

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН
В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН ПО
СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ SENTINEL-1И. Е. Козлов^{*}¹, Т. В. Михайличенко¹ и Л. А. Петренко¹¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия^{*} **Контакт:** Игорь Евгеньевич Козлов, ik@mhi-ras.ru

В настоящей работе представлены результаты анализа характеристик поля короткопериодных внутренних волн (КВВ) в проливе Фрама и в окрестности архипелага Шпицберген по данным спутниковых измерений Sentinel-1 A/B с июня по сентябрь 2018 г. В ходе обработки 1500 спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) выявлено 750 случаев регистрации поверхностных проявлений КВВ. Максимальное количество проявлений внутренних волн зарегистрировано в августе, когда и условия стратификации, и ледовые условия наиболее благоприятны для генерации и наблюдения КВВ в спутниковых данных. Фоновые метеорологические условия летом 2018 г. привели к отступлению границы дрейфующих льдов на север до 82,5° с. ш., что впервые позволило провести детальные наблюдения характеристик внутренних волн над плато Ермак по спутниковым данным. В результате наблюдений выявлены четыре основных района устойчивой генерации КВВ – глубоководная часть пролива Фрама (глубины более 2000 м), юго-западная часть плато Ермак с глубинами 500–1500 м и два района на бровке шельфа в верхней части континентального склона к северо-западу от архипелага Шпицберген с глубинами менее 500 м. Анализ пространственных характеристик КВВ показал, что в районе исследований доминируют пакеты КВВ со средней длиной фронта лидирующей волны около 15 км и средней шириной пакета около 5 км. Самые крупные пакеты КВВ площадью около 400 км² образуются над плато Ермак, где скорости приливных течений максимальны.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, приливные течения, турбулентное перемешивание, морской лед, спутниковая радиолокация морской поверхности, пролив Фрама, архипелаг Шпицберген, плато Ермак, Северный Ледовитый океан, Арктика.

Цитирование: Козлов, И. Е., Т. В. Михайличенко и Л. А. Петренко Характеристики короткопериодных внутренних волн в районе архипелага Шпицберген по спутниковым данным Sentinel-1 // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES5008. — DOI: 10.2205/2024es000951 — EDN: RPKMQQ

Введение

Исследование короткопериодных внутренних волн (КВВ) на основе спутниковых измерений ведется уже более 40 лет [Alpers, 1985; Magalhaes and Da Silva, 2018; Zhang et al., 2023; Zimin et al., 2016]. В последние годы наблюдается неизменный рост интереса отечественных и зарубежных специалистов к проблеме исследования внутренних волн в Арктике [Bukatov, 2021; Kopyshov et al., 2023; Kozlov et al., 2023; 2017; Marchenko et al., 2021; Petrusevich et al., 2018; Rippeth et al., 2015; Vlasenko et al., 2003]. Изучение КВВ имеет важное значение для обеспечения безопасности подводной навигации и передачи акустических сигналов [Коняев и Сабинин, 1992]. Кроме того, в последние годы интерес к исследованию внутренних волн в Арктике существенно возрос в связи с их возможным влиянием на вертикальный перенос тепла [Fer et al., 2020; Kozlov et al., 2022; Rippeth et al., 2017] и, как следствие, морской лед. [Морозов и Писарев, 2004; Carr et al., 2019; Morozov et al., 2019].

<https://elibrary.ru/rpkmqq>

Получено: 13 сентября 2024 г.

Принято: 13 ноября 2024 г.

Опубликовано: 12 декабря 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.

Одним из ключевых арктических районов являются акватория пролива Фрама и область в окрестности архипелага Шпицберген – важнейший район поступления тепла в арктический бассейн с водами атлантического происхождения [Hattermann *et al.*, 2016]. Однако с точки зрения исследования поля КВВ этот район остается малоизученным. Основные работы проводились здесь еще в 80-ые годы прошлого столетия в рамках проектов MIZEX 83/84 (англ. Marginal Ice Zone Experiment), CEAREX (Coordinated Eastern Arctic Experiment) и др. [D'Asaro and Morison, 1992; Johannessen *et al.*, 1987; Padman and Dillon, 1991; Plueddemann, 1992; Sandven and Johannessen, 1987]. Эти исследования, основанные на контактных измерениях подо льдом, впервые установили существование интенсивных внутренних волн большой амплитуды севернее 80° с. ш. Совсем недавно в этом же районе над континентальным склоном к северу от архипелага Шпицберген были зарегистрированы пакеты нелинейных КВВ с высотой колебаний до 50 м [Fer *et al.*, 2020]. Интенсивные внутренние волны со схожими значениями амплитуды были также зарегистрированы к юго-востоку от архипелага Шпицберген [Marchenko *et al.*, 2021]. Несмотря на безусловную ценность полученных ранее результатов детального исследования пространственно-временных характеристик КВВ в период существенного сокращения площади ледяного покрова в этом районе Арктики не проводилось. Отдельные попытки картирования характеристик КВВ в этом районе были выполнены ранее на основе анализа данных спутникового радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) Envisat ASAR за летне-осенний период 2007 года [Зубкова и др., 2016; Козлов и др., 2010; Kozlov *et al.*, 2015a]. Однако пространственное разрешение этих данных и общий объем информации существенно уступают съемке тандема спутников Sentinel-1 A/B, используемых в настоящей работе. Упомянем здесь также недавнюю работу авторов [Козлов и Михайличенко, 2021], которая, хотя и была связана с исследованием поля КВВ в этом же районе, но была посвящена исключительно разработке методики и анализу фазовой скорости КВВ по данным последовательных спутниковых РСА-измерений.

Таким образом, целью настоящей работы является определение основных районов генерации и распространения КВВ, а также их пространственно-временных характеристик в проливе Фрама и в районе архипелага Шпицберген на основе анализа массива спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) Sentinel-1 A/B с июня по сентябрь 2018 г.

Данные и методы

Для анализа пространственной изменчивости КВВ в проливе Фрама и шельфовой области архипелага Шпицберген использовались спутниковые РЛИ Sentinel-1 A/B, полученные в режиме съемки Extra Wide Swath с шириной полосы обзора около 250 км и пространственным разрешением 90 м. Спутниковые данные были получены из архивов системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>).

