

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ИНДООКЕАНСКОГО СЕКТОРА ЮЖНОГО ОКЕАНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ SENTINEL-1

Я. И. Бакуева^{*1}, И. Е. Козлов¹ и И. П. Медведев²

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Российская Федерация

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Российская Федерация

* **Контакт:** Яна Игоревна Бакуева, yasyalegupova@gmail.com

Аннотация: В настоящей работе представлены результаты анализа характеристик поля короткопериодных внутренних волн (КВВ) в акватории моря Содружества, а также в глубоководной части Южного океана по данным спутниковых измерений Sentinel-1 А/В с января по март 2020 г. Определены ключевые районы генерации и пространственно-временные характеристики КВВ. На основе анализа 611 радиолокационных изображений выделено 825 поверхностных проявлений КВВ. Внутренние волны наблюдались в виде пакетов уединённых волн со средней длиной гребня лидирующих волн 24 км и средней шириной пакета 11 км. Направление распространения пакетов КВВ было разнообразным с доминированием пакетов северо-восточного направления. Ключевые районы наблюдения КВВ, определяемые их максимальной повторяемостью, зарегистрированы в заливе Прюдс, над континентальным склоном, а также в глубоководной восточной и западной частях акватории. Показано, что активная генерация КВВ происходит не только в районах взаимодействия приливных течений с неоднородной топографией морского дна, но также и в районах с высокими аномалиями скорости геострофических течений, вблизи шельфовых ледников и границ прикромочной ледовой зоны.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, приливные течения, геострофические течения, шельфовые ледники, прикромочная ледовая зона, спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой, Sentinel-1, залив Прюдс, Антарктическое циркумполярное течение, море Содружества, Южный океан

Цитирование: Бакуева Я. И., Козлов И. Е. и Медведев И. П. Характеристики короткопериодных внутренних волн в центральной части индooкеанского сектора Южного океана по спутниковым данным Sentinel-1 // Russian Journal of Earth Sciences. — 2026. — Т. 26. — ES1019. — DOI: 10.2205/2026es001062 — EDN: AOVWJC

1. Введение

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) играют важную роль в энергетическом балансе океана [Kunze, 2017], подводной навигации [Osborne et al., 1978], морской биологии [Ma et al., 2023], осадконакоплении [Horne et al., 2019], акустике и оптике океана [Woodson, 2018]. Поскольку внутренние волны являются основным звеном в процессах диссипации энергии в океане, определение источников их генерации и дальнейшей эволюции имеет важное значение для оценки роли океана в глобальном климате [Fer et al., 2020; Waterman et al., 2021; Whalen et al., 2020].

Одним из ключевых факторов, способствующих генерации КВВ на шельфе, является взаимодействие баротропных приливов с неровностями морского дна [Коняев и Сабинин, 1992]. Также КВВ могут генерироваться на приповерхностных фронтах в связи с фронтогенезом [Cyriac et al., 2023; Nikurashin and Ferrari, 2010; Silvano et al., 2023; Waterman et al., 2021]. В полярных районах Мирового океана образование КВВ в слое неглубокого сезонного пикноклина также может быть вызвано динамикой морского льда и движением шельфовых ледников [Cusack et al., 2023; McPhee and Kantha, 1989].

RESEARCH ARTICLE

<https://elibrary.ru/AOVWJC>

Получено: 23 февраля 2025 г.

Принято: 15 сентября 2025 г.

Опубликовано: 24 апреля 2026 г.



© 2026. Коллектив авторов.

Спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) являются эффективным инструментом исследования различных динамических процессов в верхнем слое океана [Petrenko and Kozlov, 2023; Plotnikov et al., 2024], включая обнаружение очагов генерации КВВ, определение их пространственных и кинематических характеристик [Бакуева и Козлов, 2022; Бондур и др., 2006; Козлов и др., 2024; Jackson et al., 2013].

Район исследований ограничен координатами 58–70° ю. ш. и 60–90° в. д., и охватывает акваторию моря Содружества восточнее 60° в. д., западную часть моря Дейвиса в районе шельфового ледника Западный и глубоководную часть Южного океана до 58° ю. ш. Циркуляция вод в районе исследований определяется направленными на запад Антарктическим Склоновым течением (АСТ) и вдольбереговым Антарктическим Прибрежным течением (АПТ), а также направленными на восток северной и южной струями Южного фронта АЦТ (ЮФАЦТ-с и ЮФАЦТ-ю, соответственно). Кроме этого, на широтах 63–65° ю. ш. проходит Южная граница АЦТ (ЮГАЦТ), имеющая отличающиеся гидрологические свойства и также влияющая на циркуляцию в акватории [Sokolov and Rintoul, 2009]. Море Содружества является одним из шести значимых районов-источников плотных шельфовых вод, участвующих в образовании Антарктических донных вод Южного океана [Федотова и др., 2020]. Кроме того, шельфовая область моря Содружества практически всегда открыта ото льда в тёплый период года. Акватория выбранного района характеризуется наличием постоянных зон интенсивных геострофических течений (в связи с непосредственной близостью к ЮФАЦТ-ю, имеющей большое количество участвующих в генерации КВВ меандров) в глубоководной части. До настоящего времени исследований внутренних приливов и КВВ на акватории моря Содружества не проводилось за исключением акватории находящегося севернее плато Кергелен и его протяжённых склонов.

Таким образом, главной целью данной работы является выявление ключевых зон генерации и анализ пространственно-временных характеристик короткопериодных внутренних волн в выбранной акватории на основе анализа данных спутниковых РСА Sentinel-1A/B за январь–март 2020 г., а также качественный анализ механизмов генерации наблюдаемых волн на основе привлечения дополнительной информации о топографии морского дна и полях геострофических и приливных течений.

2. Данные и методы

Анализ пространственно-временных характеристик поля КВВ в Южном океане проводился на основе обработки спутниковых радиолокационных изображений Sentinel-1 A/B, полученных при различной поляризации РСА-сигнала. В работе использованы продукты L1 Ground Range Detected, имеющие пространственное разрешение 93×87 м в режиме съёмки Extra Wide Swath среднего разрешения и 20×20 м в режиме Interferometric Wide Swath высокого разрешения, соответственно. Спутниковые РЛИ были получены из архивов системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>).

