

## Изменчивость характеристик прикромочной ледовой зоны и поля внутренних волн у архипелага Шпицберген по спутниковым данным *Sentinel-1*

Т. В. Михайличенко \*, Л. А. Петренко, И. Е. Козлов

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\* e-mail: fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru*

### Аннотация

Представлены результаты наблюдений за кромкой поля дрейфующих льдов и поверхностными проявлениями короткопериодных внутренних волн по данным спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой *Sentinel-1 A/B* в июне – сентябре 2019 г. Проанализировано 1200 изображений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой, на которых фиксировалось положение границы распространения льдов и было зарегистрировано 387 поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн. В рассматриваемый период 2019 г. максимально южное положение кромки поля дрейфующих льдов в проливе Фрама на 79° с. ш. зафиксировано 20 июня. Крайнего северного положения на 82° с. ш. граница льдов достигла 16 сентября. Сезонное уменьшение количества льда на рассматриваемой акватории происходило более интенсивно в юго-восточном секторе. Наибольшее количество поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн выявлено в августе – 162 пакета. Максимальные значения повторяемости короткопериодных внутренних волн за рассматриваемый период отмечались в шельфовой области к северо-западу и к югу от архипелага Шпицберген. Внутренние волны наблюдались в виде пакетов из 4–5 волн. Максимальные значения длины фронта лидирующей волны составляли 30–40 км и наблюдались к югу от архипелага Шпицберген. Преобладали короткопериодные внутренние волны с длинами фронта лидирующей волны 7–10 км. Наибольшая повторяемость отмечена у волн с шириной пакета 3–4 км. Представлены детальные карты повторяемости внутренних волн и пространственного распределения их основных параметров. Проанализирована связь изменчивости параметров внутренних волн с изменчивостью границы распространения льдов. Получено, что плотностные градиенты, возникающие при таянии льда на кромке ледового поля, оказывают влияние на генерацию и распространение короткопериодных внутренних волн. Сочетание процесса таяния льда, приливных течений и влияния донной топографии приводит к генерации крупных пакетов короткопериодных внутренних волн.

**Ключевые слова:** короткопериодные внутренние волны, спутниковые радиолокационные изображения, прикромочная ледовая зона, архипелаг Шпицберген, пролив Фрама

© Михайличенко Т. В., Петренко Л. А., 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 пространственно-временной изменчивости поля внутренних волн выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2021-0010, анализ пространственно-временной изменчивости прикромочной ледовой зоны и ее связи с полем внутренних волн выполнен в рамках гранта РФФ № 21-17-00278.

**Для цитирования:** Михайличенко Т. В., Петренко Л. А., Козлов И. Е. Изменчивость характеристик прикромочной ледовой зоны и поля внутренних волн у архипелага Шпицберген по спутниковым данным *Sentinel-1* // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 38–52. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-38-52

## Variability of Marginal Ice Zone Characteristics and Internal Wave Field near Svalbard according to Sentinel-1 Satellite Data

T. V. Mikhaylichenko \*, L. A. Petrenko, I. E. Kozlov

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail: [fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru](mailto:fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru)

### Abstract

The paper presents the results of observations of the ice edge drift and surface manifestations of short-period internal waves according to Sentinel-1 A/B spaceborne synthetic aperture radar data in June – September 2019. We analyzed 1200 spaceborne synthetic aperture radar images used to record the ice edge position and 387 surface manifestations of short-period internal waves. During the study period in 2019, the maximum southern position of the drifting ice edge in Fram Strait at 79° N was recorded on 20 June. The ice edge boundary reached its maximum northern position at 82° N on 16 September. The seasonal decrease in ice area in the study region was more intensive in the south-eastern sector. The largest number of surface manifestations of short-period internal waves was detected in August: 162 packets. The maximum probability of short-period internal waves during the study period was observed in the shelf areas to the northwest and south of Svalbard. Internal waves were observed as packets of 4–5 waves. The maximum lengths of the leading wave front were 30–40 km and were observed to the south of Svalbard. Short-period internal waves with leading wave front lengths of 7–10 km prevailed. The highest probability was noted for waves with a packet width of 3–4 km. The paper presents detailed maps of the internal waves' probability and the spatial distribution of their main parameters. The paper analyzes the relationship between the variability of internal wave parameters and that of the ice edge. It is shown that density gradients resulting from ice melting at the ice edge affect the generation and propagation of short-period internal waves. The combination of the melting process, tidal currents and influence of the bottom topography leads to the generation of large packets of short-period internal waves.

**Keywords:** short-period internal waves, spaceborne radar images, marginal ice zone, Svalbard, Fram Strait

**Acknowledgements:** the research of spatial-temporal variability of the internal wave field was performed under state assignment of FSBSI FRC MHI on topic no. FNNN-2021-0010. The analysis of spatial-temporal variability of the marginal ice zone and its relationship with the internal wave field was performed under grant no. 21-17-00278 of the Russian Science Foundation.

**For citation:** Mikhaylichenko, T.V., Petrenko, L.A. and Kozlov, I.E., 2022. Variability of Marginal Ice Zone Characteristics and Internal Wave Field near Svalbard according to Sentinel-1 Satellite Data. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 38–52. doi:10.22449/2413-5577-2022-2-38-52

### **Введение**

В настоящее время сохраняется интерес к исследованию внутренних волн (ВВ) в арктических морях. Наряду с исследованиями, проведенными на основе контактных измерений [1–4], спутниковые наблюдения дают возможность получить картину пространственного распределения очагов генерации внутренних волн на всей свободной ото льда акватории Северного Ледовитого океана. На данный момент выполнены исследования по выявлению ВВ и оценке их характеристик для ряда арктических морей [5–8]. Примыкающие же к арх. Шпицберген акватории не рассматривались комплексно. В то же время омывающие архипелаг воды характеризуются особенными гидрологическими параметрами, сложной системой переноса тепла с течениями, постоянным выносом дрейфующих льдов из северной полярной области через прол. Фрама [9–11]. Таким образом, сочетание сложной топографии дна и приливно-отливных движений вод вблизи арх. Шпицберген создает все условия для возможной генерации ВВ. По результатам моделирования и контактных измерений к северу и юго-востоку от архипелага были обнаружены короткопериодные ВВ (КВВ) [1, 8, 12, 13]. В рассматриваемом нами районе на основе последовательных измерений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) также были выявлены поверхностные проявления КВВ и определены их фазовые скорости [14].