Анализ и идентификация внутренних волн на РЛИ проводились в соответствии с методикой, описанной в работах [Kozlov *et al.*, 2022; 2015b]. В ходе работы выполнен анализ 1500 спутниковых РЛИ за июнь-сентябрь 2018 г. На [рис. 1](#) представлена карта покрытия РСА-съемкой района исследований. Сводная информация о количестве исходных данных представлена в [табл. 1](#). Отметим лишь, что количество использованных за каждый месяц РЛИ было примерно равным. Согласно [рис. 1](#) наиболее обеспечены спутниковыми данными районы пролива Фрама, бровки шельфа к северо-западу от арх. Шпицберген, а также южная часть плато Ермак – на них приходится более 200 РЛИ за весь период наблюдений. В остальных районах покрытие спутниковой съемкой составляет в среднем около 100–150 РЛИ, за исключением районов к югу и юго-западу от архипелага Шпицберген, где оно составляет около 50 РЛИ.

Процедура идентификации поверхностных проявлений (ПП) КВВ проводилась в программе ESA Sentinel Application Platform (SNAP-ESA). Это программное обеспечение позволяет выполнять предварительную обработку и визуализацию РЛИ, выбирать

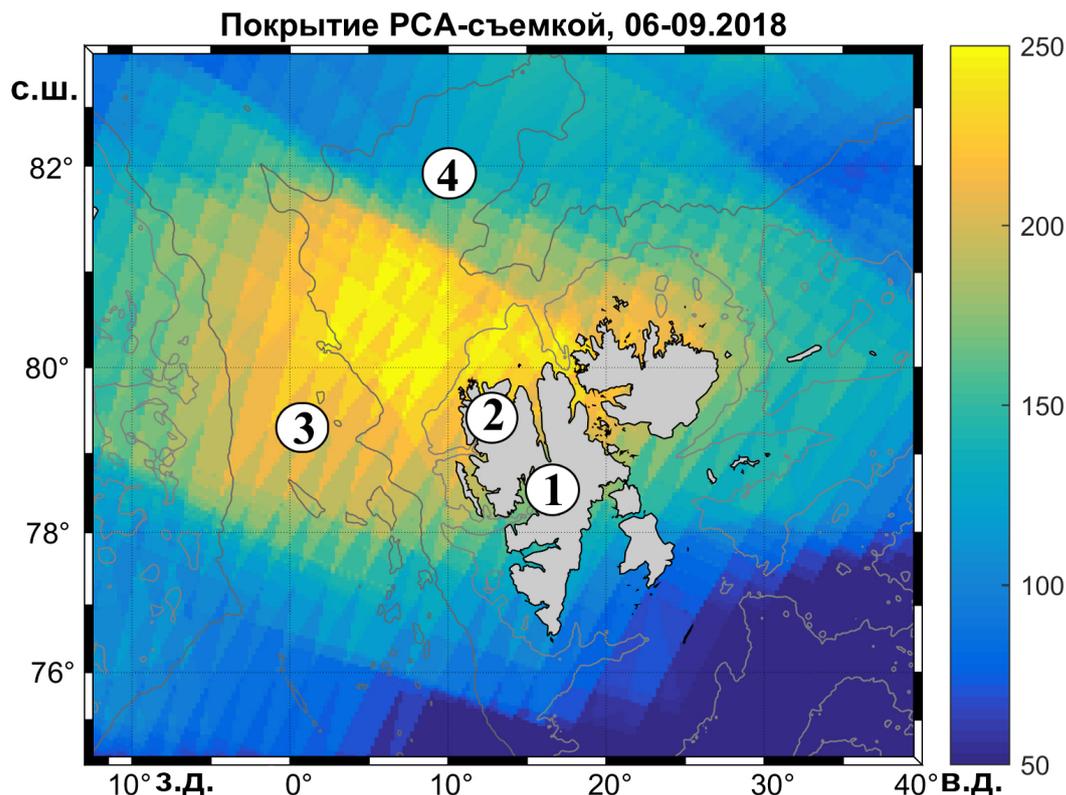


Рис. 1. Карта покрытия района исследований спутниковой РСА-съёмкой Sentinel-1 A/B за июнь–сентябрь 2018 г. 1 – архипелага Шпицберген, 2 – о. Земля Альберта I, 3 – пролив Фрама, 4 – плато Ермак.

Таблица 1. Результаты спутниковых наблюдений короткопериодных внутренних волн в июне–сентябре 2018 г.

Месяц	Количество РЛИ снимков	Количество ПП КВВ
июнь	400	61
июль	395	288
август	395	348
сентябрь	310	53
Всего:	1500	750

интересующую часть изображения, выделять фронт лидирующей волны в каждом пакете КВВ, а также проводить поперечное сечение через пакет КВВ, характеризующее ширину волнового пакета.

На рис. 2 показан пример проявления КВВ на РЛИ Sentinel-1B за 27 июля 2018 г. Увеличенный фрагмент РЛИ (рис. 2б) приходится на юго-западную часть плато Ермак. На РЛИ отчетливо идентифицируются два последовательных пакета КВВ, направленных на юго-запад. Отрезок А-В на рис. 2б отмечает начало и конец волнового пакета и характеризует его ширину, а кривая С-Д отмечает фронт лидирующей волны и характеризует его длину. Размеры пакетов схожи – длина лидирующего фронта составляет около 30 км, а ширина пакетов – около 7 км.

Определение границ ледовой кромки выполнялось по исходным РЛИ на основе экспертной оценки согласно методике, описанной в работах [Kozlov et al., 2020; Petrenko and Kozlov, 2023] и позволяющей выделить области открытой воды на фоне дрейфующего льда за счет характерного контраста РЛ-сигнала между ними. Обработка результатов анализа КВВ, построение итоговых карт с их характеристиками, а также границами ледовой кромки выполнялись в программной среде Matlab (MathWorks).

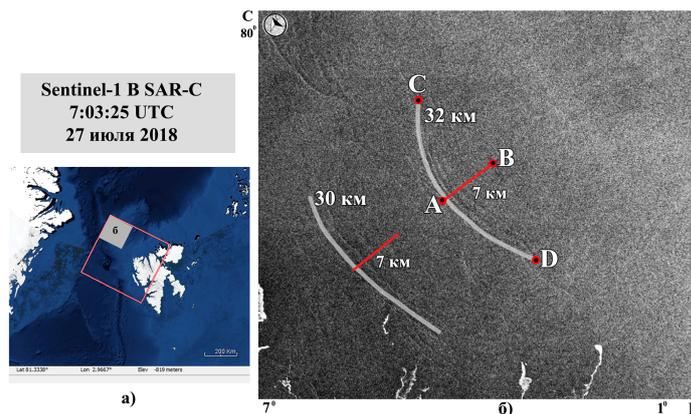


Рис. 2. Положение РЛИ Sentinel-1В за 15.08.2018 г. к северу-западу от архипелага Шпицберген (а) и его увеличенный фрагмент (б) с проявлением двух последовательных пакетов КВВ. А-В – ширина пакета КВВ, С-Д – длина фронта лидирующей волны пакета КВВ.

