

Научная статья

УДК 551.466.82

EDN: YQLKAA

Характеристики короткопериодных внутренних волн в Карском море по спутниковым данным *Sentinel-1* летом 2022 года

А. В. Кузьмин, И. Е. Козлов ✉

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ ik@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 06.06.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 10.09.2025.

Аннотация

Цель. Анализ пространственно-временной изменчивости и характеристик короткопериодных внутренних волн в акватории Карского моря в летний период 2022 г. – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Выполнен анализ данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой *Sentinel-1A* за июль – сентябрь 2022 г. Обработка 374 радиолокационных изображений позволила идентифицировать 2835 поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн в акватории Карского моря, из которых наибольшее количество (1595) приходится на август, наименьшее (451) – на июль 2022 г. В мелководных прибрежных районах моря с интенсивным речным стоком короткопериодные внутренние волны фиксировались достаточно редко. На остальной акватории моря, в западной, юго-западной и северо-западной частях, а также в областях проливов Карские Ворота и Вилькицкого, внутренние волны наблюдались практически повсеместно, включая обширные участки Центрально-Карского плато, глубоководные районы и склоны желоба Святой Анны и Новоземельской впадины. Самые крупные по своей площади пакеты короткопериодных внутренних волн наблюдались над желобом Святой Анны, где их площадь достигала 2000 км². Пакеты с длиной лидирующего гребня более 100 км прослеживались вблизи о. Визе.

Выводы. В течение теплого сезона генерация и распространение нелинейных короткопериодных внутренних волн наблюдаются на большей части акватории Карского моря в районах с выраженными неоднородностями донной топографии. Некоторые из них характеризуются интенсивными приливными и/или фоновыми течениями. Однако многочисленные пакеты этих волн образуются также и в районах, где скорости суммарных течений составляют не более 0,1–0,2 м/с. Главным условием образования короткопериодных внутренних волн в таких районах является наличие неоднородного рельефа дна с резкими перепадами глубин. Направление распространения таких волн часто определяется направлением фоновых течений, которые в отдельных районах являются весьма интенсивными и имеют выраженную сезонную изменчивость как по скорости, так и по направлению.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, очаги генерации, приливные течения, неоднородный рельеф морского дна, спутниковые радиолокационные изображения, *Sentinel-1*, Карское море, Арктика

Благодарности: анализ пространственно-временной изменчивости характеристик внутренних волн выполнен в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2024-0017, анализ механизмов генерации внутренних волн в Карском море выполнен в рамках гранта РНФ № 25-17-00309, <https://rscf.ru/project/25-17-00309/>.

Для цитирования: Кузьмин А. В., Козлов И. Е. Характеристики короткопериодных внутренних волн в Карском море по спутниковым данным *Sentinel-1* летом 2022 года // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 6. С. 855–871. EDN YQLKAA.

© Кузьмин А. В., Козлов И. Е., 2025

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 41 № 6 2025

855



The content is available under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Kara Sea in Summer 2022 Based on Satellite *Sentinel-1* Data

A. V. Kuzmin, I. E. Kozlov ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ ik@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The work is aimed at studying the spatial-temporal variability and characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea in summer, 2022.

Methods and Results. The data of *Sentinel-1A* synthetic aperture radar for July – September, 2022 were analyzed. Processing of 374 radar images made it possible to identify 2835 manifestations of surface internal waves in the Kara Sea, of which the largest number (1595) was detected in August and the smallest one (451) – in July. In shallow coastal areas of the sea with intense river runoff, short-period internal waves were observed quite rarely. In the rest of the sea, namely in its western, southwestern and northwestern parts, as well as in the areas of the Kara Gate and Vilkitsky straits, the internal waves were recorded almost everywhere including vast areas of the Central Kara Plateau, deep-sea areas and slopes of the Saint Anna and Novaya Zemlya troughs. As for the area, the largest short-period internal wave packets were observed over the Saint Anna Trough where their area reached 2000 km². And those with a leading crest length exceeding 100 km², were traced nearby Vize Island.

Conclusions. During the warm season, the generation and propagation of nonlinear short-period internal waves are observed over most of the Kara Sea in the areas with pronounced heterogeneities in the bottom topography. Some of them are characterized by the intense tidal and/or background currents. However, numerous packets of these waves are also generated in the areas where the total current velocities do not exceed 0.1–0.2 m/s. The main condition for the formation of short-period internal waves in such areas is the presence of a non-uniform bottom relief with sharp depth differences. The direction of short-period internal wave propagation is often conditioned by the routes of background currents which are very intense in some areas and have a pronounced seasonal variability both in speed and direction.

Keywords: short-period internal waves, generation hotbeds, tidal currents, uneven relief of sea bottom, satellite radar images, *Sentinel-1*, Kara Sea, Arctic Ocean

Acknowledgement: Spatial-temporal variability of internal wave features was analyzed within the framework of theme of state assignment of FSBSI FRC MHI FNNN-2024-0017, mechanisms of internal wave generations in the Kara Sea were analyzed within the framework of the RSF grant No. 25-17-00309, <https://rscf.ru/project/25-17-00309/>

For citation: Kuzmin, A.V. and Kozlov, I.E., 2025. Characteristics of Short-Period Internal Waves in the Kara Sea in Summer 2022 Based on Satellite *Sentinel-1* Data. *Physical Oceanography*, 32(6), pp. 871-886.

Введение

В последние годы наблюдаются существенные изменения климата и гидрологических условий в морях арктической зоны России, проявляющиеся в увеличении температуры воздуха, сокращении площади ледяного покрова и продолжительности ледового сезона, ослаблении вертикальной стратификации и интенсификации течений в результате так называемой «атлантификации» этого сектора Арктики [1–3].

Существенно большее по площади сезонное освобождение ото льда значительных участков арктического бассейна в последнее десятилетие позволяет наблюдать и исследовать гидрофизические процессы верхнего слоя моря

в ряде новых районов, ранее покрытых льдом [4, 5]. Активное освоение шельфа арктических морей и развитие Северного морского пути определяют актуальность исследования процессов, потенциально влияющих на морской лед, горизонтальный и вертикальный транспорт биогеохимических элементов и загрязнений, подводную навигацию и акустику.

Одним из таких процессов являются короткопериодные (высокочастотные) внутренние волны (КВВ) – важный элемент динамической структуры океана, влияющий на перенос вещества, импульса и энергии в морской среде. Свободные КВВ в Арктике часто представляют собой пакеты интенсивных нелинейных солитоноподобных внутренних волн большой амплитуды [6–9]. Их генерация происходит не по всей акватории морей, а в определенных «горячих точках» [10]. Одной из основных причин образования КВВ является взаимодействие приливных течений с неоднородностями донной топографии либо напрямую [11], либо в ходе эволюции и разрушения бароклинных внутренних волн приливного периода (далее – внутренних приливных волн) [12–14].

