

**Характеристики короткопериодных внутренних волн
в море Лаптевых и прилегающих районах Карского
и Восточно-Сибирского морей
по данным спутниковых радиолокационных наблюдений
в летне-осенний период 2019 года**

А. В. Кузьмин, И. Е. Козлов*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: ik@mhi-ras.ru*

Аннотация

Представлены результаты наблюдения короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых и прилегающих районах Карского и Восточно-Сибирского морей, полученные на основе анализа измерений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой Sentinel-1 A/B с июля по октябрь 2019 г. Анализ 639 радиолокационных изображений позволил идентифицировать 2081 случай поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн. Определены основные районы наблюдения короткопериодных внутренних волн и построены карты распределения их основных пространственных характеристик. Более 60 % случаев наблюдения короткопериодных внутренних волн пришлось на сентябрь, а наименьшее количество проявлений – на июль (9 %). В исследуемый летне-осенний период максимальное количество поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн зарегистрировано в районе м. Арктического, а также на обширной области континентального склона и северо-восточной части шельфа моря Лаптевых. Показано, что общее число случаев регистрации короткопериодных внутренних волн в 2019 г. на порядок выше, чем в 2011 г., а районы обнаружения короткопериодных внутренних волн существенно расширились. Кроме того, обнаружены новые районы регулярной генерации короткопериодных внутренних волн в прол. Шокальского, между Новосибирскими о-вами, а также в глубоководной части акватории. Наиболее интенсивный район генерации поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн располагался в области между изобатами 50 и 200 м, севернее о-ва Котельный. На данном участке акватории максимальное суммарное количество поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн превышало 15. Отмечается, что при значительном увеличении общего количества наблюдений короткопериодных внутренних волн в 2019 г. диапазон изменчивости значений их основных пространственных характеристик в 2019 г. примерно такой же, как и в 2011 г.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, море Лаптевых, Карское море, Восточно-Сибирское море, спутниковые радиолокационные изображения, приливные течения

© Кузьмин А. В., Козлов И. Е., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0010.

Для цитирования: Кузьмин А. В., Козлов И. Е. Характеристики короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых и прилегающих районах Карского и Восточно-Сибирского морей по данным спутниковых радиолокационных наблюдений в летне-осенний период 2019 года // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 3. С. 16–27. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-16-27

Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Laptev Sea and Adjacent Regions of the Kara and East Siberian Seas Based on Satellite Radar Data during Summer-Autumn Period of 2019

A. V. Kuzmin, I. E. Kozlov*

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: ik@mhi-ras.ru*

Abstract

This paper presents the results of short-period internal waves (SIWs) observations in the Laptev Sea and adjacent areas of the Kara and East Siberian Seas based on analysis of satellite synthetic aperture radar (SAR) Sentinel-1 A/B data between July and October 2019. Analysis of 639 SAR images allowed identifying 2081 surface manifestations (SM) of SIWs. Main regions of SIW observations were determined and their spatial characteristics mapped. More than 60 % of registered SIWs were identified in September, and the lowest number of manifestations (9 %) was registered in July. Maximum number of SIW observations was found near the Arctic Cape, over the large area of the continental slope and in the northeastern shelf of the Laptev Sea. It is shown that the total number of SIW identifications in 2019 was much higher than in 2011, and the principal regions of SIW observations expanded. Moreover, new regions of regular SIW generation were determined in the Shokalsky Strait, between the New Siberian Islands and over the deep sea regions. The most intensive generation area was determined north of the Kotelny Island, between 50 m and 200 m isobaths. In this region, the total number of SIW detections exceeded 15 cases. While a significant increase in the number of SIW detections is observed in 2019, the overall range of the values of SIW spatial characteristics in 2019 is almost the same as in 2011.

Keywords: short period internal waves, Laptev Sea, Kara Sea, East Siberian Sea, satellite radar images, tidal currents

Acknowledgement: the study was carried out under state assignment no. FNNN-2021-0010 of FSBSI FRC MHI RAS.

For citation: Kuzmin, A.V. and Kozlov, I.E., 2022. Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Laptev Sea and Adjacent Regions of the Kara and East Siberian Seas Based on Satellite Radar Data during Summer-Autumn Period of 2019. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 16–27. doi:10.22449/2413-5577-2022-3-16-27

Введение

Море Лаптевых – окраинный водоем Северного Ледовитого океана (СЛО), характеризуется активной генерацией морского льда и образованием полыней [1]. Гидрологический режим акватории отличается интенсивным речным стоком.