Фоновые метеорологические условия

Рассматриваемый нами 2018 г. по рангу теплых лет за период с 1936 г. считается вторым годом [Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. III-й квартал 2018 г. (Ежеквартальный информационный бюллетень), 2018]. Повышение температуры воздуха в 2018 году было обусловлено крупномасштабной перестройкой атмосферных процессов и усилением интенсивности адвекции теплых воздушных масс в приполярные районы Арктики. Возрастание повторяемости потоков южных направлений привело к формированию летом 2018 г. значительных положительных аномалий температуры воздуха. Средняя за летний период аномалия температуры воздуха в 2018 г. (относительно среднего за 1961–1990 гг.), осредненная по широтной зоне 70° – 85° с. ш., составила 0.9°C [Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. III-й квартал 2018 г. (Ежеквартальный информационный бюллетень), 2018]. Начавшееся в июне 2018 г. быстрое очищение Арктики ото льда продолжилось до середины сентября 2018 г. и было в первую очередь связано с интенсивным дрейфом льда выносного характера, адвекцией тепла и развитием процессов таяния и разрушения льда. С июня по сентябрь 2018 г. преобладали ветры южного и юго-западного направлений, что обусловило отступление границы дрейфующих льдов на север до $82,5^{\circ}$ с. ш. (рис. 3).

Наибольшее западное смещение ледовой кромки до 0° меридиана произошло в сентябре, после чего граница льда снова сместилась на восток (рис. 3). Таким образом весь пролив Фрама и район к северу от архипелага Шпицберген были свободны ото льда все четыре месяца. Средняя скорость ветра составила около 5–6 м/с. Все эти факты в совокупности позволили исследовать поле КВВ фактически на всей акватории пролива Фрама и на максимальном удалении к северу от архипелага Шпицберген вплоть до северных склонов плато Ермак.

Результаты спутниковых наблюдений КВВ

В ходе обработки 1500 спутниковых РЛИ Sentinel-1 за июнь–сентябрь 2018 г. было идентифицировано 750 ПП КВВ. Как правило, внутренние волны наблюдались на РЛИ в виде пакетов из 4–5 уединенных волн с характерным уменьшением их длины волны в сторону тыла пакета. Пространственное распределение гребней лидирующих волн в цугах КВВ за каждый месяц представлено на рис. 3. Из четырех месяцев наблюдений максимальное количество поверхностных проявлений зарегистрировано в июле (288 ПП КВВ) и августе (348 ПП КВВ), значительно меньшее количество в июне (61 ПП КВВ) и сентябре (53 ПП КВВ) (табл. 1).

Максимум наблюдений ПП КВВ в августе, по-видимому, объясняется максимальной площадью безледных участков в районе исследований (рис. 3в), более эффективным

