#### УДК 551.466.8

© Е. И. Свергун<sup>1,2\*</sup>, А. В. Зимин<sup>1,2,3</sup>, Е. С. Лазуткина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Институт водных проблем севера Карельского научного центра РАН, 185030, пр. Александра Невского, д. 50, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия

\*E-mail: egor-svergun@yandex.ru

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЯВЛЕНИЙ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Статья поступила в редакцию 14.10.2020, после доработки 14.01.2021

Анализируется пространственная и временная изменчивость характеристик поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн на акватории тихоокеанского шельфа Курило-Камчатского региона, полученные по результатам анализа спутниковых изображений радиолокатора Sentinel-1 за летний период 2019 года. На 205 спутниковых снимках обнаружено 927 проявлений пакетов внутренних волн, содержащих от 3 до 18 волн в пакете. Длины волн внутри пакета варьировали от 80 до 1900 метров, при среднем значении в 400 метров. Фронт лидирующего гребня цуга волн имел размеры от 2 до 70 км, составляя в среднем 14 км. Минимальное число волн зарегистрировано в первой половине июня, а максимальное — в первой половине июля. Выявлены районы постоянной встречаемости проявлений внутренних волн в летний период: в южной части Курильской гряды (около островов Кунашир и Зеленый), около Тихоокеанского побережья Камчатского полуострова (Камчатский и Кроноцкий заливы). Также выделена область частого проявления волн в средней и северной частях Курильской гряды (над хребтом Витязь в районе островов Онекотан и Матуа), где интенсивность их проявления подвержена внутрисезонной изменчивости. Во всех отмеченных очагах генерации выделяется два преобладающих направления распространения пакетов волн: на восток и запад. На конкретных примерах с привлечением оптических изображений спектрорадиометра Landsat-8 показано, что в Курило-Камчатском регионе внутренние волны могут генерироваться как приливной динамикой, так и вихревыми структурами.

**Ключевые слова:** короткопериодные внутренние волны, поверхностные проявления, шельф, проливы, спутниковые радиолокационные изображения, спутниковые оптические изображения, очаги генерации, Тихий океан, Охотское море.

## © E. I. Svergun<sup>1,2\*</sup>, A. V. Zimin<sup>1,2,3</sup>, E. S. Lazutkina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology RAS, 117997, Nahimovsky Pr., 36, Moscow, Russia
<sup>2</sup>St. Petersburg State University, 199034, 7–9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, Russia
<sup>3</sup>Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 185030, Aleksander Nevsky st., 50, Petrozavodsk, Russia
\*E-mail: egor-svergun@yandex.ru

## CHARACTERISTICS OF MANIFESTATIONS OF SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES OF THE KURIL-KAMCHATKA REGION BASED ON SATELLITE OBSERVATIONS IN SUMMER

#### Received 14.10.2020, in final form 14.01.2021

The spatial and temporal variability of the characteristics of surface manifestations of short-period internal waves in the water area of the Kuril-Kamchatka region, obtained from the analysis of satellite images of the Sentinel-1 radar for the summer period of 2019, is studied. 205 satellite images revealed 927 manifestations of internal wave packets containing from 3 to 18 waves per packet. The wavelengths inside the packet ranged from 80 to 1900 meters, with an average value of 400 meters. The front of the leading crest of the waves packet measured from 2 to 70 km, averaging 14 km. The minimum number of waves was registered in the first half of June, and the maximum — in the first half of July. Areas of constant occurrence of internal waves manifestations in summer are identified: in the southern part of the Kuril ridge (near the Islands of Kunashir and Zeleny), near the Pacific coast

Ссылка для цитирования: *Свергун Е.И., Зимин А.В., Лазуткина Е.С.* Характеристики проявлений короткопериодных внутренних волн Курило-Камчатского региона по данным спутниковых наблюдений в летний период // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 1. С. 106–115. doi: 10.7868/S2073667321010111

For citation: *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, 14, 1, 106–115. doi: 10.7868/S2073667321010111

of the Kamchatka Peninsula (Kamchatka and Kronotsky Bays). The region of frequent occurrence of internal waves in the middle and Northern parts of the Kuril Ridge (over the Vityaz Ridge in the area of Onekotan and Matua Islands) is also highlighted, the intensity of wave manifestations in which is subject to strong intra-seasonal variability. In all the noted generation centers, two predominant directions of wave packet propagation are distinguished: to the East and to the West. Specific examples using optical images from the Landsat-8 Spectroradiometer show that internal waves in the Kuril-Kamchatka region can be generated by both tidal dynamics and vortex structures.

**Key words:** short-period internal waves, surface manifestations, shelf, straits, satellite radar images, satellite optical images, generation centers, Pacific Ocean, Sea of Okhotsk.