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) – важный элемент динамической структуры океана, во многом определяющий горизонтальный и вертикальный перенос вещества, импульса и энергии. Из-за увеличения скорости освоения шельфа арктических морей обостряется вопрос изучения механизмов и районов генерации КВВ, особенностей их распространения и воздействия на гидрологический режим Арктического бассейна [2]. Важное влияние на образование КВВ оказывают приливные течения и их взаимодействие с неоднородностями донной топографии в шельфовой зоне и в районах подводных склонов [3–5].

Известно, что по данным спутниковых наблюдений можно определить основные районы генерации и распространения поверхностных проявлений (ПП) КВВ [3, 6]. В целом работ по изучению КВВ в море Лаптевых на основе спутниковых данных не так много. Предыдущие работы по данному району с использованием спутниковых данных за 2007 и 2011 гг. показали, что в акватории регулярно наблюдаются пакеты КВВ [7, 8]. В этих же работах отмечалось, что обнаруженные ВВ, по всей видимости, имели в основном приливной характер образования и распространялись в отдельных районах шельфа и континентального склона.

В данной работе выполнен анализ обширного массива спутниковых радиолокационных (РЛ) данных *Sentinel-1 A/B* за летне-осенний период 2019 г. и представлены результаты исследования характеристик поля КВВ в море Лаптевых и частично прилегающих акваториях Карского и Восточно-Сибирского морей. В ходе работы выделены основные районы генерации и распространения КВВ на акватории, определены и картированы их основные пространственные характеристики за указанный период.

Данные и методы

Исследование пространственного распределения КВВ и их характеристик на акватории моря Лаптевых производилось на основе анализа данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) *Sentinel-1 A/B*, запущенных в 2014–2016 гг. Регулярная РСА-съемка позволяет получать данные с высокой частотой (каждые 1–2 дня) в широкой полосе обзора (около 250 км) и пространственным разрешением 40–90 м.

Обработка спутниковых данных и идентификация ПП внутренних волн на РЛ-изображениях (РЛИ) проводились в соответствии с методикой, описанной в работе [6].

На рис. 1 показана карта покрытия района исследований РСА-съемкой. Как видно, покрытие РЛ-съемкой достаточно неравномерное: большая часть снимков приходится на западную часть акватории (западнее м. Арктического), центральную глубоководную часть и область в районе Новосибирских о-вов. Наименее обеспеченные данными районы находятся в прол. Вилькицкого и прибрежной части моря Лаптевых, а также возле заливов Анабарского, Хатангского, Оленекского и Янского.

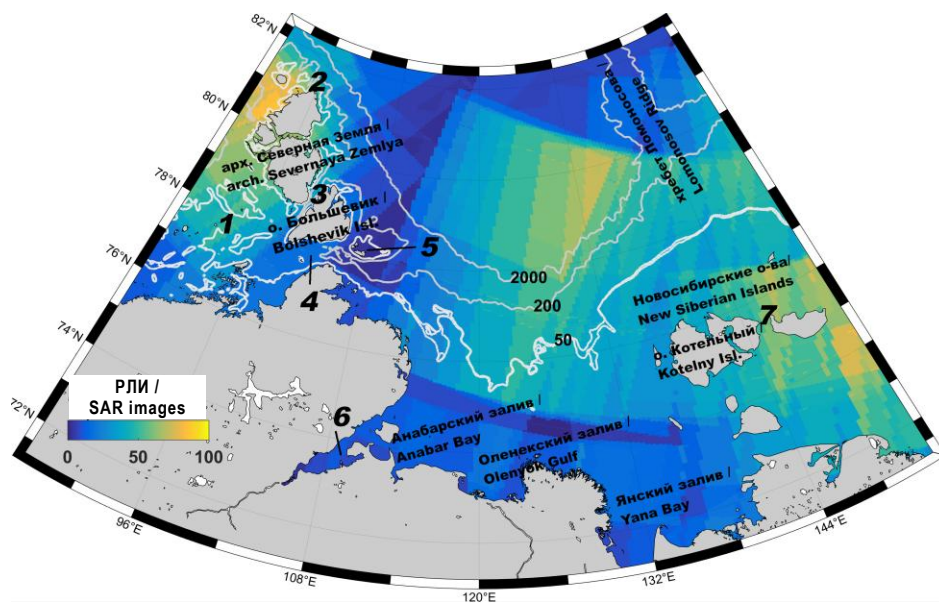


Рис. 1. Покрытие акватории моря Лаптевых РЛ-съемкой *Sentinel-1* с 1 июля по 31 октября 2019 г. Белыми линиями показано положение изобат 50, 200 и 2000 м. Цифрами обозначены: 1 – острова Сергея Кирова; 2 – мыс Арктический; 3 – пролив Шокальского; 4 – пролив Вилькицкого; 5 – остров Малый Таймыр; 6 – Хатангский залив; 7 – Благовещенский пролив

