации внутреннего прилива по критерию Tidal Body Force (Baines, 1982) в течение 2019 г. Однако количество проявлений КВВ в 2019 г. было недостаточным для детального анализа его изменчивости в течение сизигийно-квадратурного цикла (около 28 дней). В данной работе рассмотрение одного месяца в течение нескольких лет позволило выявить период, когда регистрируется максимальное число проявлений, — август 2018 г.

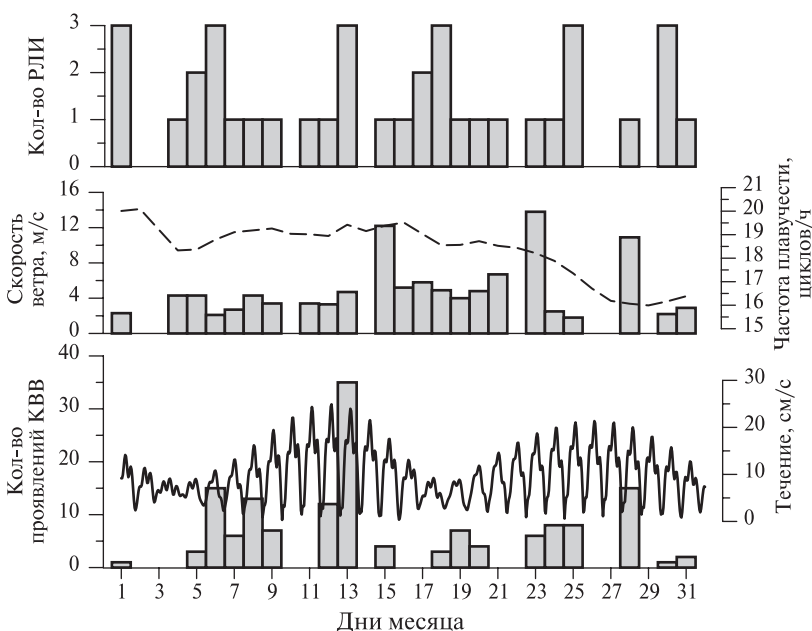


Рис. 5. Внутримесячная изменчивость количества проявлений КВВ на всей исследуемой акватории, средней по области покрытия скорости ветра, количества РЛИ, скорости приливных течений и частоты плавучести у п-ова Шипунский в августе 2018 г.

В первую половину месяца (рис. 5) на всей исследуемой акватории выделяется два локальных максимума количества проявлений КВВ: 6 и 13 августа. Эти дни характеризуются максимальным числом РЛИ и скоростью ветра менее 5 м/с. Однако 1 августа, также как

6 и 13 августа, было доступно три спутниковых изображения, скорость ветра составляла 2 м/с, но при этом регистрируется лишь два проявления КВВ. Этот день приурочен к квадратурному приливу, и скорость приливных течений не превышала 15 см/с. Для локального максимума 13 августа, когда регистрировалось 35 проявлений КВВ, характерен сизигийный прилив со скоростью течения до 25 см/с. В период с 15 по 22 августа регистрировалось не более 10 проявлений КВВ в день, при этом скорость ветра варьировалась от 6 до 12 м/с и отмечался минимум скорости приливных течений. Интересно, что на 28 августа приходится локальный максимум количества проявлений КВВ, совпадающий с локальным максимумом как скорости ветра, так и скорости приливных течений. Схожая картина отмечается 23 августа, когда 8 проявлений КВВ были зарегистрированы при ветре 13 м/с и скорости приливных течений до 20 см/с. Детальное рассмотрение поля ветра в границах РЛИ, приходящихся на эти даты, показало, что проявления КВВ регистрируются в локальных областях, где скорость ветра не превышает 5 м/с, когда остальная область снимка характеризуется скоростью ветра 14–16 м/с. Это показывает значительную неоднородность поля ветра в регионе исследования и требует в будущем более тщательного подхода к оценке характеристик ветра над акваторией. В то же время частота плавучести в течение месяца изменялась незначительно (от 16 до 20 циклов/ч). Её максимумы не приурочены к максимумам количества проявлений КВВ. То есть изменчивость гидрологической структуры вод не отказывает существенного влияния на регистрацию КВВ на внутримесячном интервале изменчивости, в отличие от межгодового интервала, где прослеживается связь между количеством проявлений КВВ и частотой плавучести по совпадению как экстремумов, так и тенденции изменчивости.

