Характеристики короткопериодных внутренних волн в Южном океане по данным спутниковых РСА Sentinel-1A/B

Я. И. Бакуева, И. Е. Козлов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mails: yasya1egupova@gmail.com, ik@mhi-ras.ru

Представлены результаты наблюдений короткопериодных внутренних волн (КВВ) над свободными ото льда участками атлантического и индийского секторов Южного океана, а именно в проливе Дрейка и морях Скоша, Уэдделла, Рисер-Ларсена, Лазарева, Космонавтов и Содружества, по спутниковым данным Sentinel-1A/B за февраль 2020 г. На основе анализа поверхностных проявлений КВВ в РСА-изображениях определялись районы их генерации и пространственно-временные характеристики, такие как длина фронта лидирующей волны и ширина пакетов. Всего было рассмотрено 1037 радиолокационных изображений, на которых идентифицировано 6888 поверхностных проявлений КВВ. Ключевые районы наблюдения внутренних волн, определяемые их максимальной повторяемостью, зарегистрированы в проливе Дрейка, над континентальным склоном к северо-востоку от Антарктического п-ова в акватории моря Скоша, также над склоном шельфа в акватории моря Содружества. Внутренние волны наблюдались в виде пакетов из 4–5 уединённых волн с длиной гребня лидирующей волны около 15–30 км при средней ширине пакета около 15 км (большинство значений находится в пределах 10–25 км) и характерным уменьшением расстояния между ними в сторону тыла пакета, одиночные солитоны фиксировались редко.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, спутниковая радиолокация морской поверхности, Южный океан, пролив Дрейка, море Скоша, море Уэдделла, море Лазарева, море Рисер-Ларсена, море Содружества, море Космонавтов

Одобрена к печати: 18.04.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-201-211

Введение

Внутренние волны (ВВ) представляют собой класс высокочастотных, нелинейных и негидростатических гравитационных волн, которые широко наблюдаются в прибрежных океанах и окраинных морях (см., например, работы (Apel et al., 1985; Jackson et al., 2013)). ВВ могут оказывать существенное влияние на перемешивание в океане и являются важным звеном в диссипации энергии баротропного прилива (Moum et al., 2003), включая полярные районы Мирового океана (Fer et al., 2020). Кроме того, они могут оказывать сильное влияние на морские буровые работы (Osborne et al., 1978), перенос питательных веществ, взвесей и загрязнений (Horne et al., 2019), распространение звука (Chiu et al., 2004) и прибрежные экосистемы (Woodson, 2018). По этим причинам исследованию процессов генерации, распространения и диссипации внутренних волн уделяется большое внимание океанологов в течение последних десятилетий. Один из основных источников генерации ВВ на шельфе — взаимодействие баротропного приливного течения с неровностями рельефа морского дна (Бондур и др., 2006; Коняев, Сабинин, 1992; Marchenko et al., 2021).

Спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) выступают эффективным инструментом обнаружения очагов генерации короткопериодных внутренних волн (КВВ) и определения их характеристик из космоса (Jackson et al., 2013; Kozlov et al., 2017). Внутренние волны влияют на морскую поверхность, изменяя интенсивность коротких брэгговских волн и обрушений более длинных волн, что делает ВВ видимыми на изображениях РСА в виде чередующихся ярких и тёмных полос (Дулов и др., 2015, Kudryavtsev et al., 2014). В настоящее время данные спутниковых РСА широко применяются для определения таких характеристик КВВ, как характерная полуширина солитона, длина волны внутри пакетов, длина фронта лидирующей волны, количество волн в пакетах, а также направление их рас-

пространения и фазовая скорость КВВ (Козлов, Михайличенко, 2021; da Silva et al., 1998; Fan et al., 2015; Jackson et al., 2013; Kozlov et al., 2015).