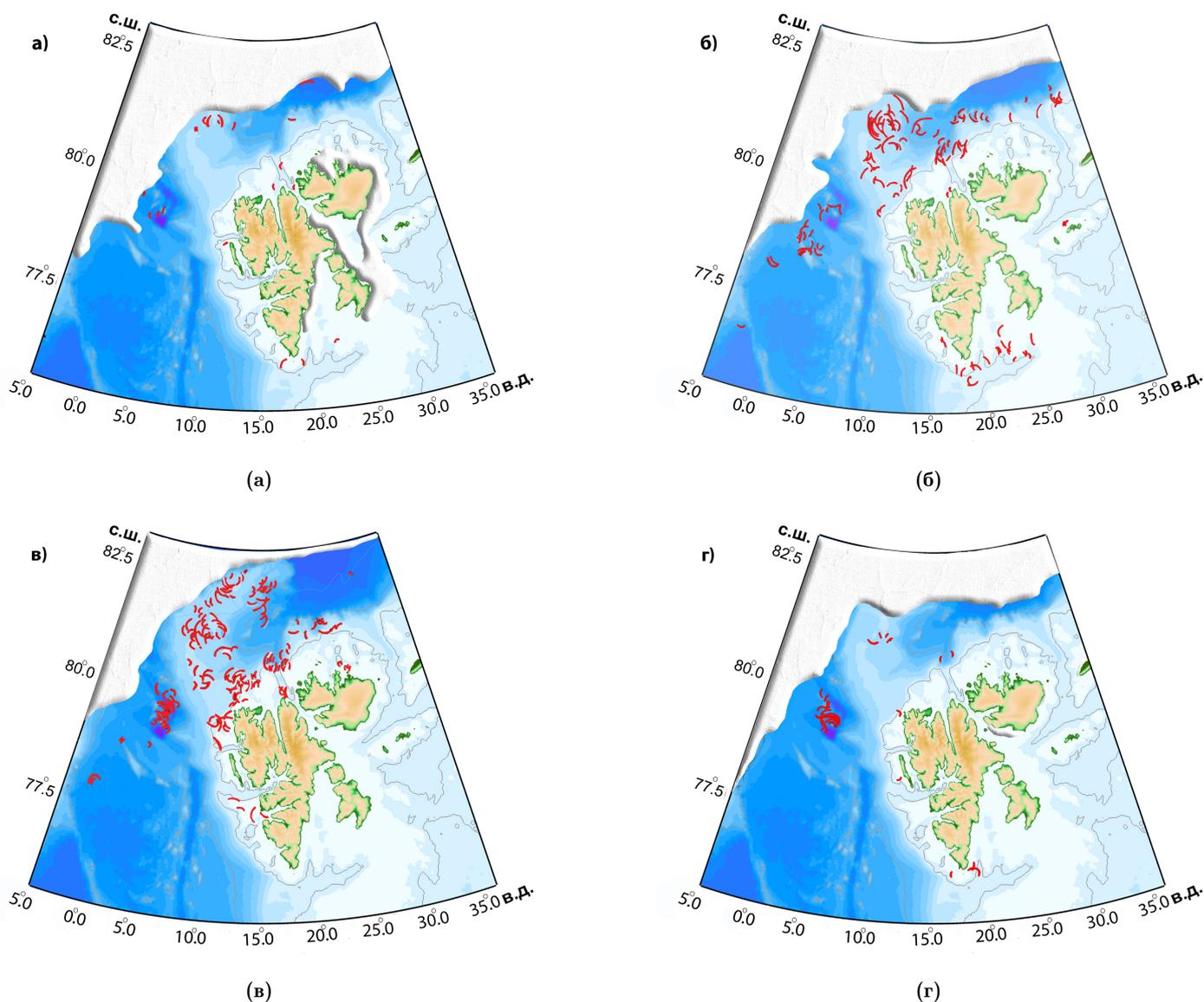


Рис. 3. Положение лидирующих гребней КВВ, идентифицированных в спутниковых данных Sentinel-1 в июне–сентябре 2018 г. Белым цветом показаны покрытые льдом области на 15 число в а) июне, б) июле, в) августе, г) сентябре 2018 г.

прогревом верхнего слоя моря и формированием неглубокого сезонного пикноклина [Fer et al., 2020], на котором и происходит генерация КВВ. Минимум ПП КВВ в сентябре, по-видимому, связан с началом активного ледообразования и усилением приводного ветра, что затрудняет идентификацию ПП КВВ. Согласно рис. 3 основные районы наблюдения внутренних волн приходятся на глубоководную часть пролива Фрама с глубинами > 2000 м, южную и центральную части плато Ермак с глубинами 500–1500 м, шельфовую область к северо-западу от арх. Шпицберген с глубинами < 500 м, а также прибрежную зону к югу от архипелага. Еще более наглядно это подтверждается данными, представленными на рис. 4, на котором показано суммарное количество идентифицированных пакетов КВВ и их повторяемость на горизонтальной сетке размером 40 × 40 узлов с размером узла около 25 × 25 км. Повторяемость наблюдений КВВ определялась в виде отношения суммарного количества волн в узле сетки к суммарному количеству РСА-съемок данного узла.

Как видно из рис. 4а, выделяется четыре района, где суммарное количество случаев регистрации ПП КВВ ≥ 15 . Эти районы включают 1) глубоководную часть пролива

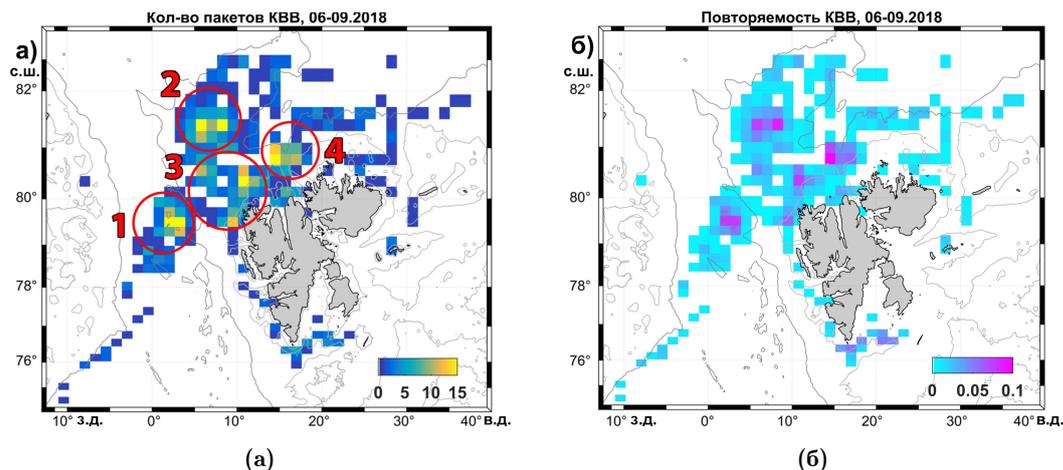


Рис. 4. Пространственное распределение внутренних волн в проливе Фрама и у архипелага Шпицберген в 2018 г.: а – суммарное количество случаев регистрации пакетов КВВ, б – повторяемость проявлений КВВ в спутниковых данных, определенное в виде отношения суммарного количества волн в узле сетки к суммарному количеству РСА-съемок данного узла. Цифры 1–4 в а) отмечают основные районы генерации КВВ.

Фрама с центром в точке с координатами $79,5^\circ$ с. ш., 3° в. д.; 2) юго-западный склон плато Ермак с центром в точке с координатами $81,4^\circ$ с. ш., 8° в. д.; 3) и 4) – два района у бровки шельфа/верхней части континентального склона севернее архипелага Шпицберген в границах координат $80,2\text{--}81^\circ$ с. ш., $11\text{--}16^\circ$ в. д., в одном из которых в июле 2018 г. были зарегистрированы КВВ рекордной амплитуды 50 м [Fer et al., 2020]. Согласно карте повторяемости КВВ (рис. 4б) ее максимальные значения наблюдались в тех же районах, но к ним вдобавок можно отнести еще две локации – в прибрежных зонах западнее Земли Альберта I ($79,5^\circ$ с. ш., 9° в. д.) и у южной оконечности арх. Шпицберген ($76,3^\circ$ с. ш., 17° в. д.).

На рис. 5 представлены карты пространственного распределения средних значений длины фронта лидирующей волны и ширины пакетов КВВ на сетке того же размера. Общий диапазон значений длины волнового фронта (ширины пакета) составляет от 2 до 66 км (от 1 до 42 км). Как видно из рис. 5, в основном на акватории наблюдались цуги КВВ со средней длиной фронта лидирующей волны около 15 км и средней шириной пакета около 5 км. Пакеты КВВ с максимальными значениями длины фронта более 40 км зарегистрированы в районе плато Ермак (рис. 5а). В этом же районе наблюдаются пакеты КВВ с высокими значениями ширины пакетов > 10 км. Этот факт может быть обусловлен как геометрическими особенностями донной топографии, так и более интенсивным приливным форсингом над плато Ермак, где скорость приливных течений максимальна и достигает $0,4\text{--}0,5$ м/с по сравнению с характерными значениями $0,1\text{--}0,2$ м/с на шельфе [Fer et al., 2020].