Тем не менее всеохватывающего исследования очагов генерации и распространения поля КВВ у архипелага и примыкающего к нему прол. Фрама не проводилось. В связи с этим целью данной работы является определение ключевых районов генерации и основных пространственно-временных характеристик КВВ вблизи арх. Шпицберген и в прол. Фрама на основе анализа массива РСА-изображений спутника *Sentinel-1 A/B* и рассмотрение связи характеристик КВВ с границей поля дрейфующих льдов в теплый период 2019 г.

### **Исходные данные и методы исследования**

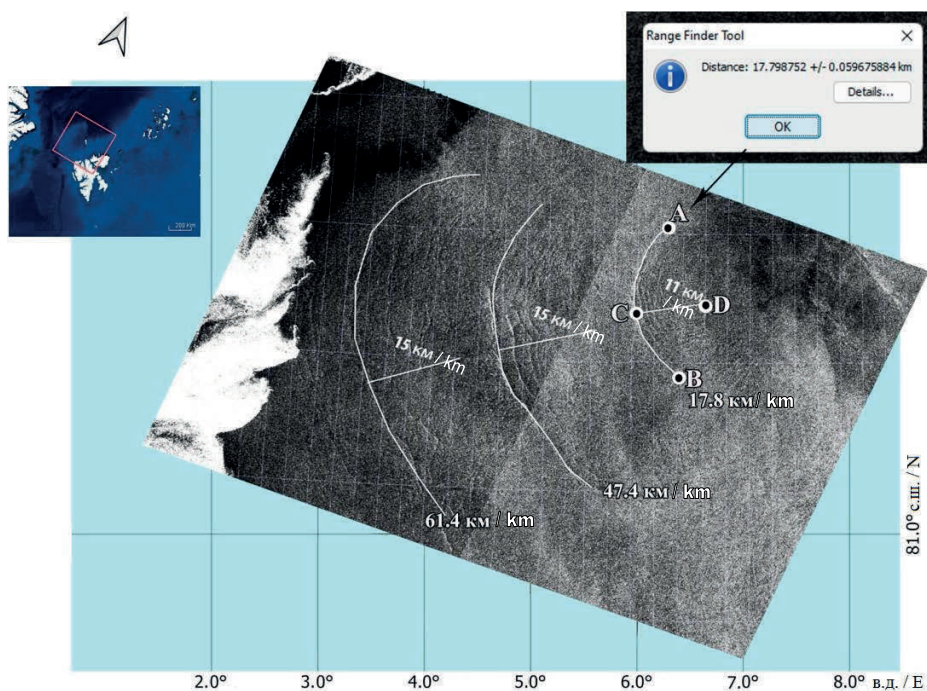
Для анализа пространственной изменчивости поля КВВ в прол. Фрама и шельфовой области арх. Шпицберген использовались радиолокационные изображения (РЛИ) спутника *Sentinel-1 A/B* за июнь – сентябрь 2019 г. из архивов системы Европейских центров морских прогнозов *Copernicus Open Access Hub* (URL: <https://scihub.copernicus.eu>).

По спутниковым РЛИ фиксировалось положение границы распространения льдов (кромка) и поверхностные проявления КВВ (ПП КВВ). Анализ и идентификация внутренних волн на изображениях РСА проводились в соответствии с методикой, описанной в работе [6]. Всего было проанализировано 1200 РЛИ, на которых выявлено 387 ПП КВВ. За ледовую кромку принималось положение границы распространения льдов, отражающее переход лед – чистая вода без учета сплоченности льда.

Процедура анализа РСА-изображений проводилась с помощью программы *SNAP* © *ESA (Sentinel Application Platform)* (URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>). Это программное обеспечение позволяет выполнять предварительную обработку и визуализацию РЛИ, выбирать интересующую часть изображения, проводить сечение через пакет КВВ и определять его основные пространственные характеристики – длину фронта лидирующей волны и ширину пакета.

Процедура анализа РСА-изображений проводилась в два этапа. На первом этапе РСА-изображения подвергались низкочастотной фильтрации, т. е. исключались пространственные вариации поля РЛ-сигнала на масштабах, существенно больших длины ВВ. После этой процедуры проявления пакетов ВВ на РСА-изображениях становились более контрастными, и далее они подвергались количественному анализу.

На рис. 1 показан пример проявления ВВ на РЛИ в виде трех последовательных пакетов КВВ. Дуга *A–B* – общая длина фронта лидирующей волны, она составила 17.8 км, отрезок *C–D* – длина пакета КВВ, равная 11 км. Для второго цуга длина фронта лидирующей волны составила 47.4 км, а длина пакета КВВ – 15 км. Для третьего цуга длина фронта лидирующей волны составила 61.4 км, а длина пакета – 15 км.