Исследование механизмов и «горячих точек» генерации КВВ, особенностей их распространения и влияния на гидрологические условия арктического бассейна является весьма актуальным, что объясняет неизменный интерес к данной проблематике в последние годы [8, 15–20].

В этом отношении акватория Карского моря, рассматриваемая в настоящей работе, не является исключением [21–26]. Первичный анализ характеристик поля КВВ в Карском море по достаточно ограниченному набору данных из 89 изображений спутникового радиолокатора с синтезированной апертурой *Envisat ASAR* был выполнен за летний период 2007 г. [27], в результате определены основные районы генерации КВВ и особенности их распространения на акватории моря. Однако совсем недавно появилась работа, в которой использовался более широкий набор данных (320 изображений) РСА *Sentinel-1* за летне-осенний период 2022 г. [26]. В этой работе помимо определения районов образования и характеристик КВВ в рамках двуслойного приближения также дана оценка амплитуд наблюдаемых внутренних волн на основе привлечения климатических данных о вертикальной стратификации.

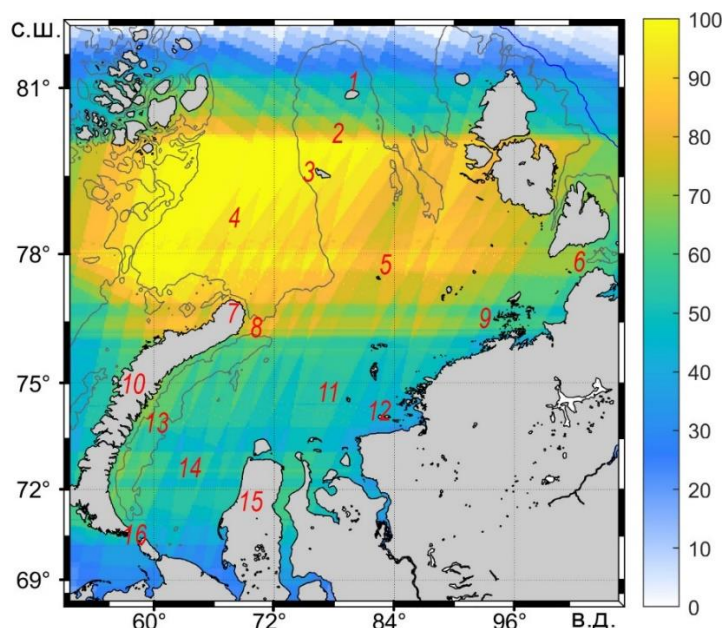
В это же время сотрудниками Морского гидрофизического института РАН было проведено аналогичное исследование практически с тем же набором исходных данных *Sentinel-1* за июль – сентябрь 2022 г. – месяцы с максимальными значениями частоты плавучести во внутригодовом цикле Карского моря [22].

Цель настоящей работы – определение и анализ районов образования и характеристик КВВ в Карском море в 2022 г., а также сравнение с данными 2007 г. и сопоставление результатов настоящей работы с результатами работы [26].

Данные и методы

Анализ характеристик КВВ в акватории Карского моря выполнен на основе обработки спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) *Sentinel-1A* в режиме съемки *Extra Wide Swath (EW)* с шириной полосы обзора 250 км и пространственным разрешением 90 м. Спутниковые данные получены из архивов системы Европейского центра морских прогнозов *Copernicus Open Access Hub* (<https://scihub.copernicus.eu>).

В ходе работы выполнен анализ 371 спутникового РЛИ за июль – сентябрь 2022 г., из которых 121 РЛИ приходится на июль, 131 – на август, 119 – на сентябрь. На рис. 1 показана карта покрытия акватории Карского моря спутниковой съемкой за весь период наблюдений. Максимально обеспечена спутниковыми данными (более 70–80 РЛИ) северная часть моря к северу от 76° с. ш. Покрытие южной части достаточно равномерное и составляет в среднем 40–60 РЛИ на единицу площади морской поверхности. Минимальное количество данных, 20–30 РЛИ, приходится на приустьевые районы в юго-западной части моря.



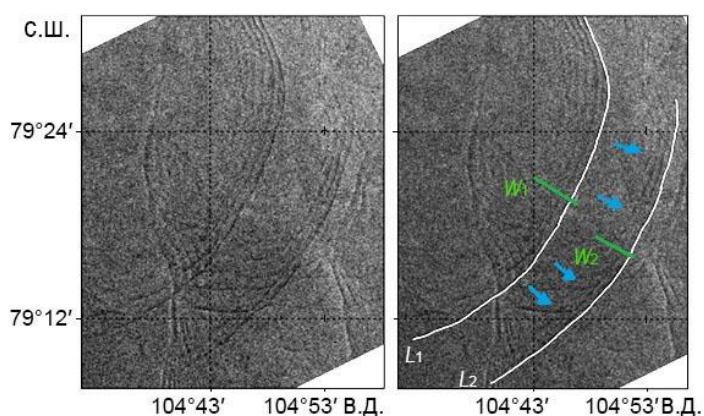
Р и с. 1. Покрытие акватории Карского моря спутниковой съемкой *Sentinel-1A* за период 1 июля – 31 августа 2022 г. Серыми изолиниями показано положение изобаты 200 м. Цифрами обозначены: 1 – о. Ушакова; 2 – Центрально-Карское плато; 3 – о. Визе; 4 – желоб Святой Анны; 5 – о. Уединения; 6 – пролив Вилькицкого; 7 – м. Желания; 8 – порог Брусилова; 9 – арх. Норденшельда; 10 – арх. Новая Земля; 11 – Ямало-Гыданская отмель; 12 – Пясинский залив; 13 – Новоземельская впадина; 14 – Западно-Карская ступень; 15 – п-ов Ямал; 16 – пролив Карские Ворота

Fig. 1. Coverage of the Kara Sea basin with *Sentinel-1A* data from July 1 to August 31, 2022. Grey isolines show the position of 200 m isobath. Numbered positions: 1 – Ushakov Island; 2 – Central Kara Plateau; 3 – Vize Island; 4 – Saint Anna Trough; 5 – Uyedinenie Island; 6 – Vilkitsky Strait; 7 – Zhelanie Cape; 8 – Brusilov Rapids; 9 – Nordenskjold Archipelago; 10 – Novaya Zemlya Archipelago; 11 – Yamalo-Gydanskaya Shoal; 12 – Pyasino Gulf; 13 – Novaya Zemlya Trough; 14 – Western Kara Step; 15 – Yamal Peninsula; 16 – Kara Gate Strait

Анализ спутниковых изображений и идентификация поверхностных проявлений (ПП) КВВ проводились согласно методике, представленной в работах [17, 18], с использованием программы *ESA Sentinel Application Platform (ESA SNAP)*. Для каждого идентифицированного пакета КВВ определялись координаты центра лидирующей волны, длина ее фронта, ширина волнового пакета. Дальнейшая обработка результатов анализа спутниковых данных выполнялась

в программной среде *Matlab*. Для построения пространственных карт распределения характеристик КВВ их средние и суммарные значения определялись на сетке размером 60×100 узлов по широте и долготе. При построении гистограмм распределения параметров КВВ их значения брались для каждого волнового пакета.