Наименьшие по своим пространственным параметрам пакеты КВВ встречались в прибрежной зоне к северу от архипелага. Гистограмма распределения значений длины фронта КВВ (рис. 6а) отчетливо демонстрирует высокую повторяемость значений от 5 до 20 км с выраженным пиком для значения 10 км. Длина фронта КВВ выше 20 км встречалась лишь в 20% случаев. Аналогичная гистограмма для ширины пакетов КВВ показывает, что в 90% случаев пакеты КВВ имели ширину до 10 км, а локальный максимум в этом диапазоне соответствует значениям $2,5\text{--}4$ км (рис. 6б).

Заключение

В работе представлены результаты анализа поля КВВ в проливе Фрама и в окрестности архипелага Шпицберген по данным спутниковых измерений Sentinel-1 A/B с июня по сентябрь 2018 г. В ходе обработки 1500 спутниковых РЛИ выявлено 750 случаев регистрации поверхностных проявлений короткопериодных внутренних волн. Максимальное

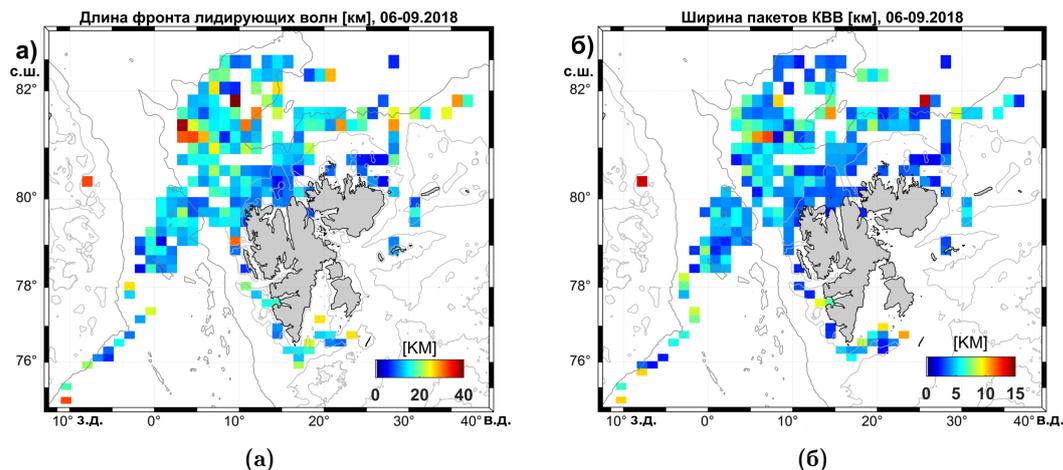


Рис. 5. Карты пространственного распределения основных параметров внутренних волн на акватории пролива Фрама и вблизи архипелага Шпицберген за 2018 год: а – длина фронта лидирующей волны (км); б – ширина пакетов (км).

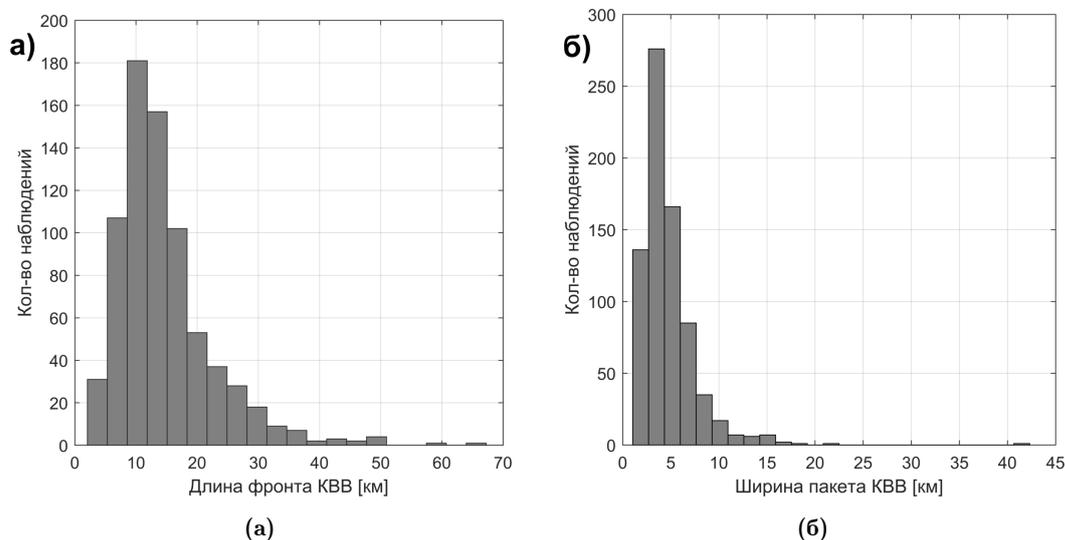


Рис. 6. Гистограммы распределения пространственных характеристик КВВ на акватории пролива Фрама и вблизи архипелага Шпицберген за 2018 год.: а – длина фронта лидирующей волны (км); б – ширина пакета КВВ (км).

количество проявлений внутренних волн зарегистрировано в августе, когда и условия стратификации, и ледовые условия были, по-видимому, наиболее благоприятны для генерации и наблюдения КВВ в спутниковых данных.

Аномально высокая температура воздуха и ветер южного, юго-западного направлений летом 2018 г. привели к отступлению границы дрейфующих льдов на север до $82,5^\circ$ с. ш., что впервые позволило провести наблюдение внутренних волн фактически над всей площадью плато Ермак. В результате наблюдений выявлены четыре основных района устойчивой генерации КВВ – глубоководная часть пролива Фрама (глубины более 2000 м), юго-западная часть плато Ермак с глубинами 500–1500 м и два района на бровке шельфа/верхней части континентального склона к северо-западу от архипелага Шпицберген с глубинами менее 500 м. Два других района частой встречаемости КВВ находятся к югу от южной оконечности архипелага и западнее Земли Альберта I.

Анализ пространственных характеристик КВВ показал, что в районе исследований доминируют пакеты КВВ со средней длиной фронта лидирующей волны около 15 км и средней шириной пакета около 5 км, т.е. средней площадью около 75 км^2 . При этом самые крупные пакеты КВВ площадью около 400 км^2 образуются над плато Ермак, где скорости приливных течений максимальны.