На рис. 1 представлена карта расположения основных элементов циркуляции океана южнее плато Кергелен, составленная на основе исследования [Клепиков и Антимова, 2014; Bestley et al., 2020]: Антарктическое склоновое течение (АСТ), северная и южная ветви Южного фронта АЦТ (ЮФАЦТ-с и ЮФАЦТ-ю, соответственно), круговорот в заливе Прюдс. Фон отображает батиметрию [Dorschel et al., 2022]. На рис. 2 отображена карта покрытия данными Sentinel-1 района исследований. Как видно из карты, акватория покрыта не совсем равномерно. Большинство РЛИ приходится на центральную и восточные части района – от 20 до 30 РЛИ на единицу площади морской поверхности, а западнее 70° в. д. покрытие уменьшается до 2–15 РЛИ на единицу площади морской поверхности. Стоит также отметить практически полное отсутствие РСА-данных для северо-западной части региона, что, по-видимому, связано с особенностями выполнения РСА-съёмки над данным районом.

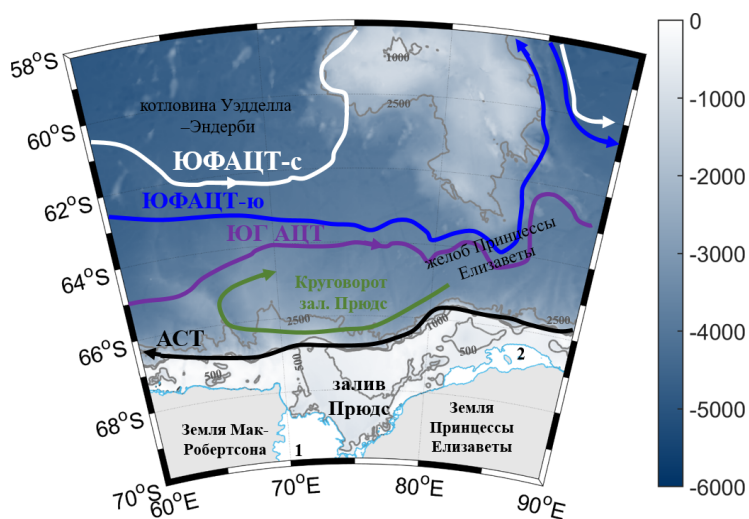


Рис. 1. Карта района исследования с обозначенными схемой основных течений и положениями струй по [Клепиков и Антипов, 2014; Bestley et al., 2020]. Батиметрия по [Dorschel et al., 2022]. Цифрами обозначены: 1 – шельфовый ледник Эймери, 2 – шельфовый ледник Западный.

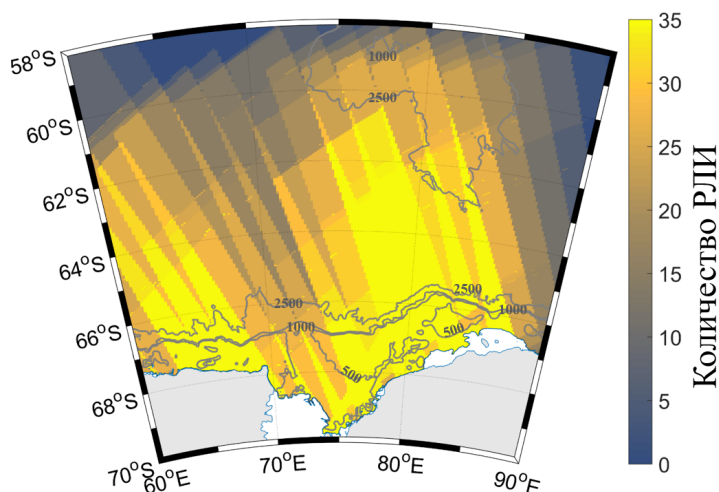


Рис. 2. Карта покрытия акватории моря Содружества РСА-данными Sentinel-1A/B за январь–март 2020 г.

Процедура анализа РСА-изображений проводилась с помощью программного обеспечения Европейского космического агентства SNAP (Sentinel Application Platform) (<https://step.esa.int>). Это ПО позволяет выполнять предварительную обработку и визуализацию РЛИ, выбирать интересующую часть изображения, проводить сечение через пакет КВВ и определять их основные характеристики – длину фронта лидирующей волны и длину волнового пакета [Бакуева и Козлов, 2022]. Обработка результатов анализа и построение карт пространственного распределения различных характеристик КВВ проводились в среде MATLAB в соответствии с методикой, описанной в работах [Kozlov et al., 2015; Kozlov et al., 2022]. Среднее значение для каждого параметра КВВ определялось на сетке размером 50×160 ячеек. При построении гистограмм распределения различных параметров КВВ и фоновых характеристик среды их значения определялись для каждого волнового пакета.

Для анализа возможных механизмов генерации КВВ дополнительно использовались данные о полях приливных течений из приливной модели TPXO9-atlas-v5 (<https://www.tpxo.net/global/tpxo9-atlas>), полях геострофических течений AVISO+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>), а также батиметрические данные IBCSO v.2 [Dorschel et al., 2022].

3. Результаты

Обработка массива из 611 спутниковых радиолокационных изображений за январь–март 2020 г. позволила идентифицировать 825 поверхностных проявлений КВВ. В подавляющем большинстве случаев КВВ визуализировались на РЛИ в виде пакетов из 4–5 уединённых волн, демонстрирующих характерное сжатие фазовых интервалов к тыловой части пакета, в то время как единичные волновые образования регистрировались лишь в 1% наблюдений. На ряде РЛИ зафиксированы последовательные волновые пакеты, потенциально генерируемые из единого источника.

На рис. 3 представлен увеличенный фрагмент РЛИ Sentinel-1A от 27.01.2020, охватывающий акваторию залива Прюдс (море Содружества) в условиях открытой воды, обрамлённой прикромочной ледовой зоной (ПЛЗ). На фрагменте РЛИ в нижнем правом секторе (рис. 3а) видно положение шельфового ледника Западный. Характерное проявление КВВ, представляющее ключевой интерес, демонстрируется на рис. 3б.

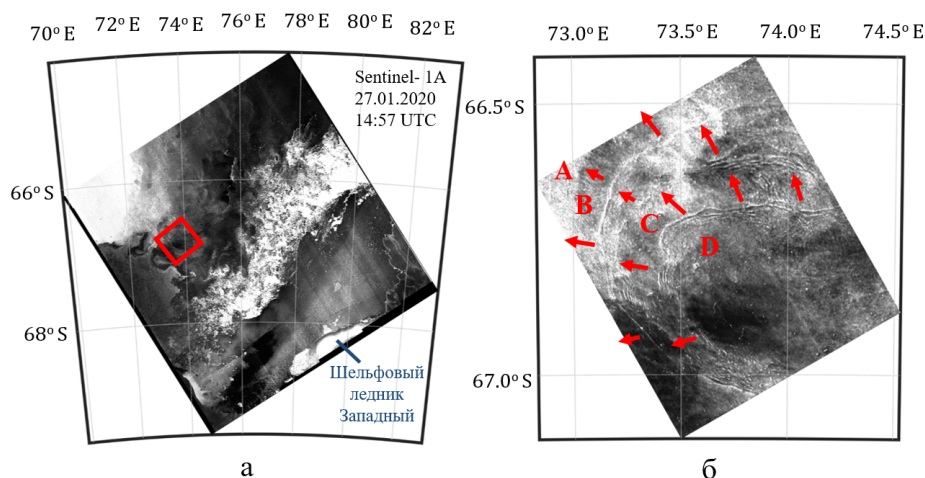


Рис. 3. Поверхностные проявления КВВ в акватории залива Прюдс моря Содружества на увеличенном фрагменте РЛИ Sentinel-1A от 27.01.2020 14:57 UTC.