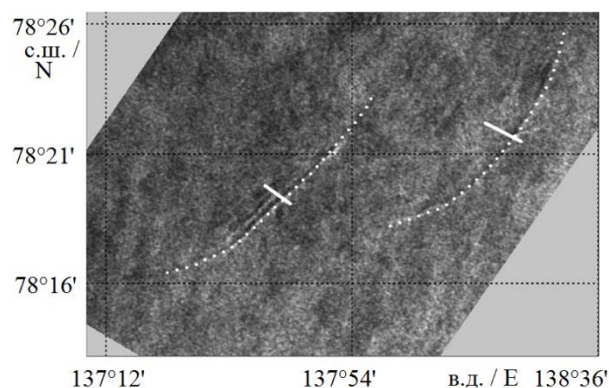
Fig. 1. Coverage of the Laptev Sea by *Sentinel-1* SAR data from 1 July to 31 October 2019. White lines indicate 50-m, 200-m, and 2000-m isobaths. Numbered positions: 1 – Sergey Kirov Islands, 2 – Arctic Cape, 3 – Shokalsky Strait, 4 – Vilkitsky Strait, 5 – Maly Taymyr Island, 6 – Khatanga Gulf, 7 – Blagoveshensky Strait

Анализ пространственного распределения ПП КВВ выполнен при помощи программы *SNAP* (англ. *Sentinel Application Platform*). На рис. 2 показан увеличенный фрагмент РЛИ *Sentinel-1* за 09.19.2019 (22:50 UTC), на котором отчетливо видны проявления двух пакетов КВВ, направленных на юго-восток.

Результаты спутниковых наблюдений

Всего в ходе исследования обработано 639 РЛИ *Sentinel-1 A/B* за период с 1 июля по 31 октября 2019 г. Подробное изучение полученных РЛИ позволило обнаружить 30 снимков с ПП КВВ. Наибольшая часть ПП КВВ приходится на сентябрь (1318 ПП КВВ, ~60 %), а наименьшая – на июль (239 ПП КВВ, ~9 %). Вариации количества идентифицированных проявлений КВВ за разные месяцы могут быть связаны как с внутрисезонной изменчивостью вертикальной стратификации, определяющей интенсивность генерации КВВ, так и с изменчивостью ветровых и ледовых условий, определяющих возможность идентификации ПП КВВ в спутниковых данных. В таблице отражена статистика проанализированных данных с июля по октябрь 2019 г.

В результате обработки 639 РЛИ было обнаружено 2081 ПП КВВ за летне-осенний период 2019 г. Пространственное распределение лидирующих волн в пакетах КВВ отражено на рис. 3, а. Распространение КВВ наблюдалось преимущественно в виде пакетов уединенных волн с последовательным



Р и с . 2 . Пример проявления пакетов КВВ на РЛИ *Sentinel-1* за 09.19.2019 (22:50 UTC) на акватории моря Лаптевых. Белой пунктирной линией отмечено положение гребней лидирующих волн в пакетах КВВ, белой сплошной – длина соответствующих пакетов

Fig. 2. An example of manifestation of SIWs in Sentinel-1 SAR image acquired on 09.10.2019 (22:50 UTC) in the Laptev Sea. White dotted lines indicate positions of leading waves in the SIW packets, the white solid line shows wave lengths of the relevant packets