Таким образом, прослеживается связь внутримесячной изменчивости количества проявлений КВВ с особенностями сизигийно-квадратурного цикла прилива в данном районе. С учётом большого числа проявлений, зарегистрированных над материковым склоном и на шельфе, это может объясняться изменчивостью интенсивности генерации и распада внутреннего прилива. Однако стоит отметить, что как низкие, так и высокие скорости приводного ветра могут приводить к полному маскированию поверхностных проявлений волн в дни, когда наблюдаются максимальные приливные течения.

Заключение

В ходе анализа характеристик проявлений КВВ, зарегистрированных на РЛИ в августе 2017–2015 гг., было показано, что наиболее часто они отмечались восточнее Четвёртого Курильского пролива, около м. Лопатка, на юго-восточном шельфе п-ова Камчатка, вокруг п-ова Шипунский, а также в южной части Кроноцкого зал. В данных горячих точках частота встречаемости проявлений КВВ остаётся высокой практически во все годы, что может говорить о наличии постоянного источника их генерации. Геометрические характеристики проявлений КВВ (длины волн в пакете) также достаточно стабильны от года к году. Однако количество проявлений КВВ, регистрируемых на тихоокеанской акватории Камчатки и северных Курильских о-вов, значительно варьируется не только от года к году, но и по отдельным дням.

Привлечение данных реанализа позволило установить, что на изменчивость количества проявлений КВВ оказывает влияние высокая повторяемость ветра со скоростью более 8 м/с. На примере горячей точки около п-ова Шипунский было продемонстрировано, что на количество проявлений КВВ может оказывать влияние обострение и ослабление градиента в пикноклине. Рассмотрение внутримесячного интервала изменчивости показало, что число проявлений КВВ может изменяться в зависимости от фазы сизигийно-квадратурного приливного цикла, однако приводный ветер оказывает значительное влияние на количество регистрируемых проявлений КВВ.

Стоит отметить, что положение горячих точек, выделенных на юго-восточном шельфе Камчатки и в Кроноцком зал., совпадает с районами нереста и ранних стадий развития минтая. Наличие горячих точек указывает на интенсивную диссипацию внутреннего прилива,

что может обуславливать вертикальные движения, неблагоприятные для выживания икры и личинок минтая. Рассмотрение в дальнейшем спутниковой информации, охватывающей период нереста и ранних стадий развития минтая, совместно с данными натуральных ихтиопланктонных съёмок позволит более детально изучить влияние внутреннего прилива на их вертикальное распределение.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00174 (<https://rscf.ru/project/23-17-00174/>).

Литература

1. Буслов А. В., Великанов А. Я. Черты биологии и особенности эксплуатации основных объектов промысла: Минтай // Промысел биоресурсов в водах Курильской гряды: современная структура, динамика и основные элементы. Южно-Сахалинск: Сахалинский научно-исслед. ин-т рыбного хоз-ва и океанографии, 2013. С. 94–138. DOI: 10.13140/RG.2.1.5173.3206.
2. Варкентин А. И., Саушкина Д. Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. // Тр. ВНИРО. 2022. Т. 189. С. 105–119. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119>.
3. Епифанова А. С., Рыбин А. В., Моисеенко Т. Е. и др. База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане // Морской гидрофиз. журн. 2019. Т. 35. № 4. С. 395–403. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-4-395-403.
4. Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. Горячие точки в поле внутренних волн в океане // Акуст. журн. 2007. Т. 53. № 3. С. 410–436.
5. Свергун Е. И., Зимин А. В. Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе–сентябре 2018 года // Морской гидрофиз. журн. 2020. Т. 36. № 3. С. 300–312. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-3-300-312.
6. Свергун Е. И., Зимин А. В. Мезомасштабные вихревые структуры и короткопериодные внутренние волны Курило-Камчатского региона по спутниковым данным // Всероссийская конф. «Приклад. технологии гидроакустики и гидрофизики»: сб. ст. 2023. С. 238–240.
7. Свергун Е. И., Зимин А. В., Лазуткина Е. С. Характеристики проявлений короткопериодных внутренних волн Курило-Камчатского региона по данным спутниковых наблюдений в летний период // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2021. Т. 14. № 1. С. 106–115. DOI: 10.7868/S2073667321010111.
8. Серебряный А. Н. Наблюдение внутренних волн, отражённых от материкового склона Камчатки // Докл. Акад. наук. 2000. Т. 374. № 3. С. 389–392.
9. Baines P. G. On internal tide generation models // Deep Sea Research. Part A. 1982. V. 29(3). P. 307–338. DOI: 10.1016/0198-0149(82)90098-X.
10. Egbert G. D., Erofeeva S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2002. V. 19. P. 183–204. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOB>2.0.CO;2.
11. Etkin V. S., Smirnov A. V. Observations of Internal Waves in Ocean by Radar Methods // IGARSS'92 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Houston, 1992. P. 143–145. DOI: 10.1109/IGARSS.1992.576651.
12. Garwood J. C., Musgrave R. C., Lucas A. J. Life in internal waves // Oceanography. 2020. V. 33(3). P. 38–49. DOI: 10.5670/oceanog.2020.313.
13. Jackson C. R. An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004. 560 p.
14. Lavrova O. Y., Sabinin K. D., Badulin S. I. Radar observation of internal wave and current interactions // IEEE 1999 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'99). Hamburg, 1999. V. 1. P. 159–161. DOI: 10.1109/IGARSS.1999.773433.
15. Mitnik L. M., Dubina V. A. Satellite SAR sensing of oceanic dynamics in the Kuril Straits area // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 22–27 July 2012, Munich, Germany. 2012. P. 7632–7635. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351860.
16. Pao H. P., He Q. Generation and transformation of intense internal waves on shelves // COAA Scientific Workshop: Abstr. Maryland, 2002.
17. Robinson I. S. Discovering the Ocean from Space. The Unique Applications of Satellite Oceanography. L.: Springer, 2010. 638 p. DOI: 10.1007/978-3-540-68322-3.
18. Serebryany A. N. Internal waves on Pacific shelf of Kamchatka (Preliminary results of internal wave field observations) // Proc. US-Russia Workshop on Experimental Acoustics. Nizhny Novgorod, 2000. P. 116–122.