На рис. 2, *слева* приведен пример распространения нескольких последовательных пакетов КВВ на акватории Карского моря в РЛИ *Sentinel-1A* за 11 августа 2022 г. Отмеченные на рис. 2, *справа* пакеты внутренних волн имеют дугообразную структуру и направлены на востоко-юго-восток, однако кроме них на РЛИ также видны пакеты западного и южного направлений. Белыми кривыми показана протяженность волнового фронта лидирующих волн (далее – длина фронта), зелеными прямыми – ширина волновых пакетов. Подобным образом проводился анализ всех идентифицированных пакетов КВВ.



Р и с. 2. Пример проявления (*слева*) и идентификации (*справа*) характеристик КВВ на РЛИ *Sentinel-1A* за 11.08.2022 г. (02:58 UTC) на акватории Карского моря. Белыми линиями L_1 , L_2 отмечено положение лидирующих волн в пакетах КВВ, зелеными прямыми W_1 , W_2 – ширина пакетов этих волн. Голубыми стрелками показано направление распространения КВВ

Fig. 2. Example of manifestation (*left*) and identification (*right*) of SIW characteristics in the *Sentinel-1A* SAR image obtained on 08.11.2022 (02:58 UTC) in the Kara Sea. White lines L_1 and L_2 indicate the positions of leading wave crests in the SIW packets, green straight lines W_1 and W_2 – the SIW packet widths. Blue arrows show the direction of SIW propagation

Важно отметить, что идентификация КВВ в РЛИ затруднена при сильных ветрах и наличии ледяного покрова. По нашей оценке, количество РЛИ с концентрацией льда более 50 % и высокими скоростями приводного ветра не превышало 20 % от общего числа спутниковых изображений.

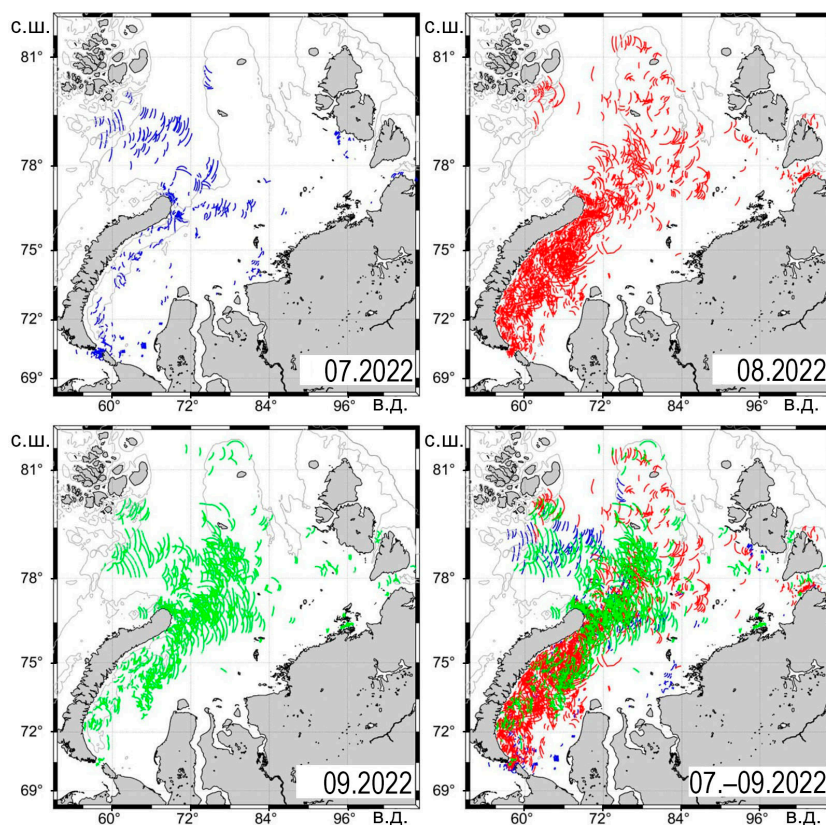
Для исследования потенциальных механизмов генерации КВВ к анализу дополнительно привлекались сведения о донной топографии *IBCAO* [28], приливных течениях из модели *Arc2kmTM*¹ [29] и поверхностных течениях из данных реанализа *CMEMS GLORYS12V4* с пространственным разрешением $0,25^\circ$ на горизонте 1 м.

¹ Howard S. L., Padman L. Arc2kmTM: Arctic 2 kilometer Tide Model, 2021 // Arctic Data Center. 2021. <https://doi.org/10.18739/A2PV6B79W>

Результаты спутниковых наблюдений

Анализ 371 РЛИ *Sentinel-1* за период 1 июля – 30 сентября 2022 г. позволил идентифицировать 2835 поверхностных проявлений (ПП) КВВ. Большая часть зарегистрированных пакетов КВВ приходится на август (1551 ПП КВВ, или ~56 % от общего количества), наименьшая – на июль (451), в сентябре зарегистрировано 789 ПП КВВ.

Существенная разница в количестве ПП КВВ за разные месяцы может быть вызвана целым набором факторов – внутрисезонной изменчивостью вертикальной стратификации, фоновых ветровых условий и поверхностных течений, влияющих как на интенсивность генерации самих внутренних волн, так и на детектируемость их поверхностных проявлений из космоса. В нашем случае выраженная внутрисезонная изменчивость количества наблюдаемых ПП КВВ обусловлена разницей в эффективном покрытии района спутниковой съемкой от месяца к месяцу. Изменчивость максимальна в августе и минимальна в июле, что вполне объясняет отмеченную разницу в количестве наблюдений КВВ.