Как видно из полученных результатов, в июле-августе районы генерации и распространения КВВ покрывают значительные области исследуемой акватории, включая районы поступления и заглублиения теплых вод атлантического происхождения к западу и северо-западу от архипелага Шпицберген [Hattermann *et al.*, 2016]. Контактные измерения, выполненные в июле 2018 г. над континентальным склоном к северу от архипелага Шпицберген, показали, что при прохождении пакетов интенсивных внутренних волн высотой 10–50 м средние значения скорости диссипации турбулентной энергии от поверхности до дна (300 м) возрастают на два порядка, мгновенные (осредненные за шестичасовой период) вертикальные турбулентные потоки тепла достигают 100 (15) Вт/м² при фоновых значениях около 1 Вт/м² [Fer *et al.*, 2020].

В этом контексте сведения о площадных характеристиках пакетов КВВ могут быть использованы для локализации районов интенсификации вертикального турбулентного перемешивания и переноса тепла атлантических вод в поверхностный слой (и наоборот) и к нижней границе ледяного покрова под влиянием внутренних волн. Подобные эффекты, в частности, наблюдались при регистрации интенсивных КВВ подо льдом над Плато Ермак на основе точечных измерений [Padman and Dillon, 1991].

Таким образом, важными задачами будущих исследований являются определение связи сезонной изменчивости вертикальной термохалинной структуры вод с характеристиками внутренних волн, оценка зависимости пространственных и кинематических характеристик внутренних волн от фоновых приливных условий, и детальная оценка влияния внутренних волн на характеристики морского льда и вертикальное перемешивание в данном районе.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № FNNN-2024-0017.

Список литературы

- Зубкова Е. В., Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н. Характеристики короткопериодных внутренних волн в Гренландском море по данным спутниковых радиолокационных наблюдений // Ученые записки РГГМУ. — 2016. — Т. 45.
- Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н., Сандвен С. Некоторые результаты исследования внутренних волн в Баренцевом море методами радиолокационного зондирования из космоса // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — Т. 3, № 86. — С. 60–69.
- 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](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-181-192).
- Коняев К. В., Сабинин К. Д. Волны внутри океана. — СПб : Гидрометеиздат, 1992.
- Морозов Е. Г., Писарев С. В. Внутренние волны и образование полыней в море Лаптевых // Доклады Академии Наук. — 2004. — Т. 398, № 2. — С. 255–258.
- Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. III-й квартал 2018 г. (Ежеквартальный информационный бюллетень) / под ред. И. Е. Фролова. — СПб : ААНИИ, 2018.
- Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves // Nature. — 1985. — Vol. 314, no. 6008. — P. 245–247. — DOI: [10.1038/314245a0](https://doi.org/10.1038/314245a0).
- Bukatov A. A. Free Short-Period Internal Waves in the Arctic Seas of Russia // Physical Oceanography. — 2021. — Vol. 28, no. 6. — DOI: [10.22449/1573-160X-2021-6-599-611](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-6-599-611).
- Carr M., Sutherland P., Haase A., *et al.* Laboratory Experiments on Internal Solitary Waves in Ice-Covered Waters // Geophysical Research Letters. — 2019. — Vol. 46, no. 21. — P. 12230–12238. — DOI: [10.1029/2019GL084710](https://doi.org/10.1029/2019GL084710).
- D’Asaro E. A., Morison J. H. Internal waves and mixing in the Arctic Ocean // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. — 1992. — Vol. 39, no. 2. — S459–S484. — DOI: [10.1016/s0198-0149\(06\)80016-6](https://doi.org/10.1016/s0198-0149(06)80016-6).
- Fer I., Koenig Z., Kozlov I. E., *et al.* Tidally Forced Lee Waves Drive Turbulent Mixing Along the Arctic Ocean Margins // Geophysical Research Letters. — 2020. — Vol. 47, no. 16. — DOI: [10.1029/2020GL088083](https://doi.org/10.1029/2020GL088083).
- Hattermann T., Isachsen P. E., Appen W.-J. von, *et al.* Eddy-driven recirculation of Atlantic Water in Fram Strait // Geophysical Research Letters. — 2016. — Vol. 43, no. 7. — P. 3406–3414. — DOI: [10.1002/2016GL068323](https://doi.org/10.1002/2016GL068323).