Анализ структуры проявлений КВВ на этом РЛИ позволяет выделить четыре последовательных пакета внутренних волн концентрической формы (обозначены А, В, С, D), расположенных на расстояниях 2,4 км (АВ), 1,7 км (BC) и 2,4 км (CD) и направленных на северо-запад. Наиболее выраженными являются пакеты В и D, состоящие примерно из 6–8 солитонов с длиной фронта лидирующей волны около 46 км и 30 км соответственно. Как было сказано выше, в описании фрагмента РЛИ над акваторией моря Содружества, в связи с нелинейностью КВВ максимальная длина волны в пакете соответствует лидирующей волне и изменяется вдоль её фронта в пределах 500–700 м. Наибольшим по своим размерам пакетом КВВ на данном РЛИ представляется пакет А, частично попадающий в выделенный фрагмент, с длиной фронта лидирующей волны около 56 км. Общность направлений распространения и геометрии всех пакетов свидетельствует о едином источнике их генерации.

На рис. 4 представлено пространственное распределение положения фронтов лидирующих волн всех выделенных в ходе исследования пакетов КВВ. Наибольшее количество пакетов наблюдалось в марте – 470 ПП КВВ, наименьшее в январе – 127 ПП КВВ, в феврале зарегистрировано 228 пакетов КВВ. Сезонное смещение максимальной активности ПП КВВ к марту объясняется более благоприятным гидрологическим режимом в акватории, усилением стратификации из-за летнего таяния льдов и изменением режима ветрового воздействия на ПЛЗ. Если в январе–феврале преобладает шельфовая и склоновая локализация, часто в непосредственной близости к участкам ПЛЗ, то в марте доминируют глубоководные проявления, включая юго-восточный склон плато Кергелен.

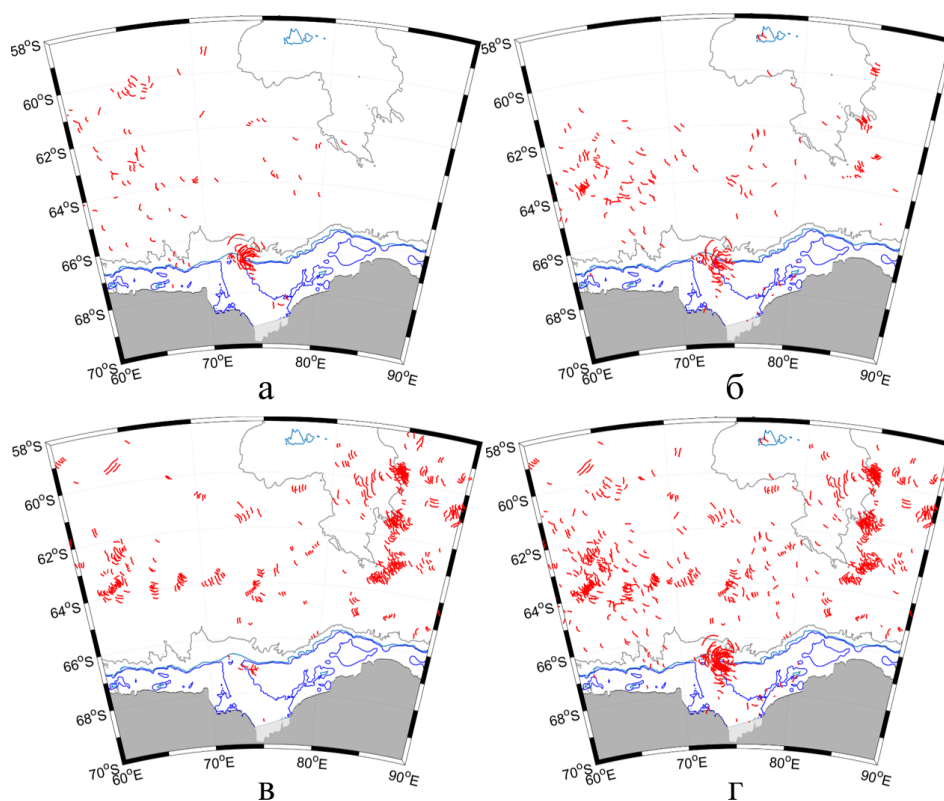


Рис. 4. Пространственное распределение фронтов лидирующих волн в акватории моря Содружества по данным Sentinel-1: (а) январь; (б) февраль; (в) март; (г) январь–март. На карты нанесены изобаты 500 м, 1000 м и 2500 м.

После обработки всех РЛИ на сетке размером 160×50 узлов были построены итоговые карты пространственного распределения различных характеристик КВВ. На рис. 5а показана карта пространственного распределения суммарного количества пакетов КВВ за разные месяцы 2020 г. Наибольшее количество проявлений КВВ сосредоточено на шельфе залива Прюдс (в среднем от 6 до 10 ПП КВВ), в глубоководной части акватории (в основном, севернее 64° ю. ш.), а также с подветренной стороны материкового склона южной части плато Кергелен (северо-восточная область выбранного района). Относительно небольшое количество наблюдений КВВ севернее 60° ю. ш. вызвано низким количеством РЛИ в данной области. В целом, можно отметить крайне неравномерное распределение ПП КВВ по акватории, от областей с их малым количеством в центре района, до локальных пиков, где суммарное количество ПП КВВ достигало 96 в феврале, 56 – в январе и 62 – в марте.