Р и с. 3. Карта распределения пакетов КВВ на акватории Карского моря. Синим, красным и зеленым цветом показано положение КВВ в июле, августе и сентябре 2022 г. соответственно. Серыми изолиниями отмечено положение изобаты 200 м

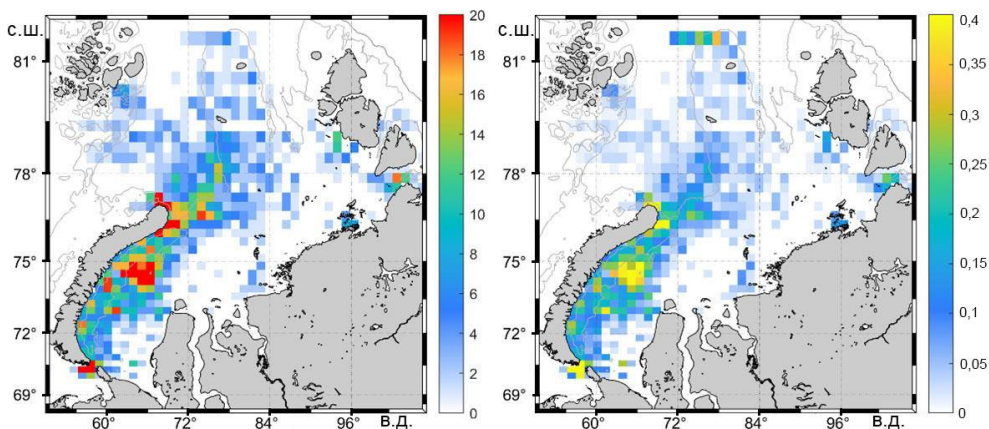
Fig. 3. Map of SIW packet distributions in the Kara Sea. Blue, red and green colors show the locations of SIW packets in July, August and September, 2022, respectively. Grey isolines show the position of 200 m isobath

Итоговая карта с положением всех проявлений КВВ в бассейне Карского моря показана на рис. 3, где разными цветами отмечено положение КВВ в летне-осенний период 2022 г. Внутренние волны распределены по акватории достаточно неравномерно.

Меньше всего волн наблюдалось в мелководных прибрежных районах моря с интенсивным речным стоком. Тем не менее в некоторых из них – к северо-западу от п-ова Ямал, к северо-западу от Пясинского залива, а также в районе арх. Норденшельда, волны также регистрировались. Среди таких мелководных районов стоит отдельно выделить области проливов – Карские Ворота и Вилькицкого, где количество проявлений КВВ было высоким.

На остальной акватории моря, особенно в ее западной, юго-западной и северо-западной частях, внутренние волны наблюдались практически повсеместно, включая обширные участки Центрально-Карского плато и глубоководные районы желоба Святой Анны и Новоземельской впадины. Таким образом, в течение летнего сезона пакеты КВВ образуются как минимум на половине акватории Карского моря.

В некоторых районах моря достаточно хорошо прослеживается доминирующее направление распространения внутренних волн. Так, например, в северо-западной части КВВ имели выраженное восточное направление, что может указывать на их возможную генерацию на западных склонах желоба Святой Анны. К востоку от м. Желания пакеты внутренних волн распространялись в основном на восток. В обширной области между Новоземельской впадиной и п-овом Ямал внутренние волны распространялись преимущественно в южном направлении (более детально показано ниже).



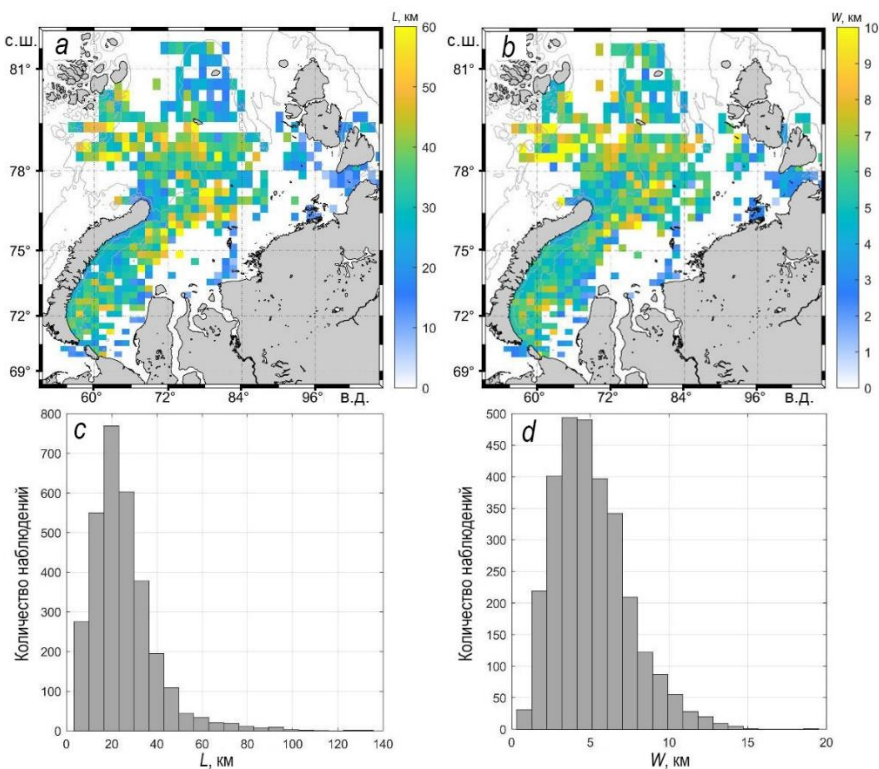
Р и с. 4. Карты распределения суммарного количества (слева) и повторяемости (справа) КВВ на акватории Карского моря по данным спутниковых наблюдений в июле – сентябре 2022 г.

F i g. 4. Maps showing the distribution of SIW total number (left) and probability (right) in the Kara Sea in July – September, 2022, based on satellite observations

Для более точного определения основных районов наблюдения КВВ («горячих точек» их образования) приведена карта с суммарным количеством наблюдений КВВ (рис. 4, слева) и их повторяемостью (рис. 4, справа), рассчитанной в виде отношения суммарного количества наблюдений КВВ к общему

покрытию района РЛ-съёмкой на сетке размером 60×100 узлов. Значение повторяемости 0,4 показывает, что пакеты КВВ в конкретном узле сетки регистрировались на четырех из 10 спутниковых снимков данного района. Как видно из рисунков, обе карты в целом хорошо соответствуют друг другу и позволяют однозначно выделить ключевые районы генерации КВВ.

Максимальное количество проявлений КВВ (больше 15) и максимальные значения их повторяемости (больше 0,3) наблюдаются в следующих районах: в проливе Карские Ворота; как минимум в трех очагах генерации в обширной области с глубинами 50–150 м, ограниченной на западе восточным склоном Новоземельской впадины, на востоке – западной частью Западно-Карской ступени; в районе м. Желания; в районе расположенного юго-восточнее этого мыса порога Брусилова. Кроме указанных районов с аналогичными параметрами важно отметить также районы пролива Вилькицкого и бровки шельфа к северо-западу от о. Ушакова. Таким образом, на акватории Карского моря выделяется как минимум 8 очагов устойчивой генерации КВВ. В целом также много и других районов, где КВВ образуются достаточно регулярно, а их повторяемость выше 0,1.



Р и с. 5. Карты (*a, b*) и гистограммы (*c, d*) распределения длины фронта лидирующих волн (*a, c*) и ширины пакетов (*b, d*) КВВ на акватории Карского моря в июле – сентябре 2022 г.