#### 1. Введение

Рассматриваемый Курило-Камчатский регион включает в себя акваторию близ Курильских островов и тихоокеанскую акваторию полуострова Камчатка. Он характеризуется сложным рельефом дна, представленным Курило-Камчатским желобом, крутым материковым склоном, узким шельфом и различными по своим характеристикам проливами между островами Курильской гряды, где глубина варьируется от 100 до 2000 м. По данным [1], для акватории Курильских островов характерно наличие неправильного суточного прилива, а для акватории Тихоокеанского побережья Камчатки — неправильного полусуточного прилива. Баротропная приливная волна распространяется со стороны открытого океана, и вызывает внутренний прилив. Согласно классическим представлениям, внутренняя приливная волна, встречая на своем пути материковый склон с сильным уклоном дна, распадается на пакеты короткопериодных внутренних волн (КВВ). Аналогичные физико-географические особенности приводят к возникновению очагов генерации КВВ в различных районах Мирового океана [2].

Данные спутниковых радиолокационных наблюдений [3–5] демонстрируют наличие многочисленных разрозненных поверхностных проявлений КВВ на акватории Курило-Камчатского региона. В работе [6] на основе синтеза данных контактных и спутниковых наблюдений выявлена сложная картина цугов КВВ в Авачинском заливе Тихого океана, а по данным [7] установлено, что КВВ амплитудой более 2.5 м и длинами 300-400 м отчетливо проявляются в спутниковых радиолокационных изображениях морской поверхности при глубине пикноклина около 15 м. Указанные выше работы демонстрируют довольно широкое распространение проявлений КВВ на акватории исследуемого региона. Однако до сих пор не существует детального исследования проявлений КВВ по данным спутниковых наблюдений, направленного на выявление очагов генерации внутренних волн на всем достаточно протяженном Тихоокеанском побережье России. Для схожих по физико-географическим особенностям регионов [2] известно, что зачастую в очагах генерации наблюдается интенсивное внутреннее волнение. По данным контактных наблюдений было установлено, что и около Курильских островов, и вблизи тихоокеанского побережья Камчатки регистрируются интенсивные внутренние волны (ИВВ), характеризующиеся сильной нелинейностью и высотой более 10 м [7–10]. ИВВ могут влиять на распространение звука в морской воде [11], управляемость подводных аппаратов [12], устойчивость гидротехнических сооружений на шельфе [13–15]. Учитывая сказанное выше, выявление очагов генерации КВВ представляется весьма актуальным.

Таким образом, цель настоящей работы — анализ пространственно-временной изменчивости поверхностных проявлений КВВ на акватории Курило-Камчатского региона по данным современных высокоразрешающих радиолокационных спутниковых наблюдений за летний период 2019 г.

#### 2. Описание района исследования, используемых данных и методик их обработки

Рассматриваемая акватория характеризуется сложным рельефом дна, который наглядно показан на рис. 1, *а*. С юго-востока исследуемого региона расположен подводный хребет Витязь, глубина которого варьируется от 60 до 200 м. Далее на юго-восток расположен Курило-Камчатский желоб с глубиной более 6000 м, что обусловливает значительный перепад глубин на пути внутренней приливной волны из открытого океана.

Атмосферная циркуляция в рассматриваемый период обусловливается влиянием юго-восточного летнего муссона, повсеместно господствуют слабые и неустойчивые ветры южных и юго-восточных румбов. Возникающие циклоны охватывают незначительные акватории, они неглубоки [16].

Доминирующим фактором, определяющим особенности гидрологического режима района, являются приливы. Приливные волны движутся в юго-западном направлении вдоль Курильской гряды. В открытом океане скорости приливных течений не превышают 10 см/с; при приближении к берегу, они существенно возрастают, достигая в мелководных проливах 2.5 м/с. Связанные с приливом течения имеют в Курильских проливах реверсивный характер. При этом изрезанная береговая линия островов и сложный рельеф

дна приводят как к развитию сдвиговой динамической неустойчивости течений, так и к образованию внутренних приливных волн [17]. Оба этих фактора определяют особенности трансформации вод в проливах и структуру вод на расстоянии 60–70 миль от гряды [16].

Существенное влияние на распределение и изменчивость гидрологических характеристик вод района оказывает Курило-Камчатское течение, выносящее холодные воды из западной части Берингова моря. К востоку от Камчатки поток и отдельные ответвления Восточно-Камчатского течения, следующего вдоль берегов полуострова и северной части Курильской гряды, прослеживаются до глубинных слоев. Важной характеристикой динамического состояния вод района течения и прилегающих областей океана является генерация и распространение среднемасштабных вихревых образований. Вертикальная структура вод по-



**Рис. 1.** Характеристики исследуемого региона: *a* — обзорная карта рельефа дна Курило-Камчатского региона; *б* — карта с нанесением границ спутниковых снимков Sentinel-1, используемых в работе; *в* — пример отображения волновых пакетов на спутниковом радиолокационном изображении Sentinel-1 от 01 июня 2019 года.