На рис. 5б показаны карты пространственного распределения повторяемости внутренних волн на РЛИ района исследований, рассчитанного в виде отношения общего количества зарегистрированных ПП КВВ в заданном квадрате моря (рис. 5а) к количеству РСА-съёмок данного квадрата (рис. 2). Исходя из карт можно определить видимые различия в пространственном распределении повторяемости КВВ. Так, пакеты КВВ, как правило, имели высокую повторяемость (более 2 ПП КВВ/РЛИ) над континентальным склоном в северной части залива Прюдс, восточной и западной частях акватории. Максимальные значения повторяемости КВВ за весь период наблюдений были зафиксированы в марте (11 ПП КВВ/РЛИ), наименьшие в январе – 3 ПП КВВ/РЛИ. В феврале значение максимальной повторяемости равно 6 ПП КВВ/РЛИ. Согласно батиметрическим данным в некоторых из этих районов отсутствуют выраженные неоднородности рельефа, поэтому вполне вероятно, что генерация КВВ в этих районах вызвана не приливным механизмом, а передачей энергии от АЦТ к отходящим

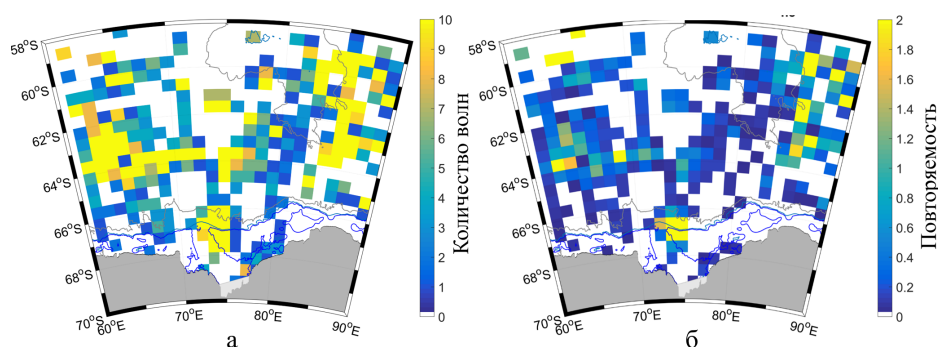


Рис. 5. Карты пространственного распределения: (а) общего количества зарегистрированных пакетов КВВ и (б) повторяемости КВВ в заданном квадрате моря в январе–марте 2020 г.; на карты нанесены изобаты 500 м, 1000 м и 2500 м.

струям [Cusack *et al.*, 2020]. Концентрация пакетов КВВ в прибровочной зоне канала Прюдс (изобата 500 м) свидетельствует о ключевом влиянии двух факторов на генерацию КВВ: гравитационное сползание плотных вод (наклон дна ($5\text{--}15^\circ$) способствует формированию придонных плотностных потоков, создающих условия для генерации внутренних волн типа «lee waves») и компенсационный апвеллинг (вертикальные скорости приводят к возмущению пикноклина, что также способствует генерации КВВ).

Для более детального изучения внутриволнового поля в данном районе были рассчитаны пространственные характеристики ПП КВВ – длина гребня лидирующей волны, длина волнового пакета (расстояние от первой волны до последней в пакете) и направление распространения пакетов КВВ. Результаты анализа первых двух параметров показаны на рис. 6.

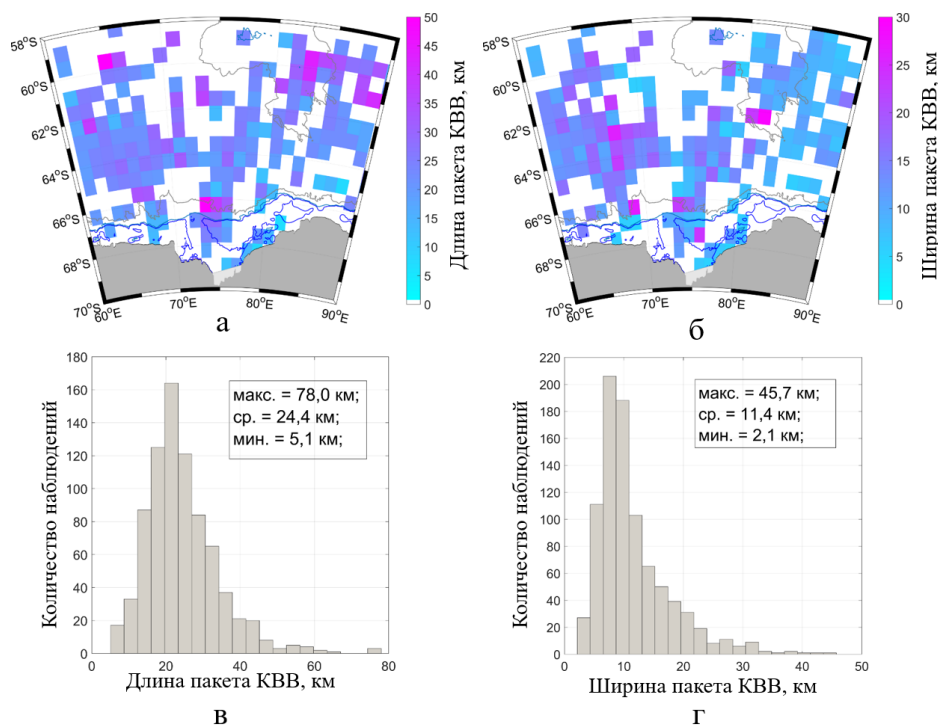


Рис. 6. Карты (а, б) и гистограммы (в, г) распределения длины фронта лидирующей волны (а, в) и длины пакетов (б, г) внутренних волн. На карты нанесены изобаты 500 м, 1000 м и 2500 м.

В основном на акватории наблюдались цуги КВВ из 4–5 уединённых волн с длиной фронта лидирующей волны около 18–26 км (при общем диапазоне от 5 км до 78 км) и средней длиной волны у лидирующей волны 1,2 км (при общем диапазоне от 0,1 до 3,5 км). Наиболее крупные пакеты внутренних волн фиксировались над бровкой шельфа в северной части залива Прюдс, вблизи материкового склона южной части плато Кергелен (восточная область акватории), а также в западной части акватории над открытой водой.

Диапазон значений длины волновых пакетов составил 2–55 км со средним значением около 11 км. Наиболее протяжённые пакеты фиксировались над материковым склоном в северной части залива Прюдс и на южной стороне континентального склона плато Кергелен. Площадь волновых пакетов в этих районах достигала 1000 км² и более.

Более короткие цуги КВВ (<6 км) встречались в основном вблизи прикромочной ледовой зоны и в северо-восточной части акватории. В районах, где КВВ имели наибольшую повторяемость, их пространственные параметры имели средние значения.