Акватория Южного океана характеризуется мощным, направленным на восток потоком — Антарктическим циркумполярным течением (АЦТ), которое имеет сложную многоструйную структуру. Струи АЦТ существенно различаются как по характеру термического режима, так и по скорости течений. В последние десятилетия был проведён ряд исследований процессов турбулентного перемешивания в Южном океане, которые позволили определить физическую связь между крупномасштабным подводом энергии и мелкомасштабной турбулентной диссипацией. Было высказано предположение, что высокий уровень диссипации кинетической энергии турбулентности в Южном океане в первую очередь обусловлен обрушением внутренних запрепятственных волн (*англ.* lee waves), возникающих при обтекании глубокими геострофическими потоками неровной топографии морского дна (Garabato et al., 2004; Kunze et al., 2006; Nikurashin, Ferrari, 2010; Sloyan, 2005; Wu et al., 2011), и что этот процесс вносит значительный вклад в энергетический и динамический балансы Южного океана (Garabato et al., 2013; Nikurashin, Ferrari, 2010; Scott et al., 2011). В выбранном нами районе исследований, включающем атлантический и индийский сектора Южного океана, преобладают бароклинные полусуточные приливы (Richter et al., 2020). Исключением представляется акватория моря Содружества, в котором основной вклад в диссипацию приливной энергии, как правило, вносят суточные приливы.

Несмотря на доступность спутниковых РСА-измерений для этой части Мирового океана, короткопериодные внутренние волны всё ещё остаются практически не исследованными в Южном океане. Основные результаты, имеющиеся в литературе, как правило, относятся к численному моделированию баротропных приливов в этом районе (Foldvik et al., 1990; Han et al., 2007; Padman et al., 2008; Ray, 2008).

Основная цель данной работы состоит в определении ключевых районов генерации и основных пространственно-временных характеристик КВВ в Южном океане на основе анализа массива спутниковых РСА-изображений Sentinel-1A/B. В настоящей работе впервые приводятся результаты анализа поля КВВ в атлантическом и индийских секторах Южного океана за февраль 2020 г. в момент максимального открытия района исследований ото льда.

Данные и методы

Анализ пространственно-временных характеристик поля КВВ в Южном океане проводился на основе обработки радиолокационных изображений (РЛИ) Sentinel-1A/B, полученных при различной поляризации РСА-сигнала. В работе использованы продукты L1 Ground Range Detected среднего разрешения — с пространственным разрешением 93×87 м в режиме сьёмки Extra Wide Swath (EW, сверх-широкозахватный) и высокого разрешения — 20×20 м в режиме Interferometric Wide Swath (IW, интерферометрический широкозахватный). Спутниковые РЛИ были получены из архивов системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus Open Access Hub (https://scihub.copernicus.eu). Анализ и идентификация внутренних волн на изображениях РСА проводились в соответствии с методикой, описанной в работе (Kozlov et al., 2015). Всего за февраль 2020 г. было проанализировано 1037 РЛИ. В *таблице* приведены сводные данные о количестве обработанных РЛИ для акваторий различных морей Южного океана за выбранный период. Как видно из *таблицы*, максимальное количество РЛИ было доступно для акватории морей Скоша (555 РЛИ) и Содружества (114 РЛИ).

На *рис. 1* (см. с. 203) представлена карта покрытия РСА данными района исследований. Как видно на карте, акватория морей покрыта довольно неравномерно. Большинство РЛИ приходится на западную часть исследуемого региона (пролив Дрейка, моря Скоша и Уэдделла) — от 40 до 70 РЛИ на единицу площади морской поверхности, а восточнее 40° з. д. покрытие резко уменьшается до 5–35 РЛИ на единицу площади морской поверхности. Отсутствие в анализе РСА-данных для южной части моря Уэдделла связано с наличием ледяного покрова. Красным квадратом выделено местоположение фрагмента РЛИ Sentinel-1A за 08.02.2020, описанного в разд. «Результаты» (*рис. 2*, см. с. 203).