Fig. 1. Characteristics of the region under study: a — overview map of the bottom relief of the Kuril-Kamchatka region; b — map with drawing the boundaries of Sentinel 1 satellite images used in the work; c — example of surface manifestation of wave packets on the Sentinel-1 radar image from June 01, 2019.

верхностного слоя обладает выраженным годовым циклом изменчивости характеристик температуры и солености, при этом верхний квазиоднородный слой имеет максимальную толщину в открытом океане, но не превышает 25–30 м, а минимальную в антициклонических вихрях (менее 10 м). Под этим слоем до глубин 40–50 м в летний период образуется сезонный слой скачка [17].

Для регистрации поверхностных проявлений КВВ были использованы радиолокационные изображения (РЛИ) с аппаратов Sentinel-1A и В в С-диапазоне с VV-поляризацией и режимом съемки IW с разрешением 20 м и шириной полосы обзора 250 км, охватывающие период с 1 июня 2019 г. по 31 августа 2019 г. Всего было использовано 205 РЛИ, из них 63 — за июнь, 68 — за июль и 74 — за август. Как видно из рис. 1, *б*, РЛИ полностью и практически равномерно покрывают исследуемую акваторию. Для анализа возможных источников генерации отдельных поверхностных проявлений КВВ дополнительно привлекались снимки спектрорадиометра Landsat-8 в оптическом диапазоне с разрешением 30 м.

Внутренние волны на РЛИ морской поверхности проявляются в виде дугообразных чередующихся светлых и темных полос, образующих волновые пакеты, пример которых показан на рис. 1, *в*. Это явление обусловлено Брэгговским рассеянием радиолокационного сигнала на капиллярных поверхностных волнах, которые генерируются течением, возникающим при прохождении КВВ [18]. Стоит отметить, что эпизодическое прохождение тайфунов, а также усиление муссона, приводит к развитию штормового волнения на акватории Курило-Камчатского региона [19], что может отрицательно влиять регистрацию проявлений КВВ на РЛИ.

Для каждого поверхностного проявления КВВ определены такие характеристики, как положение проявления, длина волны, длина дуги лидирующего гребня в пакете направление распространения, количество волн в пакете. Детектирование волн на РЛИ выполнено в программном обеспечении ESA SNAP (https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/). Лидирующие гребни пакетов проявлений КВВ наносились на карты для анализа их пространственного распределения по исследуемой акватории. Рассчитывались гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ. Для выявления положения очагов генерации КВВ подсчитывалось количество проявлений волн в ячейках размером 0.5 × 0.5° в пределах исследуемого региона, которое затем наносилось на карты для анализа их пространственного распределения.

#### 3. Статистика проявлений волн по данным спутниковых наблюдений

На 205 проанализированных РЛИ было зарегистрировано 927 проявлений пакетов КВВ. Минимальное число проявлений было зарегистрировано в первой половине июня, а максимальное — в первой половине июля. На снимках обнаруживались пакеты, содержащие от 3 до 18 волн. Длины волн внутри пакета варьировали от 80 до 1900 м, при среднем значении в 400 м. Фронт лидирующего гребня цуга волн имел размеры 2–70 км, составляя в среднем 14 км. Имеется 15 случаев регистрации особо крупных пакетов с длиной гребня 40–70 км. Большинство волновых пакетов стояли из 3–5 волн с длиной волны 200–500 м и охватывали площадь 10–20 км<sup>2</sup>. Повторяемость характеристик всех зарегистрированных проявлений волн наглядно показана на рис. 2.

Пространственное распределение лидирующих гребней всех зарегистрированных проявлений KBB представлено на рис. 3, a, а на рис. 3,  $\delta$  и e показаны карты распределения количества проявлений волн на равномерной сетке с размерами ячейки  $0.5 \times 0.5^{\circ}$ , позволяющие наглядно идентифицировать очаги генерации KBB и проследить изменения количества волн в них (см. вклейку).