Р и с . 1 . Увеличенный фрагмент исходного РЛИ *Sentinel-1 B* за 15 августа 2019 г. с проявлением трех последовательных пакетов КВВ: *A–B* – длина фронта лидирующей волны пакета КВВ; *C–D* – длина пакета КВВ

F i g . 1 . Enlarged fragment of the original *Sentinel-1 B* SAR image of 15 August 2019 with manifestation of three successive packets of SIWs. *A–B* is the front length of the leading wave of the SIW packet; *C–D* is the SIW packet length

Обработка результатов анализа и построение карт пространственного распределения различных характеристик КВВ проводились в среде *MathWorks* © *Matlab*.

### **Изменчивость границы распространения льдов**

Поскольку идентификация ПП КВВ возможна только на безледных участках, по РЛИ фиксировалось положение границы распространения дрейфующих льдов с целью получения общей картины ледовых условий на исследуемой акватории.

В рассматриваемый теплый период 2019 г. сложная ледовая обстановка в регионе была обусловлена аномально повышенной повторяемостью атмосферных процессов восточной (*E*) и меридиональной (*C*) форм циркуляции и интенсивным выносом льдов из северной полярной области. При этом преобладали ветры юго-восточного и южного направления со скоростью до 6–7 м/с. В конце периода, во второй половине сентября, доминирующими стали ветры северного и северо-западного направления со скоростью 7–8 м/с<sup>1)</sup>.

На начало июня 2019 г. кромка ледяного поля примыкала к северному берегу арх. Шпицберген. Вдоль восточного побережья архипелага льды распространились вплоть до 75° с. ш. (рис. 2, *a*). К югу от арх. Шпицберген льды занимали все пространство от 17° в. д. и далее к востоку.

В последующие дни в отличие от предыдущих лет льды продолжали смещаться к югу в прол. Фрама и к 20.06.2019 г. у западного побережья архипелага достигли своего максимально южного положения на широте 79° с. ш. При этом с восточной стороны архипелага в поле льдов образовались протяженные заостровные полыньи. В конце июня направление общего дрейфа льдов сменилось и началось медленное обратное движение границы льдов к северу.

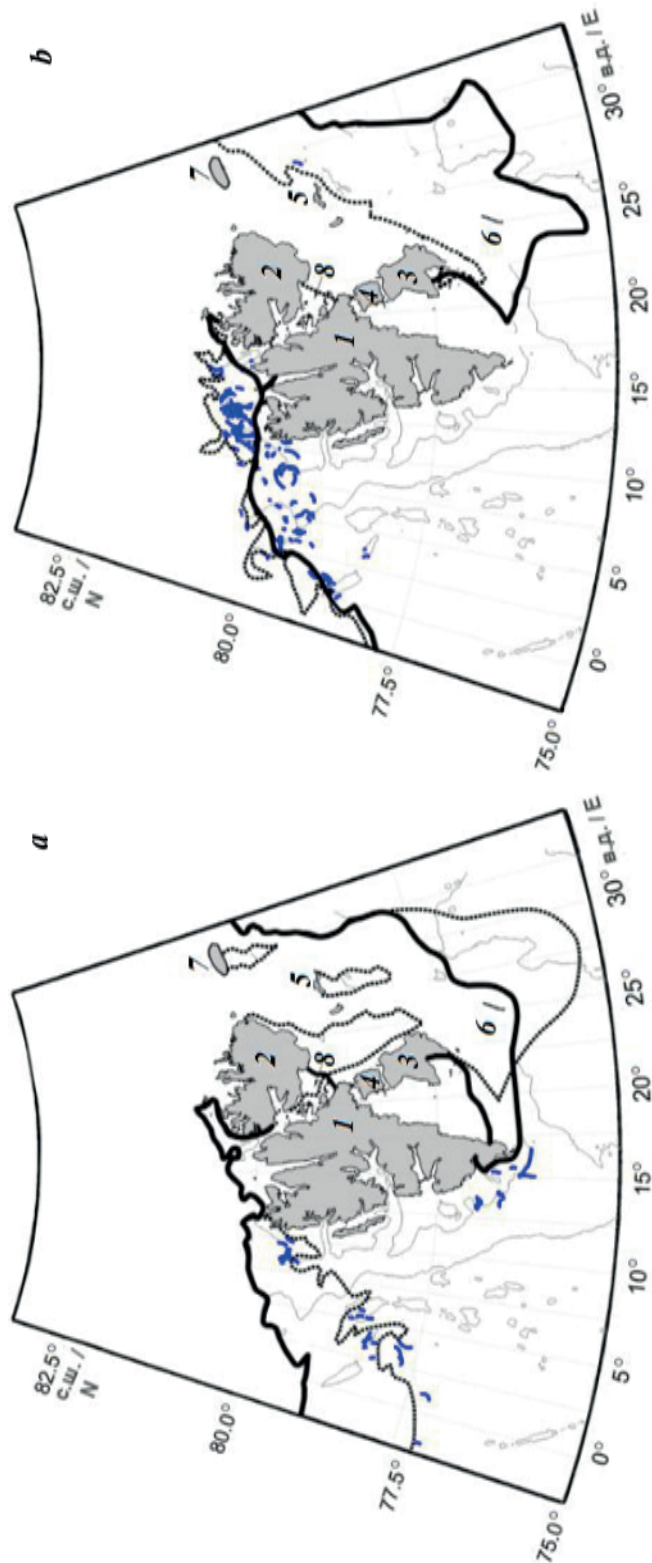
В начале июля 2019 г. льды у северного побережья арх. Шпицберген разрежились. К концу июля 2019 г. пространство чистой воды здесь расширилось в восточном направлении до прол. Хинлопена (22° в. д.). В северном направлении кромка поля дрейфующих льдов отодвинулась незначительно, не достигнув 81° с. ш. На юге ледовое поле сместилось к южной оконечности о. Эдж, т. е. к 77° с. ш. (рис. 2, *b*).