Основные характеристики спутниковых наблюдений КВВ в Южном океане

Район	Количество изображений		Количество поверхностных проявлений (ПП) КВВ
	EW	IW	
Море Скоша	538	17	5984
Море Уэдделла	82	0	177
Море Рисер-Ларсена	71	14	138
Море Лазарева	79	9	165
Море Космонавтов	73	31	141
Море Содружества	113	10	283
Всего	956	81	6888

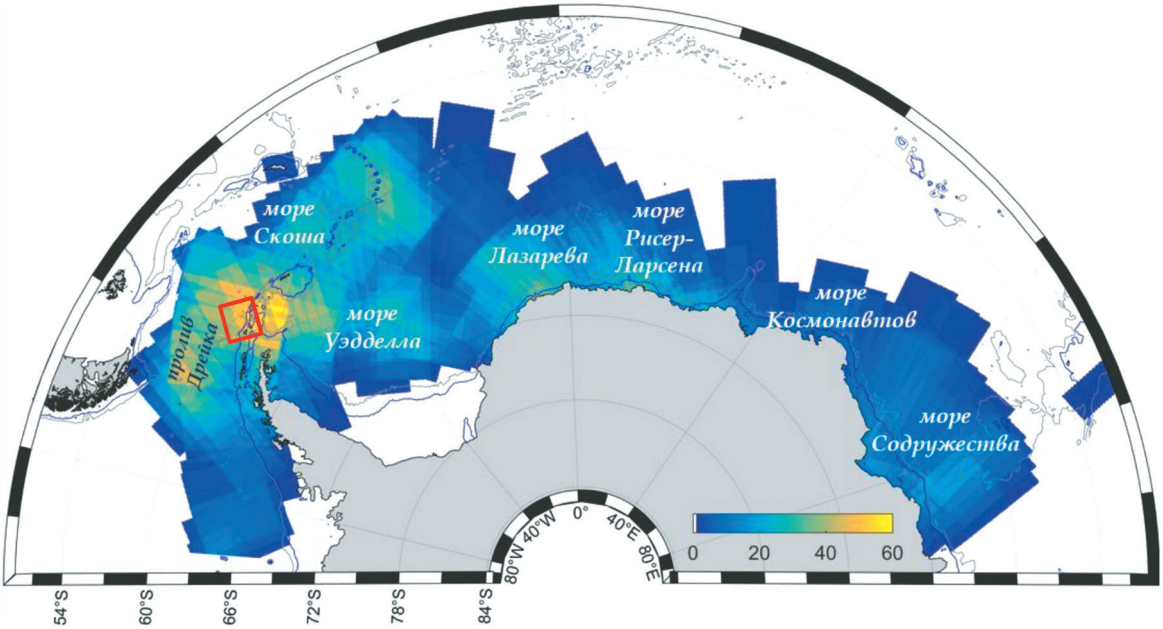
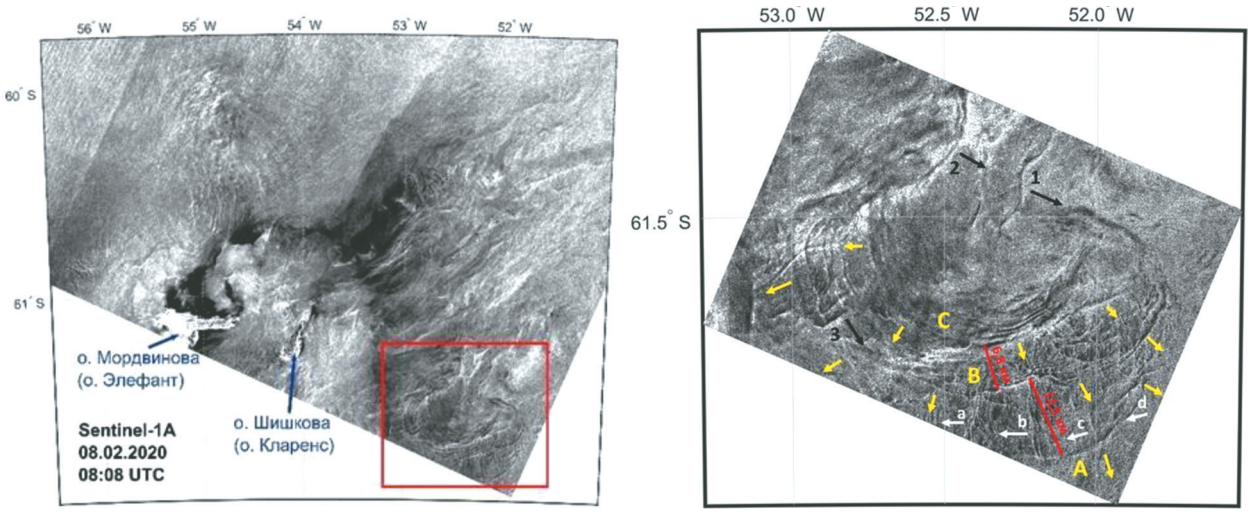