F i g. 5. Maps (*a, b*) and histograms (*c, d*) of the distributions of leading wave crest lengths (*a, c*) and SIW packet widths (*b, d*) in the Kara Sea in July – September, 2022

Показанные на рис. 5 карты характеризуют горизонтальные размеры пакетов КВВ поперек и вдоль направления их распространения. Из рис. 5, *a, b* очевидна пространственная корреляция в распределении значений этих параметров по акватории моря.

В мелководных прибрежных районах и вблизи островов размеры пакетов КВВ минимальны – длина фронта лидирующих волн не превышает 20 км, ширина волновых пакетов – 5 км. По мере увеличения глубины размеры пакетов КВВ также увеличиваются. Максимальные значения обоих параметров наблюдались в районе желоба Святой Анны и на его восточном склоне (к юго-западу от о. Визе), к западу от о. Уединения, а также вдоль свала глубин к северо-западу от Ямало-Гыданской отмели. У самых крупных волновых пакетов, которые наблюдались над желобом Святой Анны, длина лидирующего волнового фронта достигала 120–125 км, ширина пакетов – 15–19 км, площадь волновых пакетов составляла более 2000 км².

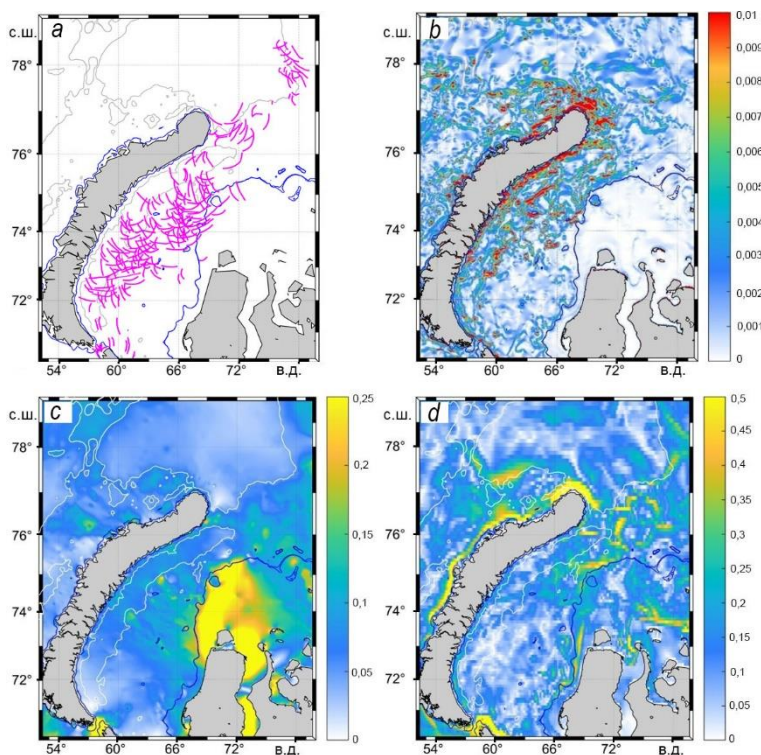
Как видно из рис. 5, *c*, диапазон значений длины фронта лидирующих волн изменяется от 5–6 до 125 км при среднем значении 35 км. При этом основной пик наблюдений приходится на диапазон 10–30 км. Как отмечалось выше, волны с протяженностью волнового фронта более 30–40 км наблюдались в центральной и северо-восточной частях акватории, ширина волновых пакетов изменялась в диапазоне 0,7–19 км при среднем значении ~ 5,5 км. При этом в большинстве наблюдений ширина волнового пакета составляла 3–6 км (рис. 5, *d*). Напомним, что длины волн в волновых пакетах в настоящей работе не определялись, но общий диапазон их значений составил 0,1–3,5 км.

На конкретном примере рассмотрим основные физические факторы, влияющие на генерацию КВВ в центральном и южном районах акватории. Для этого были выбраны РЛИ со спутника *Sentinel-1A* за 13 августа 2022 г. (02:43 UTC) с рекордным количеством ПП КВВ (239) идентифицированных внутренних волн (рис. 6, *a*). На РЛИ видны три основные группы КВВ: в окрестности изобаты 200 м на юго-восточном склоне желоба Святой Анны; к востоку от арх. Новая Земля вдоль практически всей его протяженности; в проливе Карские Ворота.

Повторно отметим, что, несмотря на наличие интенсивных приливных течений (скорость ~ 0,5 м/с) в обширной мелководной Обь-Енисейской устьевой области (рис. 6, *c*), поверхностные проявления КВВ в ней не регистрировались, за исключением ее северо-западной периферии, где наблюдались пакеты КВВ, приходящие с севера (рис. 6, *a*). Основной причиной этого, по-видимому, является отсутствие соответствующих топографических условий.

В районе юго-восточного желоба Святой Анны волны ориентированы поперек изобат и распространяются над свалом глубин 200–400 м (рис. 6, *b*) преимущественно в сторону глубокой воды на юго-запад, хотя также присутствуют и волны противоположного направления. Топографический уклон в этом районе составляет $\sim (3-5)^\circ \cdot 10^{-2}$ (рис. 6, *b*). Образование внутренних приливных волн над континентальным склоном – частое явление в арктическом бассейне [7, 30]. В этом случае образование пакетов высокочастотных внутренних волн происходит при разрушении внутреннего прилива прямо над склоном, поскольку низкочастотные внутренние приливные волны с периодом M_2 не могут свободно распространяться вблизи критической широты

74,5° с. ш. [13, 31–33]. Согласно [7, 31], реализация этого сценария возможна даже при невысоких значениях скорости приливных течений (0,1–0,15 м/с). В нашем случае такая скорость восточнее изобаты 200 м также находилась в указанном диапазоне (рис. 6, *с*). Амплитуды внутренних волн при генерации над склоном могут достигать 50 м [7, 8].



Р и с. 6. Положение лидирующих волн в пакетах КВВ (*а*), безразмерного уклона морского дна (*б*), скорости (м/с) приливных (*с*) и поверхностных (*д*) течений в Карском море за 13.08.2022 г. Синей и белой линиями отмечены изобаты 40 и 200 м соответственно

F i g. 6. Locations of the leading waves in SIW packets (*a*), dimensionless sea bottom slope (*b*); tidal (*c*) and surface (*d*) current velocities (m/s) in the Kara Sea on 13.08.2022. Blue and white lines indicate the 40 and 200 m isobaths, respectively

Процесс образования и характеристики нелинейных внутренних волн в проливе Карские Ворота исследовались достаточно часто. Область пролива характеризуется наличием подводного хребта с чередой одиночных вершин и высокими скоростями фоновых и приливных течений (рис. 6, *с*, *д*) [9, 14, 34]. Здесь отметим лишь, что генерация КВВ в проливе возможна не только в ходе эволюции внутреннего прилива, образующегося при обтекании суммарным потоком подводного хребта [14, 21, 35], но также и в транскритическом режиме [36]. В этом случае генерация КВВ может происходить дважды за приливный период или 4 раза в сутки, а направление распространения внутренних волн будет определяться интенсивностью и направлением суммарного потока во время транскритического режима [11]. Согласно наблюдениям, амплитуды нелинейных КВВ в проливе достигают 30–40 м [18].