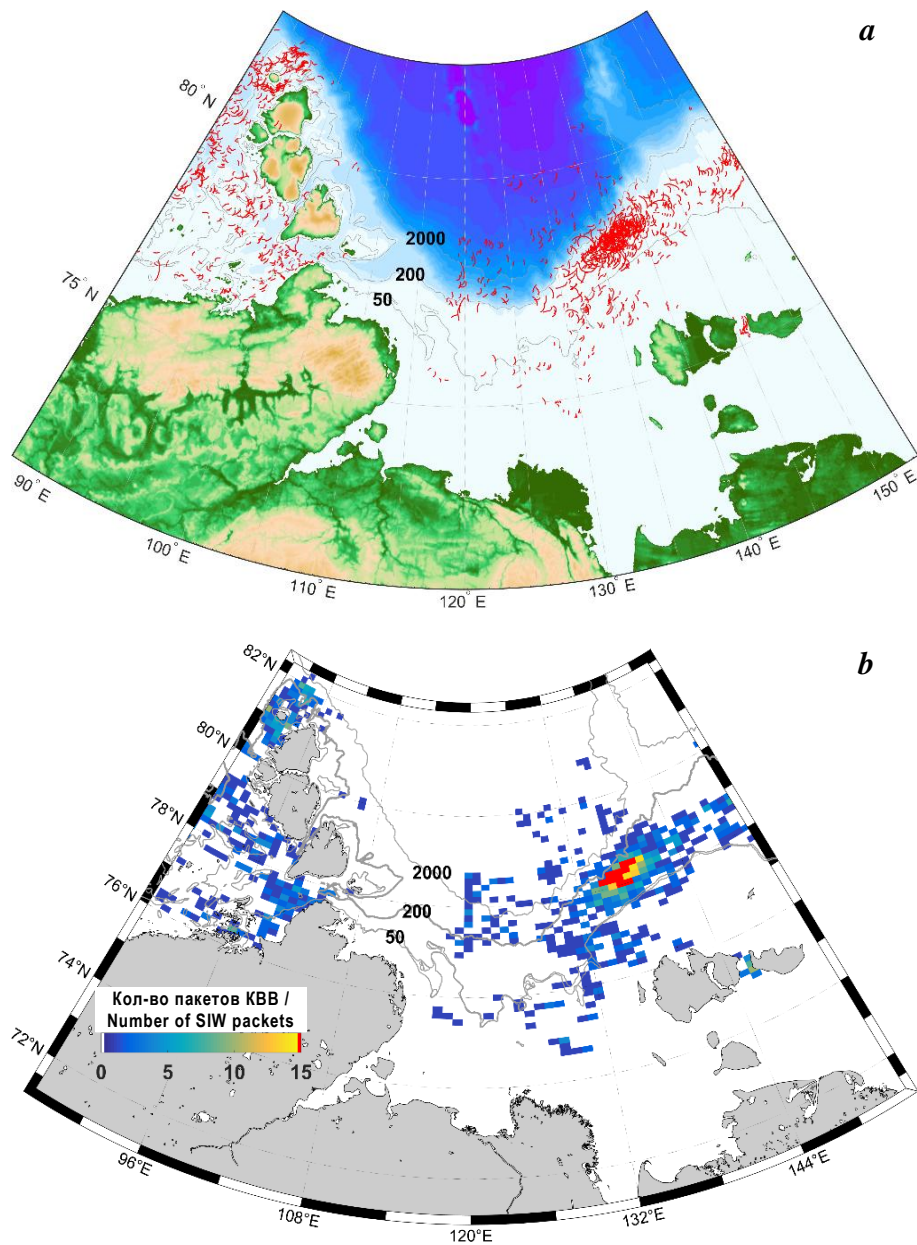
Статистика проанализированных спутниковых данных PCA *Sentinel-1 A/B* с распределением ПП КВВ в период с июля по октябрь 2019 г.

Statistics of analyzed Sentinel-1 A/B SAR data and the number of the SIW SM from July to October 2019

Месяц / Month	Количество / Number of		
	проанализированных снимков / analyzed images	снимков с КВВ / images with SIWs	отмеченных пакетов КВВ / registered SIW packets
Июль / July	164	4	191
Август / August	147	7	422
Сентябрь / September	175	16	1318
Октябрь / October	153	3	150
Всего / Total	639	30	2081

результатам анализа, пакеты КВВ были направлены как вдоль изобат, в сторону увеличения глубин, так и в сторону мелководного шельфа. Из рис. 3, а видно, что распределение пакетов КВВ по акватории моря неравномерно.