На рис. 7 представлена карта и гистограмма распределения направлений распространения КВВ. Как видно из рисунка, направления распространения КВВ на акватории моря достаточно разнообразны, но в целом преобладает северо-восточное направление. В районе материкового склона южной части плато Кергелен пакеты КВВ направлены преимущественно на восток-северо-восток (наиболее ярко выражено в январе и феврале 2020 г.), в то время как с подветренной стороны материкового склона ориентация пакетов меняется на север-северо-восток. Над материковым склоном в северной части залива Прюдс ПП КВВ направлены на север-северо-запад в сторону глубоководной части акватории. В западной части акватории, над глубоководной частью района, пакеты КВВ распространялись преимущественно на восток, иногда меняя ориентацию с северной на южную.

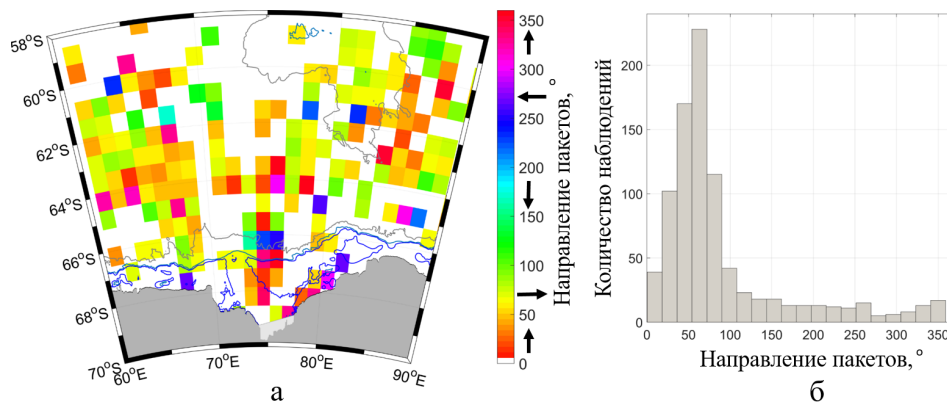


Рис. 7. Карта (а) и гистограмма (б) распределения направлений пакетов КВВ на спутниковых РЛИ в январе–марте 2020 г.; на карту нанесены изобаты 500 м, 1000 м и 2500 м.

В ходе дальнейшей работы был выполнен предварительный анализ возможных механизмов генерации наблюдаемых КВВ. На рис. 8 представлены карты и гистограммы распределения значений безразмерного уклона дна (рис. 8а,б), скорости приливных течений для лунной полусуточной компоненты M_2 (рис. 8в,г) и аномалий скорости геострофических течений (рис. 8г,д).

Высокие значения безразмерного уклона дна (>0.1) определены в местах значительных топографических неровностей, таких как склоны южной части плато Кергелен (рис. 8а). Полусуточный прилив имеет максимальные скорости до 0,15–0,2 м/с примерно в этих же районах (рис. 8в). Таким образом, взаимодействие приливных течений с неровной топографией является, по-видимому, основной причиной генерации КВВ в этих районах, когда образование волновых пакетов происходит по типу запрятственных волн (англ. lee wave generation) раз за приливной цикл [Jackson et al., 2012] или в транскритическом режиме несколько раз за приливной цикл [Silva and Helfrich, 2008].

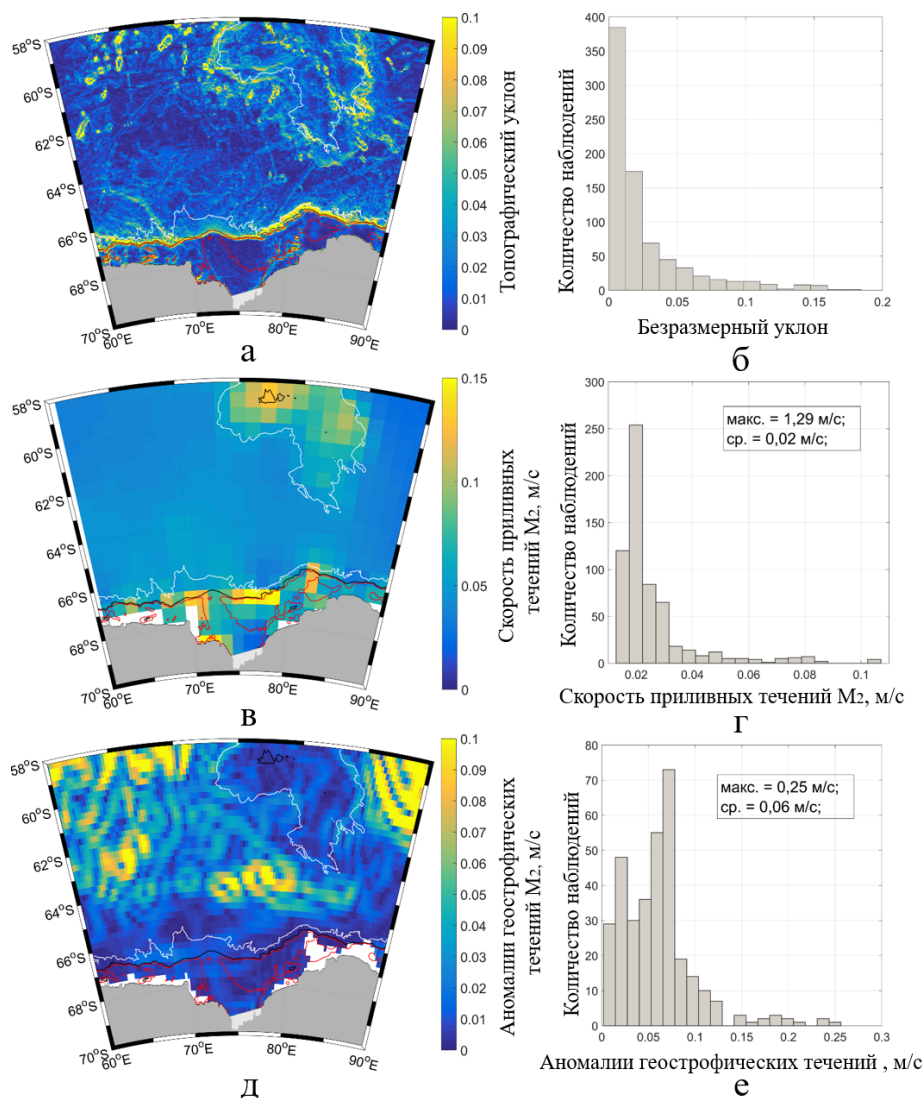


Рис. 8. Карты (а, в, д) и гистограммы (б, г, е) распределения безразмерного уклона морского дна (а, б), скорости приливных течений M_2 (в, г) и аномалий скорости геострофических течений (д, е) в январе–марте 2020 г. На карты нанесены изобаты 500 м, 1000 м и 2500 м.