Рис. 1. Карта покрытия акватории Южного океана РСА-данными за февраль 2020 г. На карту нанесены изобаты 1000 и 2500 м



а *б*

Рис. 2. Поверхностные проявления КВВ в акватории моря Скоша на увеличенном фрагменте РЛИ Sentinel-1A от 08.02.2020 с использованием программного обеспечения SNAP ©ESA

Процедура анализа РСА-изображений проводилась с помощью программы SNAP © ESA (Sentinel Application Platform). Это программное обеспечение 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 ширину пакета. Обработка результатов анализа и построение карт пространственного распределения различных характеристик КВВ проводились в среде MathWorks © Matlab. Среднее значение для каждого параметра КВВ было рассчитано на прямоугольной сетке размером 30×160 ячеек. Информация о наличии безлёдных участков морской поверхности в районе исследований была получена на основе данных пассивного микроволнового радиометра AMSR-2 (*англ*. advanced microwave scanning radiometer) Института физики окружающей среды Бременского университета (*нем*. Universität Bremen, *англ*. University of Bremen; https://seaice.uni- bremen.de/databrowser).

Результаты

В ходе обработки 1037 спутниковых РЛИ было идентифицировано 6888 поверхностных проявлений КВВ за февраль 2020 г. Как правило, внутренние волны наблюдались на РЛИ в виде пакетов из 4–5 уединённых волн с характерным уменьшением расстояния между ними в сторону тыла пакета, одиночные солитоны фиксировались редко. В ряде случаев на РЛИ наблюдались последовательные пакеты внутренних волн, предположительно имеющих один и тот же район генерации.

На *рис. 2* представлен увеличенный фрагмент РЛИ Sentinel-1A за 08.02.2020, полученного над районом у границы пролива Дрейка и моря Уэдделла вблизи Южных Шетландских о-вов к северо-востоку от Антарктического п-ова. На фрагменте РЛИ в нижнем левом секторе (см. *рис. 2а*) видно положение островов Мордвинова и Шишкова, к северу и востоку от которых наблюдается большое количество выраженных ПП КВВ. Один из наиболее интересных фрагментов РЛИ с проявлениями КВВ показан на *рис. 2б*. Анализ структуры проявлений КВВ на этом РЛИ позволяет выделить три последовательных пакета внутренних волн концентрической формы (обозначены A, B, C), расположенных на расстояниях 12,5 км (AB) и 6,8 км (BC) и направленных на юг. Наиболее выраженным является пакет C, состоящий примерно из 10 солитонов с длиной фронта лидирующей волны около 67 км. В связи с нелинейностью КВВ максимальная длина волны в пакете соответствует лидирующей волне и изменяется вдоль её фронта в пределах 800–1000 м. Наибольшим по своим размерам пакетом КВВ на данном РЛИ представляется пакет A с длиной фронта лидирующей волны около 80 км. В правом нижнем секторе РЛИ буквами a–d и белыми стрелками отмечено положение пакетов КВВ, распространяющихся на запад (поперёк направлению A–C). Расстояние между ними составляет около 10 км с максимальной длиной волны в пакетах около 400–600 м. В верхней части РЛИ также видны проявления пакетов КВВ, направленных на юго-восток (отмечены цифрами 1–3). Направление их распространения и форма проявлений говорит об отличном от пакетов A–C и a–d районе генерации. Таким образом, представленные фрагменты РЛИ свидетельствуют о весьма сложной структуре поля КВВ, имеющих различные масштабы, направления распространения и районы генерации.