По результатам анализа данных 2011 г. [7, 8], проявления внутренних волн чаще всего отмечались в четырех ключевых районах: северо-западнее архипелага Северная Земля, на востоке от о-ва Большевик, в районе устьев рек Анабары, Лены и Хатанги, а также севернее Новосибирских о-вов. Очень похожее



Р и с. 3. Карты распределения пакетов КВВ на акватории моря Лаптевых и в смежных районах с июля по октябрь 2019 г.: *a* – положение лидирующих гребней волн в пакетах КВВ; *b* – распределение суммарного количества ПП КВВ. Серыми линиями показано положение изобат 50, 200 и 2000 м

Fig. 3. Distribution maps of the SIW packets in the Laptev Sea and adjacent regions from July to October 2019: *a* – locations of the leading wave crests in the SIW packets; *b* – total number of SIW surface manifestation. Grey lines indicate 50-m, 200-m, and 2000-m isobaths

распределение ПП КВВ наблюдалось и в 2019 г., за исключением прибрежных районов с выраженным стоком рек и восточнее о-ва Малый Таймыр. Этот факт отчасти может быть объяснен тем, что обеспеченность РЛ-съемкой этих районов в 2019 г. была значительно ниже. С июля по октябрь 2019 г. максимальное количество ПП КВВ зарегистрировано на обширной области северо-восточного шельфа моря Лаптевых. В отличие от результатов 2011 г., большое количество проявлений КВВ также наблюдается над континентальным склоном и у бровки шельфа в центральной части моря. Также впервые проявления КВВ в большом количестве наблюдаются в глубоководной части акватории юго-западнее хребта Ломоносова. В западной части акватории большое число КВВ обнаружено северо-западнее м. Арктического, а также западнее о-вов архипелага Северная Земля. Новые районы наблюдения КВВ обнаружены к северо-западу от о-ва Котельного, в прол. Благовещенском и между о-вом Кирова и м. Низким, включая прол. Вилькицкого со стороны Карского моря.

На рис. 3, *b* показана карта распределения суммарного количества наблюдавшихся ПП КВВ на акватории моря Лаптевых в узлах сетки размером 100×60 ячеек. На большей части района исследований суммарное количество ПП КВВ в среднем не превышало пяти случаев регистрации за весь период наблюдений. Однако в прол. Благовещенском и северо-западнее м. Арктического количество случаев регистрации КВВ достигало десяти. Самым интенсивным районом генерации ПП КВВ является область между изобатами 50 и 200 м севернее о-ва Котельного. Здесь суммарное количество ПП КВВ на некоторых участках превышает 15 случаев, а в среднем находится на уровне 10–15 случаев. Этот район характеризуется средней обеспеченностью данными, при этом в нем достаточно часто регистрируются ПП КВВ. Это подтверждает, что данный район является ключевым местом генерации ВВ в море Лаптевых. Отметим, что этот район характеризуется максимальными для района исследований скоростями приливных течений, достигающими 1 м/с [4, 9].

Сравнение полученных результатов с результатами работы прошлых лет позволяет сделать вывод о том, что районы генерации КВВ могут меняться от года к году. Например, в 2019 г. минимальное количество ПП КВВ наблюдалось в секторах, расположенных восточнее о-ва Малый Таймыр и севернее о-ва Большевик, где, по данным 2011 г., оно было максимальным [7]. С другой стороны, области севернее Новосибирских о-вов, в прол. Вилькицкого и северо-западнее м. Арктического являются достаточно устойчивыми участками генерации внутренних волн. Эти области существенно расширились в последние годы, что не в последнюю очередь может быть вызвано так называемой атлантификацией этого сектора Арктики [10–13]. Отметим также, что фоновые ледовые условия несколько различались в 2019 и 2011 гг.: за рассмотренный период среднее положение кромки льда в 2019 г. находилось севернее, чем в 2011 г. Этот факт мог повлиять как на формирование более благоприятных условий для генерации КВВ за счет таяния большего количества льда, так и на способность наблюдать большие участки открытой воды в северной части района исследований.

На рис. 4 показаны карты распределения некоторых пространственных характеристик КВВ – длины лидирующего фронта КВВ (рис 4, *a*) и длины пакета КВВ (рис 4, *b*).