19. *Stashchuk N., Vlasenko V.* Internal Wave Dynamics over Isolated Seamount and Its Influence on Coral Larvae Dispersion // *Frontiers of Marine Science*. 2021. V. 8. Article 735358. DOI: 10.3389/fmars.2021.735358.
20. *Svergun E. I., Sofina E. V., Zimin A. V., Kruglova K. A.* Seasonal variability of characteristics of nonlinear internal waves in the Kuril-Kamchatka region by Sentinel-1 data // *Continental Shelf Research*. 2023. V. 259. Article 104986. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.104986>.
21. *Trochimovsky J. G.* New Applications of Passive Remote Sensing (Internal Wave Regions Detection) // *IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management*. Espoo, 1991. P. 2355–2356. DOI: 10.1109/IGARSS.1991.575517.

Short-period internal waves in the Pacific area of the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands according to 2017–2021 satellite radar observations

E. I. Svergun¹, A. V. Zimin^{1,2}, A. A. Konik¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117218, Russia*
E-mail: Egor-Svergun@yandex.ru

² *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia*

The paper considers the variability of short-period internal waves in Pacific waters near the Kamchatka Peninsula and the northern Kuril Islands in August 2017 to 2021 based on processing of Sentinel-1 radar images. By analyzing the frequency of occurrence over five years, “hot spots” (areas of frequent occurrence) of internal waves were identified east of the Fourth Kuril Strait, near cape Lopatka and the Shipunsky Peninsula, on the southeastern shelf of the Kamchatka Peninsula, as well as in the southern part of the Kronotsky Bay. Geometric characteristics of internal wave manifestations and their frequent occurrence areas have been found to maintain stable from year to year. The study compared the results of radar image processing with data from the ERA 5 atmospheric reanalysis and the GLORYS12V1 product of the Copernicus ocean reanalysis, as well as the global tidal model TPXO9. It was found that the factors determining the number of recorded manifestations of internal waves in the study area are, at the interannual interval, the features of vertical water stratification and, at the intramonthly interval, the features of syzygy-quadrature tidal cycle. Wind is a factor that affects reliable detection of manifestations in both cases. Therefore, objective estimates of the position of ‘hot spots’ in the field of internal waves can only be obtained by analyzing long-term archives of satellite radar images. It should be noted that the areas where internal waves frequently occur near the eastern shelf of Kamchatka and in the Kronotsky Bay coincide with the areas where pollock spawn and grow during their early stages.

Keywords: radar images, short-period internal waves, occurrence frequency of wind, density gradient, tidal current, Pacific Ocean, Kamchatka Peninsula shelf

Accepted: 21.02.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-251-260

References

1. Buslov A. V., Velikanov A. Ya., Characteristics of the biology and features of the exploitation of the main objects of the fishing: Pollock, In: *Promysel bioresursov v vodakh Kuril'skoi gryady: sovremennaya struktura, dinamika i osnovnye elementy* (Fishing for biological resources in the waters of the Kuril Ridge: modern structure, dynamics and basic elements), Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskii nauchno-issledovatel'skii institut rybnogo khozyaistva i okeanografii, 2013, pp. 94–138 (in Russian), DOI: 10.13140/RG.2.1.5173.3206.
2. Varkentin A. I., Saushkina D. Ya., On some issues of pollock reproduction in the Pacific waters adjacent to Kamchatka and the Northern Kuril Islands in 2013–2022, *Trudy VNIRO*, 2022, Vol. 189, pp. 105–119 (in Russian), <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119>.