Карта аномалий скорости геострофических течений показывает сложную структуру поля течений с высокими значениями скорости ($>0,1$ м/с) над глубоководной частью акватории на существенном расстоянии от поднятий и неровностей топографии дна в разных районах моря (рис. 8д), что указывает на возможный механизм генерации через баротропную неустойчивость Кергеленского меандра АЦГ. Таким образом, в первом приближении можно заключить, что образование большого количества пакетов КВВ в глубоководных районах западной и центральной частей акватории, по-видимому, вызвано возмущениями пикноклина под воздействием неоднородных течений [Cyriac et al., 2023; Waterman et al., 2021]. В то же время причинами генерации КВВ в непосредственной близости от шельфовых ледников (шельфовый ледник Эймери, Западный шельфовый ледник) могут быть разрушение айсбергов [Meredith et al., 2022] или выход на поверхность турбулентных плюмов, образующихся при таянии ледника на его нижней границе [Cusack et al., 2023].

4. Заключение

В данной работе впервые на основе анализа спутниковых РСА-данных Sentinel-1 A/B в период с января по март 2020 г. выполнено исследование характеристик поля КВВ в акватории моря Содружества, западной части моря Дейвиса в районе шельфового ледника Западный, а также в глубоководной части Южного океана до 58° ю. ш. Анализ 611 РЛИ позволил выделить 825 пакетов КВВ, определить основные районы их генерации и построить карты основных пространственных характеристик внутренних волн.

Как правило, КВВ наблюдались в виде пакетов уединённых волн со средней длиной гребня лидирующей волны около 18–26 км и средней длиной пакета около 11 км (большинство значений находится в пределах 10–25 км. Направление распространения пакетов КВВ на акватории моря достаточно разнообразно, но преобладают северо-восточные направления пакетов.

Наибольшее количество проявлений КВВ было сосредоточено на шельфе залива Прюдс (в среднем от 6 до 10 ПП КВВ), в глубоководной части акватории (в основном, севернее 64° ю. ш.), а также с подветренной стороны материкового склона южной части плато Кергелен (северо-восточная область выбранного района).

Ключевые районы наблюдения внутренних волн, определяемые их максимальной повторяемостью, зарегистрированы над континентальным склоном в северной части залива Прюдс, восточной и западной частях акватории. Механизмы генерации КВВ в этих районах различны. Согласно батиметрическим данным в северо-западной части акватории отсутствуют выраженные неоднородности рельефа, поэтому вполне вероятно, что многочисленные пакеты КВВ, наблюдаемые в глубоководных районах западной и центральной частей акватории, по-видимому, связаны с существенными неоднородностями в поле геострофических течений.

Причиной генерации пакетов КВВ в шельфовых районах залива Прюдс и в районе юго-восточного склона плато Кергелен является взаимодействие приливных течений с неровной топографией, а источником генерации КВВ, наблюдавшихся в непосредственной близости от шельфовых ледников (шельфовый ледник Эймери, Западный шельфовый ледник) может быть откалывание айсбергов или выход на поверхность турбулентных плюмов, образующихся при таянии ледника на его нижней границе.

В дальнейшем планируется анализ кинематических характеристик КВВ на основе использования последовательных РСА-измерений (см., например, [Козлов и Михайличенко, 2021]), а также анализ вертикальной структуры наблюдаемых волн и механизмов их генерации на основе привлечения данных контактных измерений.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ РАН FNNN-2024-0017. Анализ приливных течений выполнен в рамках госзадания ИО РАН FMWE-2024-0018.

Список литературы

- Бакуева Я. И. и Козлов И. Е. Характеристики короткопериодных внутренних волн в Южном океане по данным спутниковых РСА Sentinel 1A/B // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — Т. 19, № 2. — С. 201–211. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-201-211>.
- Бондур В. Г., Морозов Е. Г., Бельчанский Г. И. и др. Радиолокационная съемка и численное моделирование внутренних приливных волн в шельфовой зоне // Исследование Земли из Космоса. — 2006. — № 2. — С. 51–63.
- Клепиков А. В. и Антипов Н. Н. Особенности формирования и распространения водных масс на шельфе и материковом склоне вокруг Антарктиды // Лёд и снег. — 2014. — Т. 54, № 4. — С. 81–94.
- Козлов И. Е. и 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. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-181-192>.
- Козлов И. Е., Михайличенко Т. В. и Петренко Л. А. Характеристики короткопериодных внутренних волн в районе архипелага Шпицберген по спутниковым данным Sentinel-1 // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES5008. — <https://doi.org/10.2205/2024es000951>.