Из рис. 3, *а* видно, что поверхностные проявления КВВ регистрируются на акватории исследуемого региона повсеместно. Однако, как видно из рис. 3, *б* и *е*, пространственное положение и количество проявлений КВВ непостоянно в течение летнего сезона. Так, в июне зарегистрировано минимальное число проявлений КВВ — 289. Очаги генерации КВВ (области, где число волн в ячейке в 2–4 раза выше, чем в остальных) наблюдаются у островов Кунашир и Зеленый (цифра 1 на рис. 3, *б* и *е*), а также в Камчатском и Озерном заливах (цифра 3 на рис. 3, *б* и *е*): здесь регистрируется от 8 до 16 проявлений пакетов КВВ в ячейке. В июле было зарегистрировано максимальное число проявлений — 341. Наибольшее число волн (от 6 до 16 волн в ячейке) регистрируется у островов Зеленый и Кунашир, в Кроноцком и Камчатском заливах. В августе был зарегистрирован, помимо выделенных ранее, очаг генерации КВВ южнее островов Онекотан и Матуа (цифра 2 на рис. 3, *е*) над подводным хребтом Витязь, в котором регистрируются 6–8 волн в ячейке. Всего в августе было зарегистрировано 297 проявлений КВВ, примерно треть которых приурочена к области около островов Онекотан и Матуа. Очаги генерации, выявленные около островов Кунашир и Зеленый (№ 1), а также у Кроноцкого полуострова (№ 3) наблюдаются во все месяцы, число проявлений волн в них сохраняется высоким на фоне остальной части исследуемой акватории и варьируется от 8 до 16. Однако в очаге генерации № 3 выделяются локальные области внутрисезонной изменчивости числа



**Рис. 2.** Гистограммы повторяемости характеристик проявлений КВВ, зарегистрированных за летний период: *а* — длины лидирующего гребня; *б* — средней длины волны; *в* — числа волн в пакете; *г* — дат регистрации проявлений КВВ.

Fig. 2. Histograms of the repeatability of the characteristics of internal waves manifestations registered during the summer period: a — the length of the leading ridge; b — the average wavelength; c — the number of waves in the packet; d — the dates of manifestations registration.

зарегистрированных проявлений. Так, у мыса Шипунский в июне регистрируются 6 волн в ячейке, что едва выделяется на фоне остальных частей акватории; в июле регистрируются около 10 волн в ячейке, что сопоставимо с количеством проявлений, зарегистрированных у мыса Кроноцкий; в августе у мыса Шипунский регистрируются около 4 волн в ячейке. Ярко выраженной изменчивости подвержен очаг генерации № 2: в июне проявления волн не регистрируются, в июле наблюдаются фоновые значения количества проявлений, а в августе число проявлений в очаге сопоставимо и даже превышает число волн в других выявленных очагах, при этом наблюдается высокая площадь очага.

Стоит отметить, что особо крупные проявления пакетов КВВ регистрировались только в очагах генерации. Размер таких пакетов сопоставим с проявлениями ИВВ, зарегистрированными в других районах Мирового океана [3, 20], что говорит о высокой вероятности возникновения ИВВ в очагах генерации волн Курило-Камчатского региона. Вне очагов генерации особо крупные проявления не регистрировались. Были рассмотрены направления распространения всех зарегистрированных за время наблюдений пакетов проявлений КВВ в районах очагов генерации, выделенных окружностями на рис. 3, *г*. Круговые гистограммы повторяемости направлений распространения волн показаны на рис. 4.

Как видно из рис. 4, для всех очагов генерации характерно два генеральных направления распространения: на восток и на запад. Для очагов генерации № 2 и 3 характерны узкие диапазоны изменчивости направлений распространения с высокой повторяемостью: от 70 до 110° для восточного направления, от 270 до 315° для западного направления. Такие узкие диапазоны изменчивости преобладающих направлений распространения могут свидетельствовать о преобладании периодически действующего механизма генерации КВВ, к которому следует отнести приливы. Согласно работе [21], область вокруг островов Курильской гряды характеризуется повышенным относительно фонового уровня значением коэффициента диапикнической диффузии, что говорит о важной роли приливной динамики в генерации КВВ. Для очага генерации № 1 характерен широкий диапазон изменчивости преобладающих направлений распространения: от 45 до 120° для восточного направления, от 225 до 340° для западного направления. В работе [2] указывается, что такой разброс преобладающих направлений типичен для множества источников или действия дополнительных неприливных механизмов генерации КВВ.

Учитывая довольно равномерное покрытие, причины изменчивости интенсивности очагов генерации КВВ следует искать либо в варьирующихся погодных условиях, влияющих на качество отображения КВВ на РЛИ морской поверхности, либо в изменчивости приливной и фронтальной динамики, влияющей на генерацию КВВ.

#### 4. Отдельные примеры регистрации проявлений КВВ

На некоторых РЛИ, в отмеченных на рис. 3 районах, были зарегистрированы последовательные пакеты проявлений КВВ, приуроченные к очагам генерации. Пример последовательных пакетов, зарегистрированных на РЛИ показан на рис. 5.