- Johannessen J. A., Johannessen O. M., Svendsen E., *et al.* Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1987. — Vol. 92, no. C7. — P. 6754–6772. — DOI: [10.1029/JC092iC07p06754](https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06754).
- Kopyshov I., Kozlov I., Shiryborova A., *et al.* Properties of Short-Period Internal Waves in the Kara Gates Strait Revealed from Spaceborne SAR Data // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2023. — P. 1–11. — DOI: [10.2205/2023ES02SI10](https://doi.org/10.2205/2023ES02SI10).
- Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., *et al.* SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). — IEEE, 2015a. — P. 947–949. — DOI: [10.1109/IGARSS.2015.7325923](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7325923).
- 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, no. 19. — P. 4948. — DOI: [10.3390/rs14194948](https://doi.org/10.3390/rs14194948).
- Kozlov I. E., Kopyshov I. O., Frey D. I., *et al.* Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 24. — P. 5769. — DOI: [10.3390/rs15245769](https://doi.org/10.3390/rs15245769).
- Kozlov I. E., Krek E. V., Kostianoy A. G., *et al.* Remote Sensing of Ice Conditions in the Southeastern Baltic Sea and in the Curonian Lagoon and Validation of SAR-Based Ice Thickness Products // *Remote Sensing*. — 2020. — Vol. 12, no. 22. — P. 3754. — DOI: [10.3390/rs12223754](https://doi.org/10.3390/rs12223754).
- Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Zubkova E. V., *et al.* Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite SAR data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2015b. — Vol. 51, no. 9. — P. 1073–1087. — DOI: [10.1134/S0001433815090121](https://doi.org/10.1134/S0001433815090121).
- 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, no. 11. — P. 2047–2051. — DOI: [10.1109/LGRS.2017.2749681](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2749681).
- Magalhaes J. M., Da Silva J. C. B. Internal Solitary Waves in the Andaman Sea: New Insights from SAR Imagery // *Remote Sensing*. — 2018. — Vol. 10, no. 6. — P. 861. — DOI: [10.3390/RS10060861](https://doi.org/10.3390/RS10060861).
- Marchenko A. V., Morozov E. G., Kozlov I. E., *et al.* High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen // *Continental Shelf Research*. — 2021. — Vol. 227. — P. 104523. — DOI: [10.1016/j.csr.2021.104523](https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104523).
- Morozov E. G., Marchenko A. V., Filchuk K. V., *et al.* Sea ice evolution and internal wave generation due to a tidal jet in a frozen sea // *Applied Ocean Research*. — 2019. — Vol. 87. — P. 179–191. — DOI: [10.1016/j.apor.2019.03.024](https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.03.024).
- 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, no. C3. — P. 4769–4782. — DOI: [10.1029/90JC02260](https://doi.org/10.1029/90JC02260).
- Petrenko L. A., Kozlov I. E. Variability of the Marginal Ice Zone and Eddy Generation in Fram Strait and near Svalbard in Summer Based on Satellite Radar Observations // *Physical Oceanography*. — 2023. — Vol. 30, no. 5. — P. 594–611.
- Petrusevich V. Y., Dmitrenko I. A., Kozlov I. E., *et al.* Tidally-generated internal waves in Southeast Hudson Bay // *Continental Shelf Research*. — 2018. — Vol. 167. — P. 65–76. — DOI: [10.1016/j.csr.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.08.002).
- Plueddemann A. J. Internal wave observations from the Arctic environmental drifting buoy // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1992. — Vol. 97, no. C8. — P. 12619–12638. — DOI: [10.1029/92JC01098](https://doi.org/10.1029/92JC01098).
- Rippeth T. P., Lincoln B. J., Lenn Y.-D., *et al.* Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography // *Nature Geoscience*. — 2015. — Vol. 8, no. 3. — P. 191–194. — DOI: [10.1038/ngeo2350](https://doi.org/10.1038/ngeo2350).
- Rippeth T. P., Vlasenko V., Stashchuk N., *et al.* Tidal Conversion and Mixing Poleward of the Critical Latitude (an Arctic Case Study) // *Geophysical Research Letters*. — 2017. — Vol. 44, no. 24. — DOI: [10.1002/2017GL075310](https://doi.org/10.1002/2017GL075310).
- Sandven S., Johannessen O. M. High-frequency internal wave observations in the marginal ice zone // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1987. — Vol. 92, no. C7. — P. 6911–6920. — DOI: [10.1029/JC092iC07p06911](https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06911).
- Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., *et al.* Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2003. — Vol. 50, no. 3. — P. 317–338. — DOI: [10.1016/S0967-0637\(03\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(03)00018-9).
- Zhang Y., Hong M., Zhang Y., *et al.* Characteristics of Internal Solitary Waves in the Timor Sea Observed by SAR Satellite // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 11. — P. 2878. — DOI: [10.3390/rs15112878](https://doi.org/10.3390/rs15112878).
- Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., *et al.* Monitoring short-period internal waves in the White Sea // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2016. — Vol. 52, no. 9. — P. 951–960. — DOI: [10.1134/S0001433816090309](https://doi.org/10.1134/S0001433816090309).

PROPERTIES OF SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES NEAR SVALBARD FROM SENTINEL-1 SATELLITE DATA

I. E. Kozlov^{*},¹ , T. V. Mikhaylichenko¹ , and L. A. Petrenko¹ 

¹Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**Correspondence to: Igor Kozlov, ik@mhi-ras.ru.

Here we present the results of observations of short-period internal waves (SIWs) in Fram Strait and near Svalbard based on analysis of Sentinel-1 A/B synthetic aperture radar (SAR) data in June–September 2018. Analysis of 1500 spaceborne SAR images allowed to identify 750 surface signatures of SIWs. Maximal number of SIW identifications is observed in August, when both stratification and ice conditions are favorable for SIW generation and identification in satellite data. Background meteorological conditions in summer 2018 favored the northward movement of the ice boundary up to 82,5° N that allowed to observe SIWs over the Yermak Plateau. Four main regions of SIW observations were identified – deep Fram Strait region (depths over 2000 m), southwestern Yermak Plateau with depth range of 500–1500 m, and two shelf break/upper continental slope regions northwest from Svalbard with depths below 500 m. Analysis of spatial properties of SIWs has shown that the study region is dominated by SIW trains with a mean crest length of 15 km and mean packet length of about 5 km. The largest SIW trains with area of nearly 400 km² were observed over the Yermak Plateau where tidal currents are maximal.

Keywords: short-period internal waves, tidal currents, turbulent mixing, sea ice, satellite radar images of the ocean surface, Fram Strait, Svalbard, Yermak Plateau, Arctic Ocean.

Citation: Kozlov, I. E., T. V. Mikhaylichenko, and L. A. Petrenko (2024), Properties of Short-Period Internal Waves Near Svalbard from Sentinel-1 Satellite Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES5008, <https://doi.org/10.2205/2024ES000951>, EDN: RPKMQQ

Received: 13 September 2024

Accepted: 13 November 2024

Published: 12 December 2024



© 2024. The Authors.

References

- Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves // *Nature*. — 1985. — Vol. 314, no. 6008. — P. 245–247. — DOI: [10.1038/314245a0](https://doi.org/10.1038/314245a0).
- Bukatov A. A. Free Short-Period Internal Waves in the Arctic Seas of Russia // *Physical Oceanography*. — 2021. — Vol. 28, no. 6. — DOI: [10.22449/1573-160X-2021-6-599-611](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2021-6-599-611).
- Carr M., Sutherland P., Haase A., *et al.* Laboratory Experiments on Internal Solitary Waves in Ice-Covered Waters // *Geophysical Research Letters*. — 2019. — Vol. 46, no. 21. — P. 12230–12238. — DOI: [10.1029/2019GL084710](https://doi.org/10.1029/2019GL084710).
- D’Asaro E. A., Morison J. H. Internal waves and mixing in the Arctic Ocean // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. — 1992. — Vol. 39, no. 2. — S459–S484. — DOI: [10.1016/s0198-0149\(06\)80016-6](https://doi.org/10.1016/s0198-0149(06)80016-6).
- Fer I., Koenig Z., Kozlov I. E., *et al.* Tidally Forced Lee Waves Drive Turbulent Mixing Along the Arctic Ocean Margins // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — Vol. 47, no. 16. — DOI: [10.1029/2020GL088083](https://doi.org/10.1029/2020GL088083).
- Hattermann T., Isachsen P. E., Appen W.-J. von, *et al.* Eddy-driven recirculation of Atlantic Water in Fram Strait // *Geophysical Research Letters*. — 2016. — Vol. 43, no. 7. — P. 3406–3414. — DOI: [10.1002/2016GL068323](https://doi.org/10.1002/2016GL068323).
- Johannessen J. A., Johannessen O. M., Svendsen E., *et al.* Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1987. — Vol. 92, no. C7. — P. 6754–6772. — DOI: [10.1029/JC092iC07p06754](https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06754).
- Konyaev K. V., Sabinin K. D. Waves inside the ocean. — St. Petersburg : Gidrometeoizdat, 1992.
- Kopyshov I., Kozlov I., Shiryborova A., *et al.* Properties of Short-Period Internal Waves in the Kara Gates Strait Revealed from Spaceborne SAR Data // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2023. — P. 1–11. — DOI: [10.2205/2023ES02SI10](https://doi.org/10.2205/2023ES02SI10).
- Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., *et al.* SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas // 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). — IEEE, 2015a. — P. 947–949. — DOI: [10.1109/IGARSS.2015.7325923](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7325923).