Сезонное уменьшение количества льда на рассматриваемой акватории происходило более интенсивно в юго-восточном секторе. К концу августа (см. рис. 3, *a*) льды сохранились только у южного побережья о. Северо-Восточная Земля. При этом прол. Хинлопена полностью очистился ото льда. На севере граница льдов сместилась за 81° с. ш.

В сентябре 2019 г. продолжилось движение кромки поля дрейфующих льдов к северу (см. рис. 3, *b*). Плавающий лед, который находился на юго-востоке рассматриваемой области, занесло в прол. Хинлопена, где он оставался до 20-х чисел сентября, пока не сменилось направление действующих ветров.

---

<sup>1)</sup> Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. III-й квартал 2019 г. (Ежеквартальный информационный бюллетень) / Под ред. И. Е. Фролова. СПб : АНИИ, 2019. 71 с.



Р и с. 2. Положение границы распространения льдов в июне (а) и июле (б) 2019 г.: 1 – о. Западный Шпицберген; 2 – о. Северо-Восточная Земля; 3 – о. Эдж; 4 – о. Баренца; 5 – Земля Короля Карла; 6 – о. Надежды; 7 – о. Белый; 8 – прол. Хинглопена (сплошная линия – в начале месяца; пунктирная линия – максимально южное положение 16.06.2019 г. (а) и в конце июля (б); синими показано распределение гребней лидирующих волн в путях КВВ)

Fig. 2. Position of the ice edge boundary in June (a) and July (b) 2019: the solid line is for the beginning of the month; the dotted line is for the maximum southern position on 16 June 2019 (a) and at the end of July (b). The blue marks denote distribution of leading wave crests in the SIW packets. The numerals stand for: 1 – Spitsbergen Island; 2 – Nordaustlandet Island; 3 – Edge Island; 4 – Barents Island; 5 – King Charles Land; 6 – Hopen Island; 7 – White Island; 8 – Hinlopen Strait

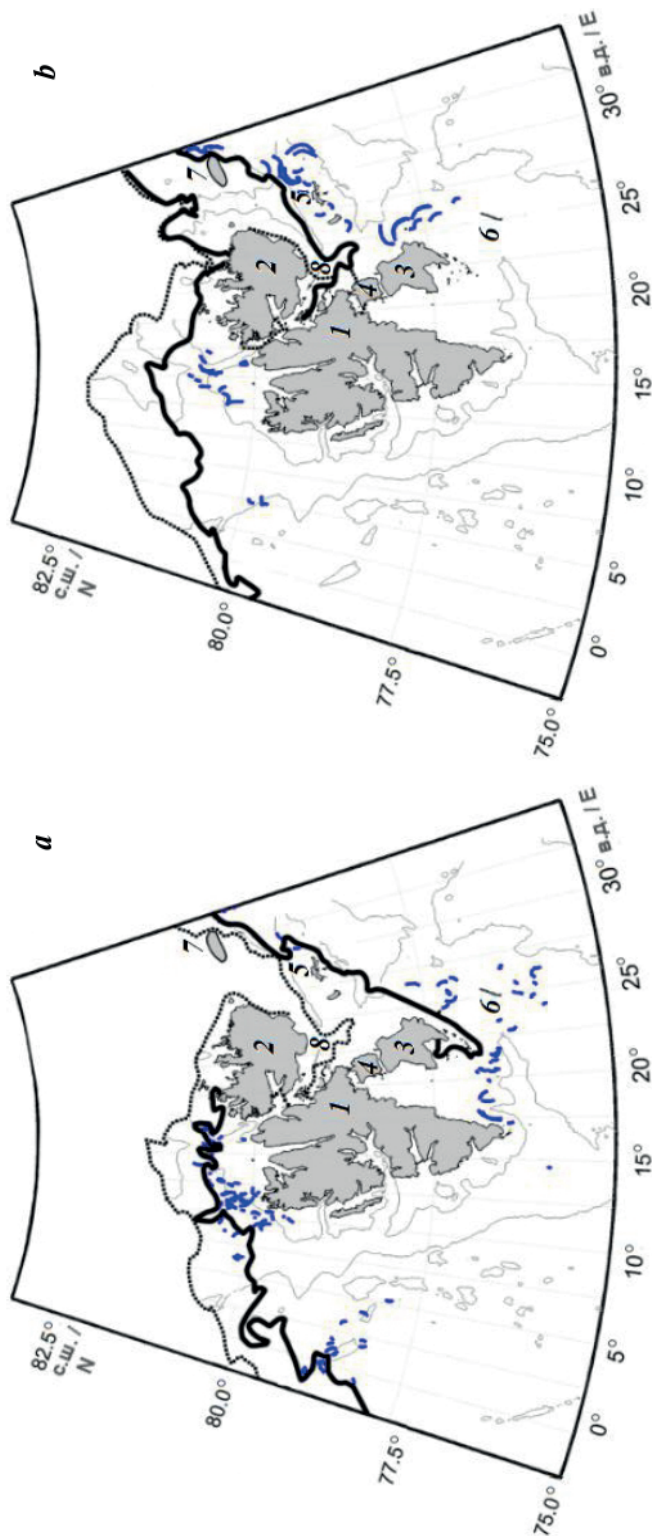


Рис. 3. Положение границы распространения льдов в августе (а) и сентябре (b) 2019 г.: 1 – о. Западный Шпицберген; 2 – о. Северо-Восточная Земля; 3 – о. Эдж; 4 – о. Баренца; 5 – Земля Короля Карла; 6 – о. Надежды; 7 – о. Белый; 8 – прол. Хинлопена (сплошная линия – в начале месяца; пунктирная линия – в конце августа (а) и максимально северное положение 20.09.2019 г. (b); синий цвет – распределение гребней лидирующих волн в цугах КВВ)

Fig. 3. Position of the ice edge boundary in August (a) and September (b) 2019: the solid line is for the beginning of the month; the dotted line is for the position at the end of August (a) and maximum northern position on 20.09.2019 (b). The blue marks denote distribution of leading wave crests in the SIW packets. The numerals stand for: 1 – Spitsbergen Island; 2 – Nordaustlandet Island; 3 – Edge Island; 4 – Barents Island; 5 – King Charles Land; 6 – Hopen Island; 7 – White Island; 8 – Hinlopen Strait

Максимально северного положения ( $82^{\circ}$  с. ш.) в рассматриваемый период граница льдов достигла 16 сентября 2019 г. В последующие дни направление смещения поля дрейфующих льдов сменилось на обратное. На конец сентября 2019 г. кромка ледового поля на севере находилась на  $81.5^{\circ}$  с. ш.