В предположении приливного характера генерации последовательных пакетов, была рассчитана их фазовая скорость, как отношение расстояния между пакетами к периоду приливного цикла, аналогично методике в работе [22]. Она сопоставлялась со значениями фазовой скорости внутренних гравитационных волн за летний период, которые выбирались из программы IGWResearch [23]. Фазовая скорость внутренних волн в программе рассчитывается в соответствии с двухслойным приближением с использованием данных климатического атласа World Ocean Atlas версии 2018 г. Основанием для данного приближения могут служить данные о профиле частоты Вяйсяля-Брента, приведенные в [7], которые указывают на то, что вер-



**Рис. 4.** Круговые гистограммы повторяемости направления распространения пакетов проявлений KBB (на круговую ось нанесены направления распространения пакетов в градусах, на радиусную ось — повторяемость направлений распространения в % от общего числа случаев): *а* —около острова Зеленый; *б* —около острова Онекотан; *в* — в Кроноцком и Камчатском заливах.

Fig. 4. Circular histograms of the repeatability of the propagation direction of internal waves packets manifestations (the circular axis shows the propagation directions of packets in degrees, the radius axis shows the repeatability of the propagation directions in % of the total number of cases): a – near island Zeleny; b –near the island of Onekotan; c –in the Kronotsky and Kamchatsky bays.





**Fig. 5.** Example of manifestations of subsequent internal waves packets registered on the Sentinel 1 radar from June 01, 2019.

тикальная структура вод в районе очага генерации № 3 близка к двухслойной. Результаты сопоставления фазовой скорости внутренних волн, полученной разными методами, представлены в таблице.

Учитывая расстояние между последовательными пакетами и величину приливного периода, фазовая скорость зарегистрированных последовательных проявлений варьируется от 0.54 до 0.61 м/с, что хорошо согласуется с данными из атласа фазовой скорости внутренних гравитационных волн за летний период, рассчитанной по климатическим данным. Это свидетельствует о том, что выдвинутое предположение верно, и проявления волн часто генерируются в указанных районах под действием приливной динамики.

В соответствии с [20], область повышенных значений коэффициента диапикнической диффу-

зии вокруг островов Курильской гряды довольно узкая, и многие зарегистрированные проявления КВВ нельзя приурочить к данной области. Отметим, что Курило-Камчатский регион находится в зоне действия ярко-выраженных поверхностных течений: преимущественно Камчатского и частично Ойясио [24], что, как отмечалось ранее, обусловливает высокую вихревую активность в регионе. Анализ оптических изображений прибора Landsat-8, охватывающих летний период показал, что вблизи очагов генерации КВВ часто регистрировались вихревые структуры различного масштаба. На рис. 6 показан пример регистрации вихревой структуры на оптическом изображении совмещенный с проявлениями КВВ полученными по данным анализа РЛИ (см. вклейку).

Рис. 6 демонстрирует циклоническую вихревую структуру с максимальным размером около 26 км (см. вклейку). В области данной структуры регистрируются многочисленные поверхностные проявления КВВ на расстоянии около 5 км друг от друга, распространяющиеся в одинаковом направлении. Малое расстояние между пакетами может свидетельствовать о механизме генерации, действующем с частотой в несколько раз меньше приливной. Учитывая опыт предыдущих исследований в схожих по физико-географическим условиям регионах [25, 26], мезомасштабные вихревые структуры могут служить источником генерации зарегистрированных проявлений. Аналогичные случаи влияния вихревой динамики на возникновение КВВ наблюдались и у побережья полуострова Камчатка [7].

Таким образом, наряду с приливным механизмом генерации в Курило-Камчатском регионе может постоянно действовать механизм, при котором генерация КВВ вызывается вихревыми структурами.

### 5. Заключение

В результате работы на 205 РЛИ, охватывающих акваторию Курило-Камчатского региона за летний период было обнаружено в общей сложности 927 пакетов проявлений КВВ. Было продемонстрировано широкое распространение проявлений по акватории региона. Расчет количества проявлений КВВ на квадрат сетки выявил очаги генерации, расположенные около островов Кунашир и Зеленый, у Кроноцкого полу-

Таблица

# Сопоставление фазовой скорости внутренних волн в очагах генерации по данным измерений на РЛИ и по данным [21]

## Comparison of the phase velocity of internal waves in the generation centers based on radar measurements and data from [21]

Очаг генерации	Расстояние между пакетами, км	Приливной период	Фазовая скорость, м/с	
			по РЛИ	по данным [21]
Nº 1	47.98	Суточный	0.56	0.54
Nº 2	52.74	Суточный	0.61	0.65
Nº 3	26.49	Полусуточный	0.61	0.62