- Коняев К. В. и Сабинин К. Д. Волны внутри океана. — СПб. : Гидрометеоздат, 1992. — 272 с.
- Федотова А. А., Демидов А. Н. и Артамонова К. В. Водные массы моря Содружества // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2020. — № 1. — С. 105–113.
- Bestley S., Wijk E. van, Rosenberg M., et al. Ocean circulation and frontal structure near the southern Kerguelen Plateau: The physical context for the Kerguelen Axis ecosystem study // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. — 2020. — Vol. 174. — <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.07.013>.
- Cusack J. M., Brearley J. A. and others A. C. Naveira Garabato. Observed Eddy-Internal Wave Interactions in the Southern Ocean // Journal of Physical Oceanography. — 2020. — Vol. 50, no. 10. — P. 3043–3062. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-20-0001.1>.
- Cusack J. M., Jackson R. H., Nash J. D., et al. Internal Gravity Waves Generated by Subglacial Discharge: Implications for Tidewater Glacier Melt // Geophysical Research Letters. — 2023. — Vol. 50, no. 12. — <https://doi.org/10.1029/2022gl1102426>.
- Cyriac A., Meyer A., Phillips H. E., et al. Observations of Internal Wave Interactions in a Southern Ocean Standing Meander // Journal of Physical Oceanography. — 2023. — Vol. 53, no. 8. — P. 1997–2011. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-22-0157.1>.
- Dorschel B., Hehemann L., Viquerat S., et al. The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean Version 2 // Scientific Data. — 2022. — Vol. 9, no. 1. — <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01366-7>.
- 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. — <https://doi.org/10.1029/2020gl088083>.
- Horne E., Beckebanze F., Micard D., et al. Particle transport induced by internal wave beam streaming in lateral boundary layers // Journal of Fluid Mechanics. — 2019. — Vol. 870. — P. 848–869. — <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.251>.
- Jackson C. R., Silva J. C. B. da and Jeans G. The Generation of Nonlinear Internal Waves // Oceanography. — 2012. — Vol. 25, no. 2. — P. 108–123. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.46>.
- Jackson C. R., Silva J. C. B. da, Jeans G., et al. Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery // Oceanography. — 2013. — Vol. 26, no. 2. — P. 68–79. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.32>.
- Kozlov I., Kudryavtsev V., 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. — 2015. — Vol. 51, no. 9. — P. 1073–1087. — <https://doi.org/10.1134/s0001433815090121>.
- Kozlov I. E., Atadzhanova O. A. and 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. — <https://doi.org/10.3390/rs14194948>.
- Kunze E. Internal-Wave-Driven Mixing: Global Geography and Budgets // Journal of Physical Oceanography. — 2017. — Vol. 47, no. 6. — P. 1325–1345. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-16-0141.1>.
- Ma L., Bai X., Laws E. A., et al. Responses of Phytoplankton Communities to Internal Waves in Oligotrophic Oceans // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2023. — Vol. 128, no. 10. — e2023JC020201. — <https://doi.org/10.1029/2023JC020201>.
- McPhee M. G. and Kantha L. H. Generation of internal waves by sea ice // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 1989. — Vol. 94, no. C3. — P. 3287–3302. — <https://doi.org/10.1029/jc094ic03p03287>.
- Meredith M. P., Inall M. E., Brearley J. A., et al. Internal tsunamigenesis and ocean mixing driven by glacier calving in Antarctica // Science Advances. — 2022. — Vol. 8, no. 47. — <https://doi.org/10.1126/sciadv.add0720>.
- Nikurashin M. and Ferrari R. Radiation and Dissipation of Internal Waves Generated by Geostrophic Motions Impinging on Small-Scale Topography: Theory // Journal of Physical Oceanography. — 2010. — Vol. 40, no. 5. — P. 1055–1074. — <https://doi.org/10.1175/2009jpo4199.1>.
- Osborne A. R., Burch T. L. and Scarlet R. I. The Influence of Internal Waves on Deep-Water Drilling // Journal of Petroleum Technology. — 1978. — Vol. 30, no. 10. — P. 1497–1504. — <https://doi.org/10.2118/6913-pa>.
- Petrenko L. A. and 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.
- Plotnikov E. V., Kozlov I. E., Zhuk E. V., et al. Evaluation of Sea Ice Drift in the Arctic Marginal Ice Zone based on Sentinel-1A/B Satellite Radar Measurements // Physical Oceanography. — 2024. — Vol. 31, no. 2. — P. 284–294.
- Silva J. C. B. da and Helfrich K. R. Synthetic Aperture Radar observations of resonantly generated internal solitary waves at Race Point Channel (Cape Cod) // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2008. — Vol. 113, no. C11. — <https://doi.org/10.1029/2008jc005004>.

- Silvano A., Purkey S., Gordon A. L., et al. Observing Antarctic Bottom Water in the Southern Ocean // *Frontiers in Marine Science*. — 2023. — Vol. 10. — P. 1221701. — <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1221701>.
- Sokolov S. and Rintoul S. R. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 1. Mean circumpolar paths // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2009. — Vol. 114, no. C11. — <https://doi.org/10.1029/2008jc005108>.
- Waterman S., Meyer A., Polzin K. L., et al. Antarctic Circumpolar Current Impacts on Internal Wave Life Cycles // *Geophysical Research Letters*. — 2021. — Vol. 48, no. 8. — <https://doi.org/10.1029/2020gl089471>.
- Whalen C. B., Lavergne C. de, Naveira Garabato A. C., et al. Internal wave-driven mixing: governing processes and consequences for climate // *Nature Reviews Earth & Environment*. — 2020. — Vol. 1, no. 11. — P. 606–621. — <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0097-z>.
- Woodson C. B. The Fate and Impact of Internal Waves in Nearshore Ecosystems // *Annual Review of Marine Science*. — 2018. — Vol. 10, no. 1. — P. 421–441. — <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063619>.

PROPERTIES OF SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES IN THE CENTRAL PART OF THE SOUTHERN OCEAN INDO-OCEANIC SECTOR BASED ON SENTINEL-1 SATELLITE DATA

Y. I. Bakueva^{**1}, I. E. Kozlov¹, and I. P. Medvedev²

¹Marine Hydrophysical Institute of Russian Academy of Science, Sevastopol, Russian Federation

²Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

****Correspondence to:** Yana Bakueva, yasya1egupova@gmail.com

Abstract: Here we present the results of observations of short-period internal waves (SIWs) and their properties in the Commonwealth Sea and in the deep-water part of the Southern Ocean based on Sentinel-1 A/B satellite data from January to March 2020. The key generation sites and spatiotemporal properties of SIWs were identified. Analysis of 611 radar images allowed to detect 825 surface manifestations (SMs) of SIWs. The SIWs were observed as packets of solitary waves with a mean crest length of 24 km and an average packet width of 11 km. Key regions of internal wave observations, determined by their maximum probability, were recorded in Prydz Bay, over the continental slope and in the deep-water eastern and western parts of the study region. It is shown that active SIW generation occurs not only in the regions of tidal current-topography interactions, but also in regions with high anomalies of geostrophic current velocity, in the vicinity of ice shelves and marginal ice zone boundaries.

Keywords: Short-period internal waves, tidal currents, geostrophic currents, ice shelves, marginal ice zone, spaceborne synthetic aperture radars, Sentinel-1, Prydz Bay, Antarctic Circumpolar Current, Cooperation Sea, Southern Ocean

RESEARCH ARTICLE

Received: February 23, 2025

Accepted: September 15, 2025

Published: April 24, 2026



© 2026. The Authors.

Citation: Bakueva Y. I., Kozlov I. E., and Medvedev I. P. (2026), Properties of Short-Period Internal Waves in the Central Part of the Southern Ocean Indo-Oceanic Sector Based on Sentinel-1 Satellite Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 26, ES1019, <https://doi.org/10.2205/2026ES001062>, EDN: AOVWJC

References

- Bakueva Ya. I. and Kozlov I. E. Characteristics of short-period internal waves in the Southern ocean inferred from Sentinel-1A/B SAR satellite data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2022. — Vol. 19, no. 2. — P. 201–211. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-201-211>. — (In Russian).
- Bestley S., Wijk E. van, Rosenberg M., et al. Ocean circulation and frontal structure near the southern Kerguelen Plateau: The physical context for the Kerguelen Axis ecosystem study // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. — 2020. — Vol. 174. — <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.07.013>.
- Bondur V. G., Morozov E. G., Belchansky G. I., et al. Radar imaging and numerical simulation of internal tidal waves nearby U.S. North-Eastern coast // *Earth Research from Space*. — 2006. — No. 2. — P. 51–63. — (In Russian).
- Cusack J. M., Brearley J. A. and others A. C. Naveira Garabato. Observed Eddy-Internal Wave Interactions in the Southern Ocean // *Journal of Physical Oceanography*. — 2020. — Vol. 50, no. 10. — P. 3043–3062. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-20-0001.1>.
- Cusack J. M., Jackson R. H., Nash J. D., et al. Internal Gravity Waves Generated by Subglacial Discharge: Implications for Tidewater Glacier Melt // *Geophysical Research Letters*. — 2023. — Vol. 50, no. 12. — <https://doi.org/10.1029/2022gl102426>.