#### Анализ спутниковых РСА-наблюдений внутренних волн

В ходе обработки 1200 спутниковых РЛИ было идентифицировано 387 поверхностных проявлений КВВ в июне – сентябре 2019 г. Как правило, внутренние волны наблюдались на РЛИ в виде пакетов из 4–5 волн с характерным уменьшением расстояния между ними в сторону тыла пакета, одиночные солитоны фиксировались редко.

Пространственное распределение гребней лидирующих волн в цугах КВВ в районе исследований за теплый период 2019 г. представлено на рис. 2 и 3 помесечно и рис. 4 в общем за период. Больше всего волн было зарегистрировано в августе (162 случая) и июле (120 случаев) (см. таблицу). Этот факт, по-видимому, обусловлен более выраженной стратификацией верхнего слоя океана, способствующей более эффективной генерации КВВ в эти месяцы.

В 2019 г. в рассматриваемом регионе внутренние волны наблюдались достаточно часто в шельфовой области к северо-западу от арх. Шпицберген и в глубоководной части прол. Фрама. Также ПП КВВ фиксировались к югу от арх. Шпицберген и у восточных малых островов Земли Короля Карла и о. Белого. Большая часть пакетов была обнаружена именно в этих районах.

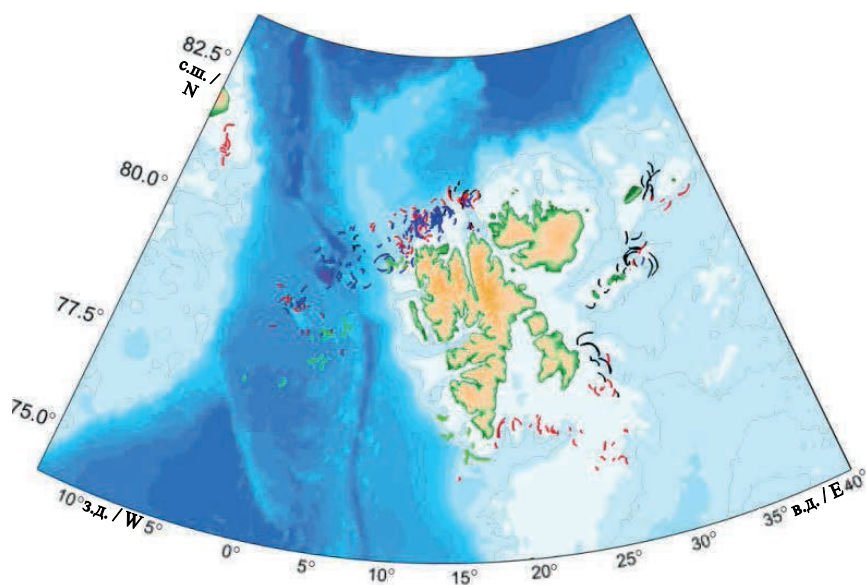


Рис. 4. Пространственное распределение гребней лидирующих волн в цугах КВВ в районе исследований в июне – сентябре 2019 г. (зеленый цвет – июнь; синий – июль; красный – август; черный – сентябрь)

Fig. 4. Spatial distribution of leading wave crests in SIW packets in the study area in June – September 2019 (green– June; blue – July; red – August; black – September)



Количество поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн в июне – сентябре 2019 г., выявленных на 1200 РЛИ

Number of surface manifestations of short-period internal waves in June – September 2019 identified on 1200 radar images

Месяц / Month	Количество ПП КВВ / Number of SM of SIW	Среднее число волн в пакете / Average number of waves per packet
Июнь / June	44	5–6
Июль / July	120	4–5
Август / August	162	5–6
Сентябрь / September	61	6–7
Всего / Total	387	–

На рис. 5 представлены карты пространственного распределения суммарного количества выявленных пакетов (см. рис. 5, *a*) и повторяемости внутренних волн (см. рис. 5, *b*) на горизонтальной сетке размером  $40 \times 40$  ячеек.