острова, около мыса Шипунский в Кроноцком заливе и над хребтом Витязь в районе острова Онекотан. Была показана значительная внутрисезонная изменчивость интенсивности очага генерации над хребтом Витязь около островов Онекотан и Матуа. Выделены преобладающие направления распространения волн: проявления КВВ распространяются в довольно узком диапазоне направлений на восток и запад. Были получены детальные характеристики зарегистрированных проявлений КВВ. Так, проявления пакетов КВВ содержали 3–18 волн в пакете с длинами 80–1900 м при среднем значении в 400 м. Фронт лидирующего гребня цуга волн имел размеры 2–70 км, составляя в среднем 14 км. Было установлено, что во всех очагах генерации регистрируются проявления с длиной лидирующего гребня 40–70 км, что сопоставимо с размером интенсивных внутренних волн в других регионах Мирового океана. Исследование отдельных случаев регистрации проявлений КВВ продемонстрировало, что КВВ могут генерироваться как приливной динамикой, так и крупными вихревыми структурами, возникающими в результате отрыва меандров течений. Требуются более подробный анализ влияния атмосферной, приливной и фронтальной динамики на пространственно-временную изменчивость характеристик КВВ с привлечением данных разнородных спутниковых и контактных наблюдений, а также данных оперативного моделирования.

Выделенные районы представляют самостоятельный интерес для комплексных натурных исследований с целью изучения связи короткопериодной изменчивости гидрологических полей с процессами большего масштаба, что важно для разработки современных моделей океана высокого и сверх высокого разрешения.

#### 6. Финансирование

Формирование архива спутниковых изображений выполнено в рамках госзадания № 0128–2021–0014. Исследование характеристик проявлений короткопериодных внутренних волн выполнено при поддержке гранта РФФИ № 20–35–90054 Аспиранты.

#### Литература

- 1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 318 с.
- 2. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Горячие точки в поле внутренних волн в океане // Акустический журнал. 2007. Т. 53, № 3. С. 410–436.
- 3. *Jackson C.R.* An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004. 560 p. URL: https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\_index.html (дата обращения: 09.10.2020).
- 4. *Дикинис А.В.* и др. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «Алмаз-1» / Под ред. Л.Н. Карлина. М.: ГЕОС, 1999. 119 с.
- 5. *Mitnik L., Dubina V.* Satellite SAR sensing of oceanic dynamics in the Kuril straits area // Proc IGARSS2012 Munich, Germany, 2012. P. 7632–7635. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351860
- Sabinin K., Serebryany A. Intense short-period internal waves in the ocean // Journal of Marine Research. 2005. V. 63. N 1. P. 227–261. doi: 10.1357/0022240053693879
- 7. *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 гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 300–312. doi: 10.22449/0233–7584–2020–3–300–312
- 8. *Pao H.P., He Q.* Generation and transformation of intense internal waves on shelves // Abstracts for COAA Scientific Workshop. Maryland, 2002.
- Nakamura T., Kawasaki Y., Kono T., Awaji T. Large-amplitude internal waves observed in the Kruzenshtern Strait of the Kuril Island Chain and possible water transport and mixing // Continental Shelf Research. 2010. V. 30. N 6. P. 598–607. doi: 10.1016/j.csr.2009.07.010
- 10. *Navrotsky V.*, *Pavlova E.* Internal waves space structure in shelf zones of the far eastern seas. // Pacific Oceanography. 2010. N 1. P. 65–76.
- 11. *Родионов А.А., Семенов Е.В., Зимин А.В.* Развитие системы мониторинга и прогноза гидрофизических полей морской среды в интересах обеспечения скрытности и защиты кораблей ВМФ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 2. С. 89–108.
- 12. *Серебряный А.Н.* Воздействие внутренних волн больших амплитуд на буксируемый гидродинамический заглубитель // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 2. С. 39–45.
- 13. *Тюгин Д.Ю.*, *Наумов А.А.*, *Куркина О.Е.*, *Куркин А.А.*, *Пелиновский Е.Н.* Динамические эффекты в придонном слое, индуцированные аномальными внутренними волнами // Экологические системы и приборы. 2014. № 1. С. 20–28.