- 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, no. 19. — P. 4948. — DOI: [10.3390/rs14194948](https://doi.org/10.3390/rs14194948).
- Kozlov I. E., Kopyshov I. O., Frey D. I., *et al.* Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 24. — P. 5769. — DOI: [10.3390/rs15245769](https://doi.org/10.3390/rs15245769).
- Kozlov I. E., Krek E. V., Kostianoy A. G., *et al.* Remote Sensing of Ice Conditions in the Southeastern Baltic Sea and in the Curonian Lagoon and Validation of SAR-Based Ice Thickness Products // *Remote Sensing*. — 2020. — Vol. 12, no. 22. — P. 3754. — DOI: [10.3390/rs12223754](https://doi.org/10.3390/rs12223754).
- Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Sandven S. Some results of internal waves study in the Barents Sea using satellite radar data // *Problems of the Arctic and Antarctic*. — 2010. — Vol. 3, no. 86. — P. 60–69.
- Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Zubkova E. V., *et al.* Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite SAR data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2015b. — Vol. 51, no. 9. — P. 1073–1087. — DOI: [10.1134/S0001433815090121](https://doi.org/10.1134/S0001433815090121).
- Kozlov I. E., Mikhaylichenko T. V. Estimation of internal wave phase speed in the Arctic Ocean from sequential spaceborne SAR observations // *Sovremennyye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2021. — Vol. 18, no. 5. — P. 181–192. — DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-5-181-192](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-181-192).
- 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, no. 11. — P. 2047–2051. — DOI: [10.1109/LGRS.2017.2749681](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2749681).
- Magalhaes J. M., Da Silva J. C. B. Internal Solitary Waves in the Andaman Sea: New Insights from SAR Imagery // *Remote Sensing*. — 2018. — Vol. 10, no. 6. — P. 861. — DOI: [10.3390/RS10060861](https://doi.org/10.3390/RS10060861).
- Marchenko A. V., Morozov E. G., Kozlov I. E., *et al.* High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen // *Continental Shelf Research*. — 2021. — Sept. — Vol. 227. — P. 104523. — DOI: [10.1016/j.csr.2021.104523](https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104523).
- Morozov E. G., Marchenko A. V., Filchuk K. V., *et al.* Sea ice evolution and internal wave generation due to a tidal jet in a frozen sea // *Applied Ocean Research*. — 2019. — Vol. 87. — P. 179–191. — DOI: [10.1016/j.apor.2019.03.024](https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.03.024).
- Morozov E. G., Pisarev S. V. Internal waves and polynya formation in the Laptev Sea // *Doklady Akademii Nauk*. — 2004. — Vol. 398, no. 2. — P. 255–258.
- 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, no. C3. — P. 4769–4782. — DOI: [10.1029/90JC02260](https://doi.org/10.1029/90JC02260).
- Petrenko L. A., Kozlov I. E. Variability of the Marginal Ice Zone and Eddy Generation in Fram Strait and near Svalbard in Summer Based on Satellite Radar Observations // *Physical Oceanography*. — 2023. — Vol. 30, no. 5. — P. 594–611.
- Petrusevich V. Y., Dmitrenko I. A., Kozlov I. E., *et al.* Tidally-generated internal waves in Southeast Hudson Bay // *Continental Shelf Research*. — 2018. — Vol. 167. — P. 65–76. — DOI: [10.1016/j.csr.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.08.002).
- Plueddemann A. J. Internal wave observations from the Arctic environmental drifting buoy // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1992. — Vol. 97, no. C8. — P. 12619–12638. — DOI: [10.1029/92JC01098](https://doi.org/10.1029/92JC01098).
- Review of hydrometeorological processes in the Arctic Ocean. III quarter of 2018 (Quarterly information bulletin) / ed. by I. E. Frolov. — St. Petersburg : AARI, 2018.
- Rippeth T. P., Lincoln B. J., Lenn Y.-D., *et al.* Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography // *Nature Geoscience*. — 2015. — Vol. 8, no. 3. — P. 191–194. — DOI: [10.1038/ngeo2350](https://doi.org/10.1038/ngeo2350).
- Rippeth T. P., Vlasenko V., Stashchuk N., *et al.* Tidal Conversion and Mixing Poleward of the Critical Latitude (an Arctic Case Study) // *Geophysical Research Letters*. — 2017. — Vol. 44, no. 24. — DOI: [10.1002/2017GL075310](https://doi.org/10.1002/2017GL075310).
- Sandven S., Johannessen O. M. High-frequency internal wave observations in the marginal ice zone // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1987. — Vol. 92, no. C7. — P. 6911–6920. — DOI: [10.1029/JC092iC07p06911](https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06911).
- Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., *et al.* Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2003. — Vol. 50, no. 3. — P. 317–338. — DOI: [10.1016/S0967-0637\(03\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(03)00018-9).
- Zhang Y., Hong M., Zhang Y., *et al.* Characteristics of Internal Solitary Waves in the Timor Sea Observed by SAR Satellite // *Remote Sensing*. — 2023. — Vol. 15, no. 11. — P. 2878. — DOI: [10.3390/rs15112878](https://doi.org/10.3390/rs15112878).
- Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., *et al.* Monitoring short-period internal waves in the White Sea // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2016. — Vol. 52, no. 9. — P. 951–960. — DOI: [10.1134/S0001433816090309](https://doi.org/10.1134/S0001433816090309).
- Zubkova E. V., Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N. Characteristics of short-period internal waves in the Greenland Sea based on satellite radar observations // *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. — 2016. — Vol. 45.