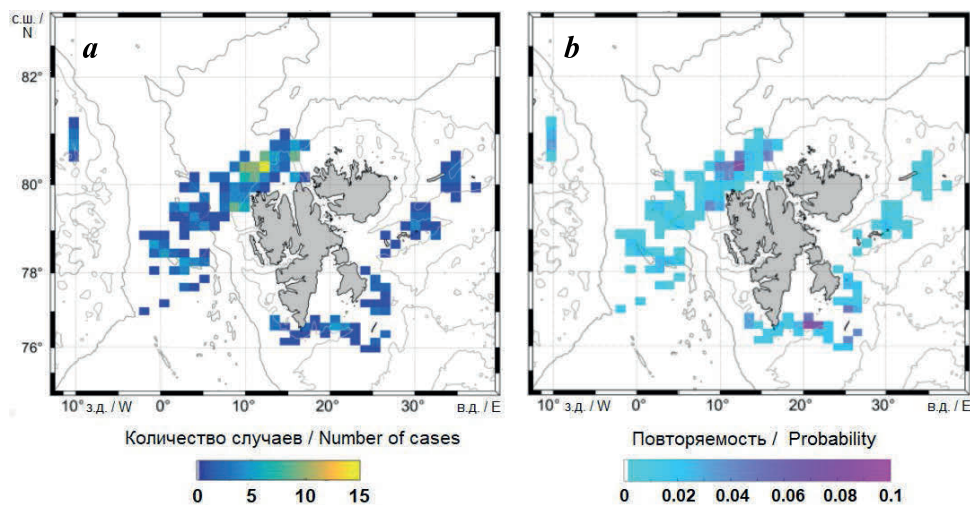


Рис. 5. Пространственное распределение характеристик внутренних волн на акватории прол. Фрама и у арх. Шпицберген в 2019 г.: *a* – суммарное количество случаев регистрации пакетов КВВ; *b* – повторяемость проявлений КВВ на спутниковых РЛИ

Fig. 5. Spatial distribution of internal wave characteristics in Fram Strait and near Svalbard: *a* – total number of records of SIW packets; *b* – probability of SIW manifestations on satellite radar images

Последняя величина была рассчитана в виде отношения общего количества зарегистрированных ПП КВВ в заданном узле сетки к количеству РСА-съемок данного узла. Как видно из рис. 5, *b*, максимальные значения повторяемости КВВ (~0.1) за рассматриваемый период отмечаются в шельфовой области к северо-западу и к югу от арх. Шпицберген.

На рис. 6 представлены карты пространственного распределения средних значений длины фронта лидирующей волны и ширины пакетов КВВ на горизонтальной сетке размером 40 × 40 ячеек. Как видно из рис. 6, *a*, в 2019 г. на акватории в основном наблюдались цуги КВВ с длиной фронта лидирующей волны около 20–40 км.

Наиболее крупные пакеты внутренних волн фиксировались на некотором удалении от участков с неоднородной топографией, что, по-видимому, связано с более развитым полем внутреннего волнения в стороне от непосредственных районов генерации ВВ. Максимальное значение длины фронта лидирующей волны (40 км) зарегистрировано к югу от арх. Шпицберген и у островов Земли Короля Карла. Пакеты КВВ с наименьшими значениями этого параметра в пределах 1–5 км встречались преимущественно вблизи кромки ледового поля.

Ширина пакетов КВВ варьировала от 1 до 12 км. Максимальные значения были отмечены к югу от арх. Шпицберген и у островов Земли Короля Карла. Минимальные значения от 1 до 5 км в большинстве случаев характерны для шельфовой области к северо-западу от арх. Шпицберген.

Гистограмма распределения (рис. 7, *a*) отчетливо демонстрирует высокую повторяемость (более 50 % от всех наблюдений) значений длины фронта КВВ в 2019 г. в диапазоне от 10 до 12 км с выраженным пиком для значения 10 км. Второй пик наблюдений приходится на значения длины фронта

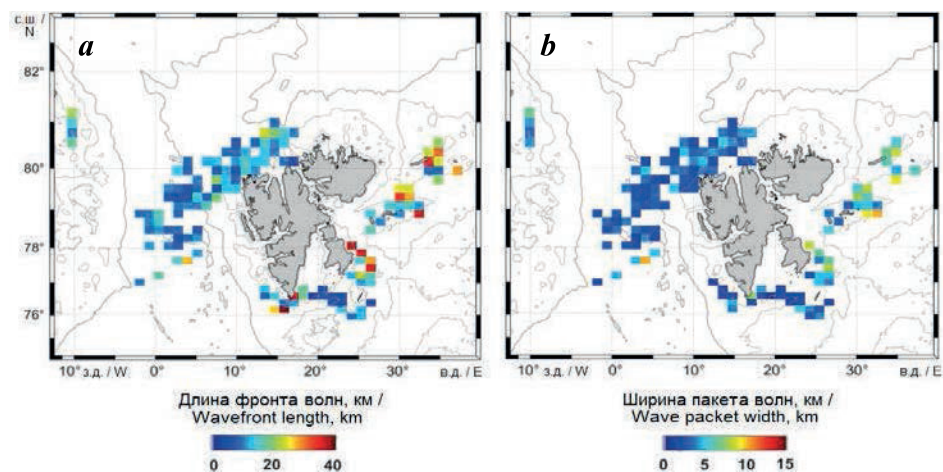
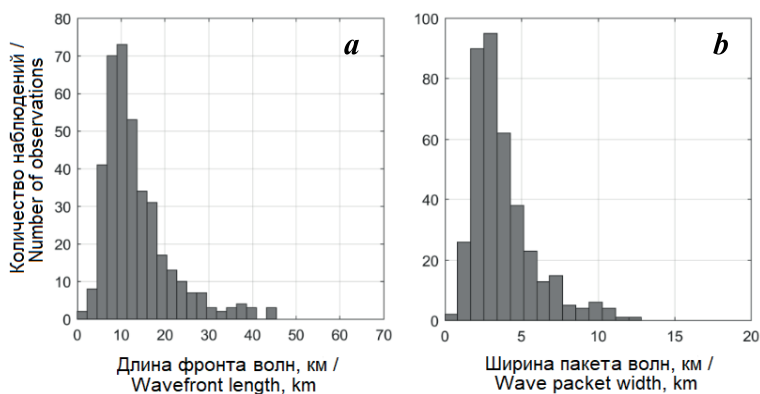


Рис. 6. Пространственное распределение основных параметров внутренних волн на акватории прол. Фрама и у арх. Шпицберген в 2019 г.: *a* – длина фронта лидирующей волны (км); *b* – ширина пакетов (км)

Fig. 6. Spatial distribution of main parameters of internal waves in Fram Strait and near Svalbard in 2019: *a* – length of the leading wave front; *b* – packet width (km)



Р и с . 7. Гистограммы распределения основных параметров КВВ в районе исследований в 2019 г.: *a* – длина фронта лидирующей волны (км); *b* – ширина пакета КВВ (км)

Fig. 7. Histograms of distributions of SIW main parameters in the study area in 2019: *a* – length of the leading wave front; *b* – SIW packet width (km)

КВВ около 7–8 км. Значения длины фронта от 20 до 30 км встречаются лишь в 15 % случаев. Значения длины фронта КВВ от 40 до 50 км регистрировались крайне редко – в 5 % случаев.