Основная и самая многочисленная группа внутренних волн распространяется на юг от м. Желания и от восточного склона Новоземельской впадины над Западно-Карской ступенью (рис. 6, *a*), что ранее уже отмечалось в литературе [26, 27]. Генерация пакетов КВВ непосредственно вблизи м. Желания, по-видимому, обусловлена взаимодействием интенсивной (со скоростью более 0,5 м/с) струи Западно-Новоземельского течения, огибающей северную оконечность архипелага, с локальной топографией (рис. 6, *b*). Скорости приливных течений в период и незадолго до спутниковой съемки были невелики ($\sim 0,05$ м/с, рис. 6, *c*), хотя в целом средний поток баротропной приливной энергии здесь также направлен на юг [37]. Амплитуда внутренних волн в этом районе может достигать 50 м [38].

Пакеты КВВ, расположенные несколько южнее, образуются уже непосредственно над порогом Брусилова, где есть все условия для их генерации при взаимодействии приливных течений (со скоростью $\sim 0,15\text{--}0,2$ м/с) с топографией порога. Этот район характеризуется наличием локальных максимумов в поле средней скорости диссипации баротропной и бароклинной приливной энергии и является очагом генерации внутренних приливных волн [33, 39].

Обширный район над Западно-Карской ступенью к востоку от Новоземельской впадины характеризуется большим количеством достаточно узких локальных зон неоднородного рельефа с глубинами в диапазоне 60–160 м [40] и безразмерным уклоном $\sim 0,1$ (рис. 6, *b*). Каждый такой участок рельефа по сути является местом генерации КВВ. Приливные течения здесь выше (скорость $\sim 0,15$ м/с), чем непосредственно в глубоководной области Новоземельской впадины, (рис. 6, *c*). Фоновые течения в поверхностном слое интенсивнее (скорость более 0,2 м/с) к северу от $74,5^\circ$ с. ш., однако они меньше приливных в южной части этого района (рис. 6, *d*).

Интересной особенностью является преимущественно южное направление КВВ в указанном районе. Оно совпадает с направлением поверхностной полусуточной приливной волны и среднего горизонтального переноса баротропной приливной энергии, составляющего здесь 2000–10000 Вт/м [37]. Рассмотрим особенности фоновых течений в указанном районе, поскольку они также могут играть существенную роль в образовании КВВ. Согласно результатам натурных измерений в сентябре 2007 г. [38], основные течения в этом районе (Восточно-Новоземельское и северная ветвь Ямальского) направлены на север и северо-восток в соответствии с результатами моделирования для осеннего периода [41]. Однако в летний период основная струя Восточно-Новоземельского течения, направленная на северо-восток вдоль берегов арх. Новая Земля, рециркулирует в обратном направлении вдоль восточного склона Новоземельской впадины в районе 75° с. ш., соединяясь с водами Западно-Новоземельского течения, также проникающими на юго-запад в этот период [41]. Таким образом, образование КВВ южного направления летом вполне объяснимо наложением приливных и фоновых течений южного направления над неоднородной топографией. Интересно отметить, что в сентябре, когда в верхнем слое доминируют существенно более интенсивные течения северо-восточного направления [38, 41], пакеты КВВ тоже направлены на северо-восток (рис. 3, *c*).

Еще раз более детально обратимся к указанному распределению КВВ и сопоставим его с полученными ранее результатами. Для сравнения на рис. 7 показаны результаты наблюдения КВВ в июле – сентябре 2022 г. и в июле – октябре 2007 г. Видно, что полученные нами результаты (рис. 7, *слева*) дают значительно более полную картину районов образования КВВ. Самые существенные отличия характерны для районов *a, b, e, g, h, j*, где ранее волны либо вообще не встречались, либо их проявлений было значительно меньше (рис. 7, *справа*). Частота повторяемости (2,8) ПП КВВ на РЛИ по результатам съемки 2007 г. существенно ниже (2,8), чем в 2022 г. (7,64).

Сопоставим полученные в настоящей работе результаты с результатами приливной модели *QUODDY-4* [42], на основе которых было определено четыре основных района генерации внутренних приливных волн в Карском море – северная часть Центрального плато, западный и восточный склоны Новоземельской впадины, пролив Карские Ворота и район к юго-востоку от м. Желания. Уместно ожидать, что в этих же районах должны встречаться и пакеты КВВ, образующиеся при разрушении внутренних приливов. Из рис. 7, *a* отчетливо видно, что пакеты КВВ наблюдаются во всех этих районах и во многих других, где, согласно [42], амплитуды внутренних приливных волн отличны от нуля, за исключением области к западу от Ямальского п-ова. Однако вопрос, все ли наблюдаемые пакеты КВВ связаны именно с разрушением внутренних приливных волн, остается открытым, поскольку механизмы генерации КВВ весьма разнообразны [11].

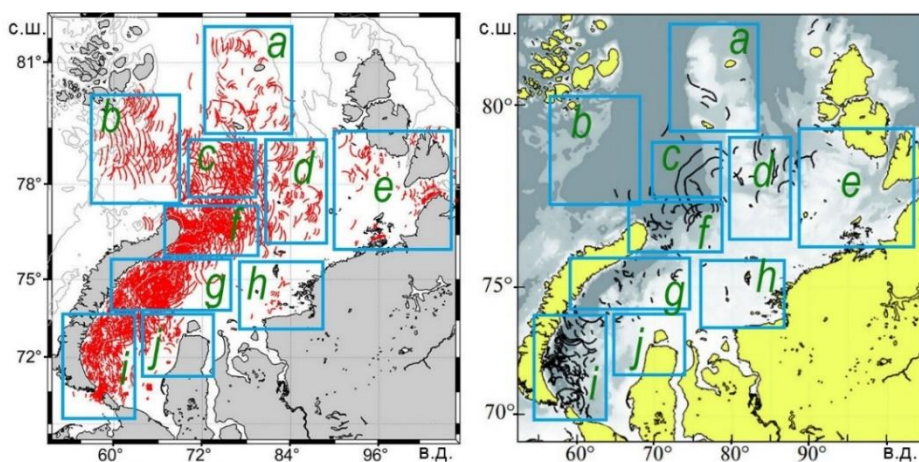


Рис. 7. Районы наблюдения КВВ в Карском море (отмечены буквами) в июле – сентябре 2022 г. (по результатам настоящей работы) – (*слева*) и в июне – октябре 2007 г. (по результатам работы [27]) – (*справа*)

Fig. 7. Areas of SIW observations in the Kara Sea (marked with letters) in July – September, 2022 (based on the present study results) – (left), and in June – October, 2007 (based on the results of [27]) – (right)

Сопоставим теперь полученные нами результаты с недавними результатами работы [26], выполненной с использованием идентичного набора данных. Напомним, что за вычетом данных за октябрь 2022 г., которые в нашей работе не использовались, авторы работы [26] идентифицировали 794 ПП КВВ в 235

РЛИ за июль – сентябрь 2022 г. Частота повторяемости внутренних волн по полной выборке использованных спутниковых данных в этом случае составляет 3,38 ПП КВВ на РЛИ, что всего на 20 % выше результатов 2007 г. [27], но в 2,3 раза ниже полученного нами (7,64 ПП КВВ) за аналогичный период 2022 г.