- Cyriac A., Meyer A., Phillips H. E., et al. Observations of Internal Wave Interactions in a Southern Ocean Standing Meander // *Journal of Physical Oceanography*. — 2023. — Vol. 53, no. 8. — P. 1997–2011. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-22-0157.1>.
- Dorschel B., Hehemann L., Viquerat S., et al. The International Bathymetric Chart of the Southern Ocean Version 2 // *Scientific Data*. — 2022. — Vol. 9, no. 1. — <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01366-7>.
- Fedotova A. A., Demidov A. N. and Artamonova K. V. Water masses of the Cooperation sea // *Lomonosov Geography Journal*. — 2020. — No. 1. — P. 105–113. — (In Russian).
- 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. — <https://doi.org/10.1029/2020gl088083>.
- Horne E., Beckebanze F., Micard D., et al. Particle transport induced by internal wave beam streaming in lateral boundary layers // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2019. — Vol. 870. — P. 848–869. — <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.251>.
- Jackson C. R., Silva J. C. B. da and Jeans G. The Generation of Nonlinear Internal Waves // *Oceanography*. — 2012. — Vol. 25, no. 2. — P. 108–123. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.46>.
- Jackson C. R., Silva J. C. B. da, Jeans G., et al. Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery // *Oceanography*. — 2013. — Vol. 26, no. 2. — P. 68–79. — <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.32>.
- Klepikov A. V. and Antipov N. N. Formation and distribution of water masses on the shelf and continental slope around Antarctica // *Ice and Snow*. — 2014. — Vol. 54, no. 4. — P. 81–94. — (In Russian).
- Konyaev K. V. and Sabinin K. D. Waves inside the ocean. — St. Petersburg : Gidrometeoizdat, 1992. — 272 p. — (In Russian).
- Kozlov I., Kudryavtsev V., 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*. — 2015. — Vol. 51, no. 9. — P. 1073–1087. — <https://doi.org/10.1134/s0001433815090121>.
- Kozlov I. E., Atadzhanova O. A. and 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. — <https://doi.org/10.3390/rs14194948>.
- Kozlov I. E. and Mikhaylichenko T. V. Estimation of internal wave phase speed in the Arctic Ocean from sequential spaceborne SAR observations // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2021. — Vol. 18, no. 5. — P. 181–192. — <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-181-192>. — (In Russian).
- Kozlov I. E., Mikhaylichenko T. V. and Petrenko L. A. Properties of short-period internal waves near Svalbard from Sentinel-1 satellite data // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2024. — Vol. 24. — ES5008. — <https://doi.org/10.2205/2024es000951>. — (In Russian).
- Kunze E. Internal-Wave-Driven Mixing: Global Geography and Budgets // *Journal of Physical Oceanography*. — 2017. — Vol. 47, no. 6. — P. 1325–1345. — <https://doi.org/10.1175/jpo-d-16-0141.1>.
- Ma L., Bai X., Laws E. A., et al. Responses of Phytoplankton Communities to Internal Waves in Oligotrophic Oceans // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2023. — Vol. 128, no. 10. — e2023JC020201. — <https://doi.org/10.1029/2023JC020201>.
- McPhee M. G. and Kantha L. H. Generation of internal waves by sea ice // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 1989. — Vol. 94, no. C3. — P. 3287–3302. — <https://doi.org/10.1029/jc094ic03p03287>.
- Meredith M. P., Inall M. E., Brearley J. A., et al. Internal tsunamigenesis and ocean mixing driven by glacier calving in Antarctica // *Science Advances*. — 2022. — Vol. 8, no. 47. — <https://doi.org/10.1126/sciadv.add0720>.
- Nikurashin M. and Ferrari R. Radiation and Dissipation of Internal Waves Generated by Geostrophic Motions Impinging on Small-Scale Topography: Theory // *Journal of Physical Oceanography*. — 2010. — Vol. 40, no. 5. — P. 1055–1074. — <https://doi.org/10.1175/2009jpo4199.1>.
- Osborne A. R., Burch T. L. and Scarlet R. I. The Influence of Internal Waves on Deep-Water Drilling // *Journal of Petroleum Technology*. — 1978. — Vol. 30, no. 10. — P. 1497–1504. — <https://doi.org/10.2118/6913-pa>.
- Petrenko L. A. and 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.
- Plotnikov E. V., Kozlov I. E., Zhuk E. V., et al. Evaluation of Sea Ice Drift in the Arctic Marginal Ice Zone based on Sentinel-1A/B Satellite Radar Measurements // *Physical Oceanography*. — 2024. — Vol. 31, no. 2. — P. 284–294.
- Silva J. C. B. da and Helfrich K. R. Synthetic Aperture Radar observations of resonantly generated internal solitary waves at Race Point Channel (Cape Cod) // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2008. — Vol. 113, no. C11. — <https://doi.org/10.1029/2008jc005004>.

- Silvano A., Purkey S., Gordon A. L., et al. Observing Antarctic Bottom Water in the Southern Ocean // *Frontiers in Marine Science*. — 2023. — Vol. 10. — P. 1221701. — <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1221701>.
- Sokolov S. and Rintoul S. R. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 1. Mean circumpolar paths // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2009. — Vol. 114, no. C11. — <https://doi.org/10.1029/2008jc005108>.
- Waterman S., Meyer A., Polzin K. L., et al. Antarctic Circumpolar Current Impacts on Internal Wave Life Cycles // *Geophysical Research Letters*. — 2021. — Vol. 48, no. 8. — <https://doi.org/10.1029/2020gl089471>.
- Whalen C. B., Lavergne C. de, Naveira Garabato A. C., et al. Internal wave-driven mixing: governing processes and consequences for climate // *Nature Reviews Earth & Environment*. — 2020. — Vol. 1, no. 11. — P. 606–621. — <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0097-z>.
- Woodson C. B. The Fate and Impact of Internal Waves in Nearshore Ecosystems // *Annual Review of Marine Science*. — 2018. — Vol. 10, no. 1. — P. 421–441. — <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063619>.