- 14. Fraser N. Surfing an oil rig // Energy Rev. 1999. N4.
- 15. Зимин А.В., Свергун Е.И. Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах Белого, Баренцева и Охотского морей: оценка повторяемости экстремальных высот и динамических эффектов в придонном слое // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 2. С. 66–72. doi: 10.7868/S2073667318040081
- 16. Богданов К.Т., Мороз В.В. Воды Курило-Камчатского течения и течения Ойясио. Владивосток: Дальнаука, 2004, 141 с.
- 17. Богданов К.Т., Мороз В.В. Структура, динамика и гидролого-акустические характеристики вод проливов Курильской гряды. Владивосток: Изд. Дальнаука, 2000. 52 с.
- 18. *Robinson I.S.* Discovering the ocean from space: The unique applications of satellite oceanography. London: Springer, 2010. 638 p.
- 19. *Мезенцева Л.И., Евдокимова Л.И., Вражкин А.Н.* Повторяемость опасных явлений на акватории дальневосточных морей, вызванных выходом тропических циклонов // Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 70–79.
- da Silva J.C.B., New A.L., Magalhaes J.M. On the structure and propagation of internal solitary waves generated at the Mascarene Plateau in the Indian Ocean // Deep-Sea Research. 2011. V. 58. P. 229–240. doi: 10.1016/j.dsr.2010.12.003
- 21. Nakamura T., Awaji T. Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment // J. Geophys. Res. 2004. V. 109: C09S07. doi: 10.1029/2003JC001850
- 22. Дубина В.А., Митник Л.М. Внутренние волны в Японском море: пространственно-временное распределение и характеристики по данным спутникового дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 37–46.
- 23. *Тюгин Д.Ю., Куркин А.А., Куркина О.Е.* Обновлённый программный комплекс для моделирования внутренних волн в Мировом океане с поддержкой облачных вычислений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 1. С. 24–34. doi: 10.7868/S2073667320010037
- 24. *Жабин И.А., Андреев А.Г.* Взаимодействие мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей в охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2014. № 4. С. 75–78. doi: 10.7868/S0205961414030075
- 25. *Романенков Д.А., Зимин А.В., Родионов А.А., Атаджанова О.А., Козлов И.Е.* Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 1. С. 59–72.
- 26. *Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д.* Исследование особенностей генерации и распространения внутренних волн в бесприливных морях по данным спутниковой радиолокации // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436, № 3. С. 407–411.

## References

- 1. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. V. 9. Sea of Okhotsk. Issue 1. Hydrometeorological conditions / Ed. B.H. Gluhovskoi. *SPb.*, *Gidrometeoizdat*, 1998. 318 p. (in Russian).
- 2. Sabinin K.D., Serebryanyi A.N. "Hot Spots" in the Field of Internal Waves in the Ocean. Acoust. Phys. 2007, 53, 3, 357–380.
- 3. *Jackson C.R.* An atlas of internal solitary-like waves and their properties. Alexandria: Global Ocean Associates, 2004. 560 p. URL: https://www.internalwaveatlas.com/Atlas2\_index.html (date of access: 09.10.2020).
- 4. *Dikinis A.V., Ivanov A. Yu.* et. al. Atlas of annotated radar images of the sea surface obtained by the "Almaz-1 spacecraft" / Ed. L.N. Karlin. *M., GEOS*, 1999. 119 p. (in Russian)
- 5. *Mitnik L., Dubina V.* Satellite SAR sensing of oceanic dynamics in the Kuril straits area. *Proc IGARSS2012 Munich, Germany*, 2012, 7632–7635. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351860
- 6. *Sabinin K., Serebryany A.* Intense short-period internal waves in the ocean. *Journal of Marine Research*. 2005, 63(1), 227–261. doi: 10.1357/0022240053693879
- 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, 27, 3, 278–289. doi: 10.22449/1573– 160X-2020–3–278–289
- 8. Pao H.P., He Q. Generation and transformation of intense internal waves on shelves. Abstracts for COAA Scientific Workshop. Maryland, 2002.
- Nakamura T., Kawasaki Y., Kono T., Awaji T. Large-amplitude internal waves observed in the Kruzenshtern Strait of the Kuril Island Chain and possible water transport and mixing. *Continental Shelf Research*. 2010, 30(6), 598–607. doi: 10.1016/j.csr.2009.07.010
- 10. *Navrotsky V.*, *Pavlova E*. Internal waves space structure in shelf zones of the far eastern seas. *Pacific Oceanography*. 2010, 1, 65–76.