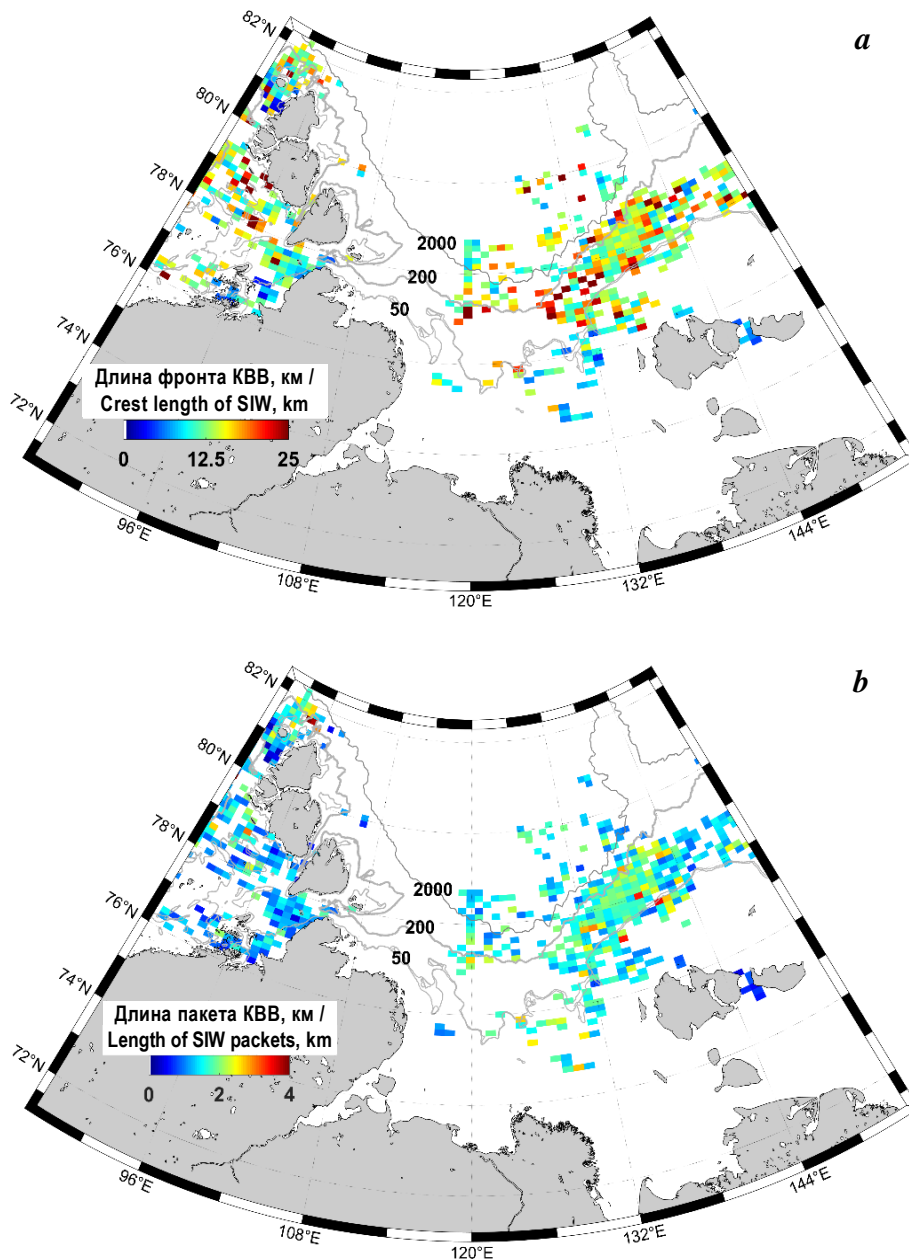


Рис. 4. Карты пространственного распределения характеристик КВВ на акватории моря Лаптевых и в смежных районах с июля по октябрь 2019 г.: *a* – длина фронта лидирующего гребня в пакете КВВ; *b* – длина пакета КВВ. Серыми линиями показано положение изобат 50, 200 и 2000 м

Fig. 4. Spatial distribution maps of the SIW characteristics in the Laptev Sea and adjacent regions from July to October 2019: *a* – crest length of the SIW packets; *b* – length of SIW packets. Grey lines indicate 50-m, 200-m, and 2000-m isobaths

Из рис. 4, *a* видно, что генерация пакетов КВВ с более протяженными фронтами лидирующих гребней отмечается вдоль всего шельфа моря Лаптевых. Наиболее протяженные гребни обнаружены в центральной части акватории и северо-западнее о-ва Котельного. В указанных районах длина фронтов достигает максимальных значений (50–60 км). В проливах Вилькицкого, Шокальского и Благовещенском наблюдались более короткие цуги КВВ, значение длин фронтов не превышало 12 км.