На гистограмме распределения ширины пакетов КВВ (рис. 7, *b*) видно, что ее наибольший пик приходится на диапазон 3–4 км. Ширина пакетов 10–12 км регистрируется крайне редко – в 5 % наблюдений.

### Результаты и обсуждение

Пролив Фрама и акватории, прилегающие к арх. Шпицберген, характеризуются сложной динамикой вод и специфическими гидрологическими условиями, а топография дна рассматриваемого района имеет значительную пространственную неоднородность. На формирование плотностной стратификации оказывает огромное влияние наличие постоянного поля дрейфующих льдов, претерпевающего смещения в зависимости от сезона и изменчивости циркуляции в полярной области. В сочетании с приливными явлениями все эти особенности исследуемого района создают условия для генерации внутренних волн.

По спутниковым РЛИ был проведен анализ изменчивости положения границы распространения дрейфующих льдов в июне – сентябре 2019 г. Было установлено, что в июне 2019 г. льды распространились в прол. Фрама до аномального южного положения у западного побережья арх. Шпицберген – до 79° с. ш. При этом сплоченными льдами была занята вся северная шельфовая зона у арх. Шпицберген, которая в июле и августе освободилась ото льдов только до 22° в. д., сместившись к северу до 81° с. ш.

Максимальное удаление ледового поля от архипелага зафиксировано в середине сентября 2019 г. (82° с. ш). Преобладание ветров, встречных направлению дрейфа ледового поля в июне – августе 2019 г., объясняет до-

статочно высокую сплоченность льдов в рассматриваемом районе в этот период.

В ходе обработки 1200 спутниковых РЛИ было зарегистрировано 387 ПП КВВ. Наибольшее количество ПП КВВ выявлено в августе – 162 пакета, что, по всей видимости, связано с более выраженной стратификацией верхнего слоя океана, способствующей более эффективной генерации ВВ. Внутренние волны наблюдались на РЛИ в виде пакетов из 4–5 уединенных волн. Максимальные значения длины фронта лидирующей волны составляли 30–40 км и наблюдались к югу от арх. Шпицберген. В рассматриваемый период 2019 г. преобладали КВВ с длинами фронта лидирующей волны от 7 до 10 км. Наибольшая повторяемость у волн с шириной пакета 3–4 км.

Сравнение пространственного распределения поверхностных проявлений КВВ и положения границы распространения дрейфующих льдов показывает хорошую корреляцию (см. рис. 2, 3), что подтверждается и последними исследованиями [15, 16]. Так, в июне 2019 г. КВВ фиксировались в прол. Фрама на глубокой воде и у южной оконечности о. Западный Шпицберген в непосредственной близости от кромки ледового поля. В июле ПП КВВ были локализованы в полынье, открывшейся к северу от о. Западный Шпицберген, и в прол. Фрама к северо-западу от архипелага, но гораздо севернее, чем в июне.

В августе положение линии распространения льдов на севере незначительно отличалось от июльского и, соответственно, ПП КВВ регистрировались практически в пределах того же района с небольшим смещением частоты проявления КВВ к востоку. К югу и востоку от арх. Шпицберген ПП КВВ также фиксировались преимущественно вдоль кромки ледового поля, а южнее о. Западный Шпицберген – на гидрологическом полярном фронте.

В сентябре 2019 г. основное количество проявлений КВВ зафиксировано к востоку от арх. Шпицберген. При этом длина их фронта была наибольшей за рассматриваемый период наблюдений. Генерации крупных пакетов КВВ в этом районе способствовало сочетание двух факторов: взаимодействие приливно-отливных течений и Восточно-Шпицбергенского течения с особенностями топографии дна у многочисленных малых островов<sup>2)</sup> и продолжающийся процесс таяния льда, сохранившегося в прол. Хинлопена и вынесенного к малым островам северными ветрами [17]. К северу от архипелага на удалении от кромки льдов в сентябре было выявлено минимальное число ПП КВВ с малыми длинами фронта.

### **Выводы**

Таким образом, у кромки ледового поля из-за процесса таяния возникают горизонтальные и вертикальные градиенты плотности, которые могут оказывать влияние на генерацию и распространение КВВ. Так как исследу-

---

<sup>2)</sup> Генерация внутренних волн при обтекании препятствий стратифицированными сдвиговыми потоками, имеющими критические слои : отчет о НИР/НИОКР / Рук. Троицкая Ю. И. 1995. № гранта 95-05-15325.

емый район является приливным, то воздействие приливного течения на особенности топографии дна со стратифицированным водным слоем также может вызвать возникновение и распространение внутренних волн. При сочетании указанных факторов происходит генерация крупных пакетов КВВ.