- 11. *Rodionov A.A., Semenov E.V., Zimin A.V.* The development of a system of monitoring and forecast of hydrophysical fields of the marine environment in the interests of ensuring secrecy and protection of ships. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2012, 5, 2, 89–108 (in Russian).
- 12. *Serebryany A.N.* Effect of large-amplitude internal waves on towed hydrodynamical depressor. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2016, 9, 2, 39–45 (in Russian).
- 13. *Tyugin D.Y., Naumov A.A., Kurkina O.E., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N.* The dynamic effects in the bottom layer induced by abnormal internal waves. *Ekologicheskie Sistemy i Pribory.* 2014, 1, 20–28 (in Russian).
- 14. Fraser N. Surfing an oil rig. Energy Rev. 1999, N 4.
- 15. Zimin A.V., Svergun E.I. Short-period internal waves in the shelf areas of the White, Barents and Okhotsk Seas: estimation of the extreme heights occurrence and dynamic effects in the bottom layer. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2018, 11, 2, 66–72 (in Russian). doi: 10.7868/S2073667318040081
- 16. *Bogdanov K.T. et al.* The Kuril-Kamchatka current and Oyashio current water. *Vladivostok*, *Izd. Dalnauka*, 2004. 141 p. (in Russian).
- 17. Bogdanov K.T. et al. Structure, dynamics, and hydro-acoustic characteristics of the waters of the Kuril Ridge Straits. Vladivostok, Izd. Dalnauka, 2000. 52 p. (in Russian).
- 18. *Robinson I.S.* Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography. *London*, *Springer*, 2010. 638 p.
- 19. *Mezentseva L.I., Evdokimova L.I., Vrazhkin A.N.* Trends in hazardous phenomena over the far eastern seas caused by tropical cyclones. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2019, 44, 12, 837–843. doi: 10.3103/S1068373919120069
- 20. *da Silva J.C.B.*, *New A.L.*, *Magalhaes J.M.* On the structure and propagation of internal solitary waves generated at the Mascarene Plateau in the Indian Ocean. *Deep Sea Res.* 2011, 58, 229–240. doi: 10.1016/j.dsr.2010.12.003
- Nakamura T., Awaji T. Tidally induced diapycnal mixing in the Kuril Straits and its role in water transformation and transport: A three-dimensional nonhydrostatic model experiment. J. Geophys. Res. 2004, 109, C09S07. doi: 10.1029/2003JC001850
- 22. Dubina V.A., Mitnik L.M. Internal Waves in the Japan Sea: Space-time Distribution and Characteristics from Satellite Remote Sensing. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2007, 3, 37–46 (in Russian).
- 23. *Tyugin D. Yu., Kurkin A.A., Kurkina O. Ye.* Updated software package for internal waves modeling in the World Ocean with cloud computing support. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2020, 13, 1, 24–34. doi: 10.7868/S2073667320010037
- 24. *Zhabin I.A., Andreev A.G.* The interaction of the mesoscale and submesoscale eddies in the Sea of Okhotsk using satellite data. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2014, 4, 75–78 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961414030075 (in Russian).
- 25. *Romanenkov D.A., Zimin A.V., Rodionov A.A., Atazhanova O.A., Kozlov I.E.* Variability of fronts and features of mesoscale water dynamics in the White Sea. *Fundam. Prikl. Gidrofiz.* 2016, 9, 1, 59–72 (in Russian).
- 26. *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. *Doklady Earth Sciences*. 2011, 436, 1, 165–169.

К статье *Свергун Е.И., Зимин А.В., Лазуткина Е.С.* Характеристики проявлений короткопериодных внутренних волн Курило-Камчатского региона... *Svergun E.I., Zimin A.V., Lazutkina E.S.* Characteristics of manifestations of short-period internal waves of the Kuril-Kamchatka region...



**Рис. 3.** Пространственное распределение проявлений КВВ: *a* — карта пространственного положения лидирующих гребней проявлений КВВ за весь летний период; *б* — карта распределения количества волн в ячейке с размерами 0.5 × 0.5° за июнь (окружностями с цифрами показано положение основных очагов генерации КВВ); *в* — карта распределения количества волн в ячейке с размерами 0.5 × 0.5° за июль; *е* — карта распределения количества волн в ячейке с размерами 0.5 × 0.5° за август.

**Fig. 3.** Spatial distribution of the manifestations of the internal waves: a - a map of the spatial position of the leading ridges of the manifestations of the internal waves for the summer period; b - a map of the distribution of the number of waves in a cell with dimensions of  $0.5 \times 0.5^{\circ}$  in June (circles with numbers show the location of the main centers of generation of internal waves); c - a map of the distribution of the number of waves in a cell with dimensions of  $0.5 \times 0.5^{\circ}$  for July; d - a map of the distribution of the number of waves in a cell with dimensions of  $0.5 \times 0.5^{\circ}$  for July; d - a map of the distribution of the number of waves in a cell with dimensions of  $0.5 \times 0.5^{\circ}$  for August.

К статье *Свергун Е.И., Зимин А.В., Лазуткина Е.С.* Характеристики проявлений короткопериодных внутренних волн Курило-Камчатского региона...

*Svergun E.I., Zimin A.V., Lazutkina E.S.* Characteristics of manifestations of short-period internal waves of the Kuril-Kamchatka region...



**Рис. 6.** Пример регистрации вихревой структуры на композитном оптическом изображении в естественных цветах спутника Landsat-8 от 29 июля 2019 г. (белыми кривыми показаны лидирующие гребни проявлений волн).

Fig. 6. Example of registering a vortex structure on the composite optical image in natural colors of the Landsat-8 satellite from July 29, 2019 (white curves show the leading crests of wave manifestations).