Распределение значений длины пакетов КВВ показано на рис. 3, *b*. Пакеты КВВ с максимальными значениями длины пакетов до 3.3 км обнаружены к северу от о-ва Котельного. В районе проливов длина пакетов варьируется от 0.9 км до 2.1 км. На участке к северу от Новосибирских о-вов формируются более протяженные пакеты КВВ. Подобная тенденция также отмечается севернее мыса Арктического, где значения длины пакетов ПП КВВ несколько меньше. Примечательна зона в бассейне Карского моря: здесь отмечаются КВВ с более протяженными лидирующими гребнями, но с меньшими значениями ширины пакетов. На участке от о-вов Сергея Кирова до о-ва Малый Таймыр и на всей протяженности прол. Вилькицкого наблюдается генерация КВВ с длинами гребней меньших диапазонов (7–10 км) при той же длине пакетов. Вероятно, это можно объяснить воздействием фоновых непривливых течений, которые способны влиять на пространственные характеристики внутренних волн в зависимости от направления течения [14, 15].

Распределение средних значений длины лидирующего гребня и длины пакетов КВВ отражено в гистограммах на рис. 5. Характерные для моря Лаптевых значения длины фронта лидирующих гребней варьируются от 2 до 60 км

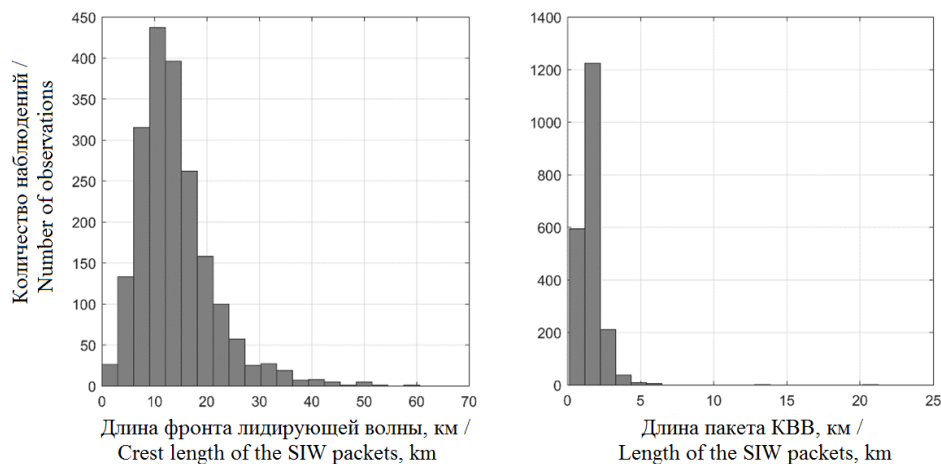


Рис. 5. Гистограммы характеристик КВВ на акватории моря Лаптевых с июля по октябрь 2019 г.: *a* – распределение значений длины фронта лидирующего гребня КВВ в пакете; *b* – распределение значений ширины пакета КВВ

Fig. 5. Histograms of the SIW characteristics in the Laptev Sea and adjacent regions from July to October 2019: *a* – crest length of the SIW packets; *b* – length of the SIW packets

при среднем значении 15.8 км. Чаще всего волны протяженностью более 20 км наблюдаются в центральной и восточной частях акватории. Диапазон изменений длины пакетов КВВ – от 400 м до 5.2 км со средним значением по всей акватории 1.85 км (рис. 5, *b*).

Заключение

В работе представлены результаты исследования поля короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых, а также прилегающих акваторий Карского и Восточно-Сибирского морей, полученные в ходе анализа массива спутниковых данных *Sentinel-1 A/B* за летне-осенний период 2019 г. В ходе обработки 639 РЛИ выявлено 30 изображений с выраженными ПП ВВ. В общей сложности зарегистрировано 2081 ПП КВВ, построены карты с местоположением ВВ и их пространственными характеристиками.

В ходе работы установлено, что в 2019 г. общее число случаев регистрации КВВ было существенно выше по сравнению с 2011 г. Количество использованных спутниковых РЛИ за летне-осенний период 2019 г. в два раза превышало их количество в 2011 г., при этом общее количество случаев регистрации ПП КВВ в 2019 г. примерно в 20 раз выше их количества в 2011 г. Интересно отметить, что при значительном увеличении общего количества наблюдений КВВ в 2019 г. диапазон изменчивости значений их основных пространственных характеристик примерно такой же, как и в 2011 г.