Если учитывать не всю выборку, а только набор РЛИ, в котором наблюдались поверхностные проявления КВВ, то результат получается аналогичным. В работе [26] выделено 834 ПП КВВ на 97 РЛИ, в нашей работе – 2835 ПП КВВ на 128 РЛИ, т. е. недооценка составляет 2,6 раза по сравнению с нашими результатами.

Наконец, если сравнить количество выделенных ПП КВВ за каждый месяц, отнормировав их на общее количество использованных в анализе РЛИ, то получается, что в июле и сентябре нами выделено в 3 раза больше таких проявлений КВВ, а в августе – в 2 раза больше, чем в работе [26]. Авторы указанной работы также упоминают, что максимальное количество ПП КВВ на отдельно взятом РЛИ наблюдалось ими 11 августа 2022 г. и достигало 72, тогда как в настоящей работе выделено на 44 % больше – 104 ПП КВВ. Таким образом, налицо весьма существенные пропуски поверхностных проявлений КВВ в спутниковых данных и, как следствие, недооценка встречаемости и основных районов образования КВВ в Карском море.

В работе [26] отсутствуют данные по распространению ПП КВВ в акватории желоба Святой Анны в июле – сентябре 2022 г. Согласно нашим данным, в июле самые существенные отличия видны в акватории Пясинского залива и Новоземельской впадины, в августе – в центральной части моря и северных районах над Центрально-Карским плато, в сентябре – в южной части Новоземельской впадины и самой северной части моря – в районе о. Ушакова.

Из пространственных параметров КВВ в работе [26] определялась только длина фронта лидирующих волн, диапазон наблюдаемых значений составлял 3–58 км со средним значением 12,5 км. Согласно нашим данным, диапазон составил 3–125 км со средним значением 35 км (рис. 5, с). Как и в работе [26], повышенные значения этого параметра (более 40–50 км) наблюдались к востоку и юго-востоку от м. Желания, однако максимальные значения были зарегистрированы над глубоководной областью желоба Святой Анны (78–79° с. ш.), что хорошо видно на рис. 3, а и 5, а. Эти результаты, как и собственно наблюдения КВВ в указанном районе, отсутствуют в работе [26].

Заключение

Анализ 371 РЛИ со спутника *Sentinel-1* за период 1 июля – 30 сентября 2022 г. позволил идентифицировать 2835 поверхностных проявлений КВВ на акватории Карского моря. Большая часть КВВ зарегистрирована в августе (~56 %).

Отмечается общее увеличение случаев регистрации ПП КВВ и существенное расширение районов их наблюдения по сравнению с результатами, полученными летом 2007 г. В течение летне-осеннего сезона 2022 г. пакеты КВВ образуются на большей половине акватории Карского моря. Районы генерации КВВ хорошо коррелируют с районами моря, где безразмерный уклон морского дна составляет $\geq 0,01$, а значения приливных/фоновых течений отличны от нуля. Остается открытым вопрос об амплитуде и глубине проникновения этих

колебаний, однако отдельные исследования на шельфе Карского моря показывают существование интенсивных КВВ высотой 30–50 м. Такие волны могут приводить к интенсивному турбулентному обмену как на шельфе, так и над континентальным склоном.

Выделяется как минимум 8 очагов устойчивой генерации КВВ: области проливов Карские Ворота и Вилькицкого; три очага генерации в обширной области, ограниченной на западе восточным склоном Новоземельской впадины, на востоке – западной частью Западно-Карской ступени; районы м. Желания и порога Брусилова, а также район бровки шельфа к северо-западу от о. Ушакова. Выделенные районы, вполне вероятно, могут одновременно являться очагами образования внутренних приливных волн и, как следствие, районами интенсивной диссипации приливной энергии в Карском море.

Кроме того, обнаружены новые районы образования КВВ: южная часть желоба Святой Анны и его западный и восточные склоны, Центральнo-Карский желоб, Центральнo-Карское плато, район к востоку от о. Северный, а также прибрежные участки акватории вблизи п-ова Ямал и о. Большой. Меньше всего волн наблюдалось в мелководных прибрежных районах моря с интенсивным речным стоком. Основной причиной этого, по-видимому, является отсутствие соответствующих топографических условий.

В целом пакеты КВВ образуются в различных районах Карского моря с выраженными неоднородностями донной топографии порой достаточно малого масштаба, некоторые из этих районов характеризуются интенсивными приливными и/или фоновыми течениями. Многочисленные пакеты КВВ образуются также и в районах, где скорость суммарных течений составляет всего 0,1–0,2 м/с. Главным условием образования КВВ в таких районах является наличие неоднородного рельефа дна с резкими перепадами глубин. Направление распространения КВВ часто определяется направлением фоновых поверхностных течений, которые в отдельных районах являются весьма интенсивными и имеют выраженную сезонную изменчивость по скорости и направлению.

В мелководных прибрежных районах и вблизи островов размеры пакетов КВВ минимальны. Самые крупные волновые пакеты площадью более 2000 км² наблюдались над желобом Святой Анны, где длина волнового фронта достигала 120–125 км, а ширина пакетов составляла 15–19 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юлин А. В., Вязигина Н. А., Егорова Е. С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // *Российская Арктика*. 2019. № 7. С. 28–40. EDN YMCASA. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10073>
2. 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. <https://doi.org/10.1126/science.aai8204>
3. 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. <https://doi.org/10.1029/2020GL089469>
4. Козлов И. Е., Кузьмин А. В. Новые районы генерации короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых по данным Sentinel-1 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 4. С. 280–290. EDN GBWPHM. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-280-290>