3. Epifanova A. S., Rybin A. V., Moiseenko T. E. et al., Database of Observations of the Internal Waves in the World Ocean, *Physical Oceanography*, 2019, Vol. 26, No. 4, pp. 350–356, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-4-350-356.
4. Sabinin K. D., Serebryanyi A. N., “Hot Spots” in the Field of Internal Waves in the Ocean, *Acoustical Physycs*, 2007, Vol. 53, No. 3, pp. 357–380.
5. 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, Vol. 27, No. 3, pp. 278–289, DOI: 10.22449/1573-160X-2020-3-278-289.
6. Svergun E. I., Zimin A. V., Mesoscale vortex structures and short-period internal waves of the Kuril-Kamchatka region according to satellite data, *Vserossiiskaya konferentsiya “Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki”* (Proc. All-Russia Conf. “Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics”), 2023, pp. 238–240 (in Russian).
7. Svergun E. I., Zimin A. V., Lazutkina E. S., Characteristics of Manifestations of Short-Period Internal Waves of the Kuril-Kamchatka Region Based on Satellite Observations in Summer, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2021, Vol. 14, No. 1, pp. 106–115 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667321010111.
8. Serebryanyi A. N., Observation of internal waves reflected from the continental slope of Kamchatka, *Doklady Earth Sciences*, 2000, Vol. 374, pp. 1179–1182.
9. Baines P. G., On internal tide generation models, *Deep Sea Research. Part A*, 1982, Vol. 29(3), pp. 307–338, DOI: 10.1016/0198-0149(82)90098-X.
10. Egbert G. D., Erofeeva S. Y., Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, Vol. 19, pp. 183–204, DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2.
11. Etkin V. S., Smirnov A. V., Observations of Internal Waves in Ocean by Radar Methods, *IGARSS’92 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Houston, 1992, pp. 143–145, DOI: 10.1109/IGARSS.1992.576651.
12. Garwood J. C., Musgrave R. C., Lucas A. J., Life in internal waves, *Oceanography*, 2020, Vol. 33(3), pp. 38–49, DOI: 10.5670/oceanog.2020.313.
13. Jackson C. R., *An Atlas of Internal Solitary-like Waves and their Properties*, Alexandria: Global Ocean Associates, 2004, 560 p.
14. Lavrova O. Y., Sabinin K. D., Badulin S. I., Radar observation of internal wave and current interactions, *IEEE 1999 Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS’99)*, Hamburg, 1999, Vol. 1, pp. 159–161, DOI: 10.1109/IGARSS.1999.773433.
15. Mitnik L. M., Dubina V. A., Satellite SAR sensing of oceanic dynamics in the Kuril Straits area, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 22–27 July 2012, Munich, Germany, 2012, pp. 7632–7635, DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351860.
16. Pao H. P., He Q., Generation and transformation of intense internal waves on shelves, *COAA Scientific Workshop: Abstr.*, Maryland, 2002.
17. Robinson I. S., *Discovering the Ocean from Space. The Unique Applications of Satellite Oceanography*, London: Springer, 2010, 638 p., DOI: 10.1007/978-3-540-68322-3.
18. Serebryanyi A. N., Internal waves on Pacific shelf of Kamchatka (Preliminary results of internal wave field observations), *Proc. US-Russia Workshop on Experimental Acoustics*, Nizhny Novgorod, 2000, pp. 116–122.
19. Stashchuk N., Vlasenko V., Internal Wave Dynamics over Isolated Seamount and Its Influence on Coral Larvae Dispersion, *Frontiers of Marine Science*, 2021, Vol. 8, Article 735358, DOI: 10.3389/fmars.2021.735358.
20. Svergun E. I., Sofina E. V., Zimin A. V., Kruglova K. A., Seasonal variability of characteristics of nonlinear internal waves in the Kuril-Kamchatka region by Sentinel-1 data, *Continental Shelf Research*, 2023, Vol. 259, Article 104986, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.104986>.
21. Trochimovsky J. G., New Applications of Passive Remote Sensing (Internal Wave Regions Detection), *IGARSS’91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management*, Espoo, 1991, pp. 2355–2356, DOI: 10.1109/IGARSS.1991.575517.