Задачами будущих исследований являются определение временной изменчивости параметров КВВ, установление их связи с фазой прилива, сопоставление полученных данных с результатами численного моделирования по модели *Arc5km2018*.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fer I., Skogseth R., Geyer F.* Internal waves and mixing in the marginal ice zone near the Yermak Plateau // *Journal of Physical Oceanography*. 2010. Vol. 40, iss. 7. P. 1613–1630. doi:10.1175/2010JPO4371.1
2. Internal waves and vertical mixing in the Storfjorden Polynya, Svalbard / F. P. Jardon [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, iss. C12. C12040. doi:10.1029/2010JC006918
3. Observations of turbulent mixing and hydrography in the marginal ice zone of the Barents Sea / A. Sundfjord [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2007. Vol. 112, iss. C5. C05008. doi:10.1029/2006JC003524
4. *Свергун Е. И., Зимин А. В.* Оценка повторяемости интенсивных внутренних волн в Белом и Баренцевом морях по данным экспедиционных исследований // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 13–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667317020022>
5. *Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А.* Свободные короткопериодные внутренние волны в арктических морях России // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37, № 6. С. 645–658. doi:10.22449/0233-7584-2021-6-645-658
6. Районы генерации нелинейных внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА измерений / И. Е. Козлов [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11, № 4. С. 338–345.
7. *Зубкова Е. В., Козлов И. Е.* Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Чукотском море по данным спутниковых РСА-наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 4. С. 221–230. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-221-230>
8. *Marchenko A. V., Morozov E. G., Kozlov I. E.* High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen // *Continental Shelf Research*. 2021. Vol. 227. 104523. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104523>
9. *Manley T. O., Bourke R. H., Hunkins K. L.* Near-surface circulation over the Yermak Plateau in northern Fram Strait // *Journal of Marine Systems*. 1992. Vol. 3, iss. 1–2. P. 107–125. [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(92\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0924-7963(92)90033-5)
10. *Gascard J. C., Richez C., Rouault C.* New insights on large-scale oceanography in Fram Strait: The West Spitsbergen Current // *Arctic oceanography: marginal ice zones and continental shelves*. Washington : American Geophysical Union, 1995. Chapter 4. P. 131–182. <https://doi.org/10.1029/CE049p0131>

11. Circulation and transformation of Atlantic water in the Eurasian Basin and the contribution of the Fram Strait inflow branch to the Arctic Ocean heat budget / B. Rudels [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2015. Vol. 132. P. 128–152. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.003>
12. *Padman L., Dillon T. M.* Turbulent mixing near the Yermak Plateau during the coordinated Eastern Arctic Experiment // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1991. Vol. 96, iss. C3. P. 4769–4782. doi:10.1029/90JC02260
13. *Sandven S., Johannessen O. M.* High-frequency internal wave observations in the marginal ice zone // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1987. Vol. 92, iss. C7. P. 6911–6920. <https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06911>
14. *Козлов И. Е., Михайличенко Т. В.* Оценка фазовой скорости внутренних волн в Арктике по данным последовательных спутниковых РСА-измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 5. С. 181–192. doi:10.21046/2070-7401-2021-18-5-181-192
15. Observations of internal waves generated by an anticyclonic eddy: a case study in the ice edge region of the Greenland Sea / O. M. Johannessen [et al.] // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2019. Vol. 71, iss. 1. 1652881. doi:10.1080/16000870.2019.1652881
16. *Chunchuzov I. P., Johannessen O. M., Marmorino G. O.* A possible generation mechanism for internal waves near the edge of a submesoscale eddy // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2021. Vol. 73, iss. 1. P. 1–11. doi:10.1080/16000870.2021.1947610
17. *Иванов Ю. А., Мельников В. А., Новицкий А. Г.* Обтекание неровностей дна стратифицированным потоком // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1977. Т. 13, № 12. С. 1278–1286.

Поступила 5.04.2022 г.; одобрена после рецензирования 21.04.2022 г.; принята к публикации 27.04.2022 г.; опубликована 25.06.2022 г.

*Об авторах:*

**Михайличенко Тамара Витальевна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-8696-9722**, **Scopus Author ID: 57358425100**, **РИНЦ AuthorID: 998530**, [fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru](mailto:fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru)

**Петренко Лариса Алексеевна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0001-7246-9885**, **ResearcherID: AAY-6398-2020**, **Scopus Author ID: 7004614243**, [larcpetr@gmail.com](mailto:larcpetr@gmail.com)

**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**, **Scopus Author ID: 49963767500**, [ik@mhi-ras.ru](mailto:ik@mhi-ras.ru)

*About the authors:*

**Tamara V. Mikhaylichenko**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID:**

**0000-0002-8696-9722, Scopus Author ID: 57358425100, AuthorID: 998530,**  
*fsbsi.mhi.tamara@yandex.ru*

**Larisa A. Petrenko**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0001-7246-9885, ResearcherID: AAY-6398-2020, Scopus Author ID: 7004614243,**  
*larcpetr@gmail.com*

**Igor Y. Kozlov**, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0001-6378-8956, ResearcherID: G-1103-2014, Scopus Author ID: 49963767500,**  
*ik@mhi-ras.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Михайличенко Тамара Витальевна** – разработка концепции статьи, анализ и интерпретация спутниковых данных о КВВ, написание и компоновка статьи, работа над окончательным вариантом рукописи

**Петренко Лариса Алексеевна** – разработка концепции статьи, анализ и интерпретация спутниковых данных о ледовых условиях, написание раздела статьи, работа над окончательным вариантом рукописи

**Козлов Игорь Евгеньевич** – формулировка задачи исследования, анализ результатов, участие в написании и оформлении статьи, работа над окончательным вариантом рукописи

*Contribution of the authors:*

**Tamara V. Mikhaylichenko** – article concept development, analysis and interpretation of satellite data on SIW, article composition and writing, work on the final manuscript

**Larisa A. Petrenko** – article concept development, analysis and interpretation of satellite data on ice conditions, writing of the article section, work on the final manuscript

**Igor Y. Kozlov** – research task setting, analysis of results, participation in the article writing and arrangement, work on the final manuscript

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All the authors have read and approved the final manuscript.*