5. 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. EDN MBVAUG. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2022-3-16-27>
6. Numerical Modeling of Internal Wave Generation at High Latitudes / O. E. Kurkina [et al.] // The Ocean in Motion / Eds. M. Velarde, R. Tarakanov, A. Marchenko. Cham : Springer, 2018. P. 569–580. (Springer Oceanography Series). https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_36
7. 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. <https://doi.org/10.1029/2020GL088083>
8. High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen / A. V. Marchenko [et al.] // Continental Shelf Research. 2021. Vol. 227. 104523. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104523>
9. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean / I. E. Kozlov [et al.] // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, iss. 24. 5769. <https://doi.org/10.3390/rs15245769>
10. Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. “Горячие точки” в поле внутренних волн в океане // Акустический журнал. 2007. Т. 53, № 3. С. 410–436. EDN HFFSOU.
11. Kopyshov I. O., Kozlov I. E., Zimin A. V. Generation of Nonlinear Internal Waves by the Transcritical Flow in the Kara Gates Strait // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Vol. 25. EDN OKDYJG. <https://doi.org/10.2205/2024ES001021>
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. EDN GTVQOQ. <https://doi.org/10.7868/S2073667320010025>
13. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude / V. Vlasenko [et al.] // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2003. Vol. 50, iss. 3. P. 317–338. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(03\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(03)00018-9)
14. Внутренний прилив в проливе Карские Ворота / Е. Г. Морозов [и др.] // Океанология. 2017. Т. 57, № 1. С. 13–24. EDN XSMVUP. <https://doi.org/10.7868/S0030157417010105>
15. 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. EDN PJTDAA. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2021-6-645-658>
16. Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Региональные особенности плотностной стратификации вод и характеристик внутренних волн в арктических морях // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 6. С. 779–796. EDN WVSPOB.
17. Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Zimin A. V. Internal Solitary Waves in the White Sea: Hot-Spots, Structure, and Kinematics from Multi-Sensor Observations // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, iss. 19. 4948. <https://doi.org/10.3390/rs14194948>
18. Kozlov I., Mikhaylichenko T., Petrenko L. Properties of Short-Period Internal Waves Near Svalbard from Sentinel-1 Satellite Data // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol. 24, iss. 5. ES5008. <https://doi.org/10.2205/2024ES000951>
19. Monitoring short-period internal waves in the White Sea / A. V. Zimin [et al.] // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Vol. 52. P. 951–960. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090309>
20. Short-Period Background Internal Waves in the Kara Sea in the Water Area near Cape Zhelaniya / Yu. V. Nazarenko [et al.] // Physics of Wave Phenomena. 2025 Vol. 33, iss. 3. P. 253–259. <https://doi.org/10.3103/S1541308X25700207>
21. A numerical simulation of the generation and evolution of nonlinear internal waves across the Kara Strait / Q. Li [et al.] // Acta Oceanologica Sinica. 2019. Vol. 38. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13131-019-1437-z>

22. Букатов А. А., Соловей Н. М., Павленко Е. А. Оценка связи дисперсных свойств свободных внутренних волн и вертикальной структуры поля плотности в Баренцевом и Карском морях // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 20–30. EDN SBCHJI. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-20-30>
23. Каган Б. А., Софьина Е. В. Высокора разрешающее моделирование поверхностной результирующей циркуляции вод в Карском море, ее баротропной и бароклинной составляющих и роль приливов в их формировании // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 2. С. 103–107. EDN XOTNED. <https://doi.org/10.7868/S2073667318020090>
24. Properties of Short-Period Internal Waves in the Kara Gates Strait Revealed from Spaceborne SAR Data. / I. O. Kopyshov [et al.] // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Vol. 23, iss. 5. ES0210. <https://doi.org/10.2205/2023ES02SI10>
25. Study of the Characteristics of Internal Waves in the Kara Sea and Their Influence on Turbulent Heat and Momentum Fluxes over the Sea Surface / E. A. Marchuk [et al.] // Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics. 2024. Vol. 60, iss. 5. P. 501–514. <https://doi.org/10.1134/S0001433824700464>
26. Study on the Characteristics of Internal Solitary Waves in Arctic Kara Sea Based on SAR Images / Z. Yang [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2024. Vol. 62. 4207113. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3422174>
27. 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. EDN UDEYRL. <https://doi.org/10.7868/S0205961415040053>
28. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. / M. Jakobsson [et al.] // Scientific Data. 2020. Vol. 7, iss. 1. 176. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9>
29. Tide Model Driver for MATLAB / C. A. Greene [et al.] // Journal of Open Source Software. 2024. Vol. 9, iss. 95. 6018. <https://doi.org/10.21105/joss.06018>
30. Morozov E. G., Pisarev S. V. Internal Tides at the Arctic Latitudes (Numerical Experiments) // Okeanologiya. 2002. Vol. 42, issue 2. P. 165–173.
31. Морозов Е. Г., Пака В. Т. Внутренние волны в высокоширотном бассейне // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 709–715. EDN MVSGVV.
32. Каган Б. А., Софьина Е. В., Тимофеев А. А. Влияние горизонтальной неоднородности стратификации на внутренние приливы и индуцируемую ими диапикническую диффузию в безледном Карском море // Океанология. 2020. Т. 60, № 2. С. 186–199. EDN LNIJW. <https://doi.org/10.31857/S0030157420020045>
33. 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. <https://doi.org/10.1002/2017GL075310>
34. Каган Б. А., Софьина Е. В. Приливные изменения регионального климата Карского моря: результаты моделирования // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 1. С. 40–44. EDN RDTDUP. <https://doi.org/10.7868/S2073667319010052>
35. Morozov E. G., Paka V. T., Bakhanov V. V. Strong internal tides in the Kara Gates Strait // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35, iss. 16. L16603. <https://doi.org/10.1029/2008GL033804>
36. Jackson C. R., da Silva J. C. B., Jeans G. The generation of nonlinear internal waves // Oceanography. 2012. Vol. 25, iss. 2. P. 108–123. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.46>
37. Каган Б. А., Тимофеев А. А. Взаимодействие поверхностных полусуточных приливов в Баренцевом и Карском морях // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 1. С. 5–10. EDN YKUWGR. <https://doi.org/10.7868/S2073667317010014>
38. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 г. / А. Г. Зацепин [и др.] // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 683–697. EDN MVSGVB.
39. Каган Б. А., Софьина Е. В., Тимофеев А. А. Влияние приливов на климатические характеристики Карского моря в безледный период // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 2. С. 51–60. EDN TAVNZK. <https://doi.org/10.31857/S0002-351555251-60>

40. Relief of the Kara Sea Bottom and Sediment Sorption Properties as Pollution Accumulation Factors / A. Yu. Miroshnikov [et al.] // *Oceanology*. 2021. Vol. 61. P. 714–726. <https://doi.org/10.1134/S0001437021050088>
41. *Harms I. H., Karcher M. J.* Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C6. P. 13431–13448. <https://doi.org/10.1029/1999jc900048>
42. *Каган Б. А., Тимофеев А. А.* Моделирование поверхностных и внутренних полусуточных приливов в Карском море // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 2. С. 265–275. EDN YRWQNH. <https://doi.org/10.7868/S0002351517020055>

Об авторах:

Кузьмин Алексей Владимирович, младший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 7782-0303**, vlowcs@gmail.com

Козлов Игорь Евгеньевич, ведущий научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследований, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0001-6378-8956**, **ResearcherID: G-1103-2014**, **SPIN-код: 3267-6693**, ik@mhi-ras.ru