Важно, что, помимо общего увеличения случаев регистрации КВВ на порядок, районы проявления КВВ также существенно расширились. Кроме того, обнаружены новые районы регулярной генерации КВВ в прол. Шокальского, между Новосибирскими о-вами, а также в глубоководной части акватории. Все эти факты косвенно подтверждают гипотезу о том, что наблюдающаяся «атлантификация» евразийского сектора Арктики, характеризующаяся среди прочего интенсификацией течений на фоне общего ослабления вертикальной стратификации, может способствовать усилению генерации КВВ в Арктике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов Е. Г., Писарев С. В. Внутренние волны и образование полыньи в море Лаптевых // Доклады Академии наук. 2004. Т. 398, № 2. С. 255–258.
2. Моделирование трансформации солитонов внутренних волн на шельфе моря Лаптевых / Т. Г. Талипова [и др.] // Известия Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова. М., ; Нижний Новгород : АИН РФ, 2003. Т. 4 : Прикладная математика и механика. С. 3–16.
3. Мониторинг короткопериодных внутренних волн в белом море / А. В. Зимин [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 51–61. doi:10.7868/S0205961415030148
4. Tidally forced lee waves drive turbulent mixing along the Arctic Ocean margins / I. Fer [et al.] // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47, iss. 16. e2020GL088083. doi:10.1029/2020GL088083
5. High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen / A. V. Marchenko [et al.] // Continental Shelf Research. 2021. Vol. 227. 104523. doi:10.1016/j.csr.2021.104523

6. Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Карском море по данным спутниковых радиолокационных измерений / И. Е. Козлов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 44–59. doi:10.7868/S0205961415040053
7. *Зубкова Е. В., Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н.* Наблюдение короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых на основе спутниковых радиолокационных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 6. С. 99–109. doi:10.21046/2070-7401-2016-13-6-99-109
8. *Kozlov I. E., Zubkova E. V., Kudryavtsev V. N.* Internal solitary waves in the Laptev Sea: first results of spaceborne SAR observations // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. Vol. 14, iss. 11. P. 2047–2051. doi:10.1109/LGRS.2017.2749681
9. *Каган Б. А., Тимофеев А. А.* Высокорастворимое моделирование полусуточных внутренних приливных волн в безледный период в море Лаптевых: их динамика и энергетика // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 5. С. 586–597. doi:10.31857/S0002351520050041
10. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean / I. V. Polyakov [et al.] // Science. 2017. Vol. 356, iss. 6335. P. 285–291. doi:10.1126/science.aai8204
11. Внутренний прилив в проливе Карские Ворота / Е. Г. Морозов [и др.] // Океанология. 2017. Т. 57, № 1. С. 13–24. doi:10.7868/S0030157417010105
12. *Каган Б. А., Тимофеев А. А.* Динамика и энергетика полусуточных приливов в море Лаптевых: результаты высокоразрешающего моделирования поверхностного прилива M_2 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 1. С. 15–23. doi:10.7868/S2073667320010025
13. Intensification of near-surface currents and shear in the Eastern Arctic Ocean / I. V. Polyakov [et al.] // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47, iss. 16. e2020GL089469. doi:10.1029/2020GL089469
14. Tidal conversion and mixing poleward of the critical latitude (an Arctic case study) / T. P. Rippeth [et al.] // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, iss. 24. P. 12349–12357. doi:10.1002/2017GL075310
15. *Каган Б. А., Софьина Е. В.* Влияние приливного диапикнического перемешивания на климатические характеристики моря Лаптевых в безледный период // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 218–234. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-218-234

Поступила 05.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 07.05.2022 г.; принята к публикации 06.07.2022 г.; опубликована 26.09.2022 г.

Об авторах:

Кузьмин Алексей Владимирович, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID 0000-0002-4182-3009**.

Козлов Игорь Евгеньевич, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6378-8956**, **ResearcherID: G-1103-2014**, *ik@mhi-ras.ru*

About the authors:

Alexey V. Kuzmin, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation)

Igor E. Kozlov, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-6378-8956**, **ResearcherID: G-1103-2014**, *ik@mhi-ras.ru*

Заявленный вклад авторов:

Кузьмин Алексей Владимирович – обработка и анализ данных, подготовка и редактирование текста статьи

Козлов Игорь Евгеньевич – постановка задачи, обработка и анализ данных, подготовка графического материала, редактирование текста статьи

Contribution of the authors:

Alexey V. Kuzmin – data processing and analysis, article text preparation and revision

Igor E. Kozlov – problem statement, data processing and analysis, preparation of visual materials, article text revision

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All the authors have read and approved the final manuscript.