На *рис. 3* (см. с. 205) представлено пространственное распределение положения фронтов лидирующих волн всех выделенных в ходе исследования пакетов КВВ. Видно, что пакеты КВВ распространены по акватории неравномерно. Большая их часть (около 85 %) расположена в проливе Дрейка, море Скоша и северо-западной части моря Уэдделла, что в первую очередь может быть обусловлено сильными приливными течениями и неоднородным рельефом дна в этих районах, большей площадью открытой воды и доступностью спутниковых измерений (область A на *рис. 3*). Также большое количество проявлений КВВ сосредоточено в акватории моря Содружества (область B на *рис. 3*), причём как вблизи бровки шельфа, так и над глубокой водой. Западная часть моря Космонавтов (область C на *рис. 3*) — район с наименьшим количеством зарегистрированных ПП КВВ.

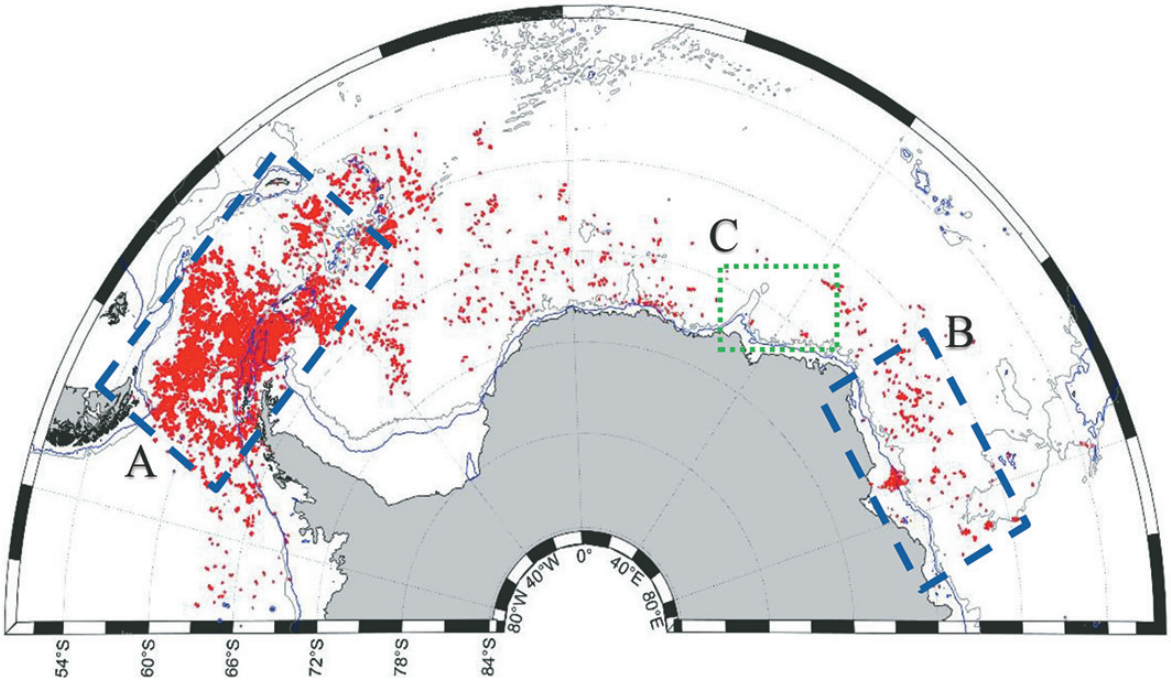
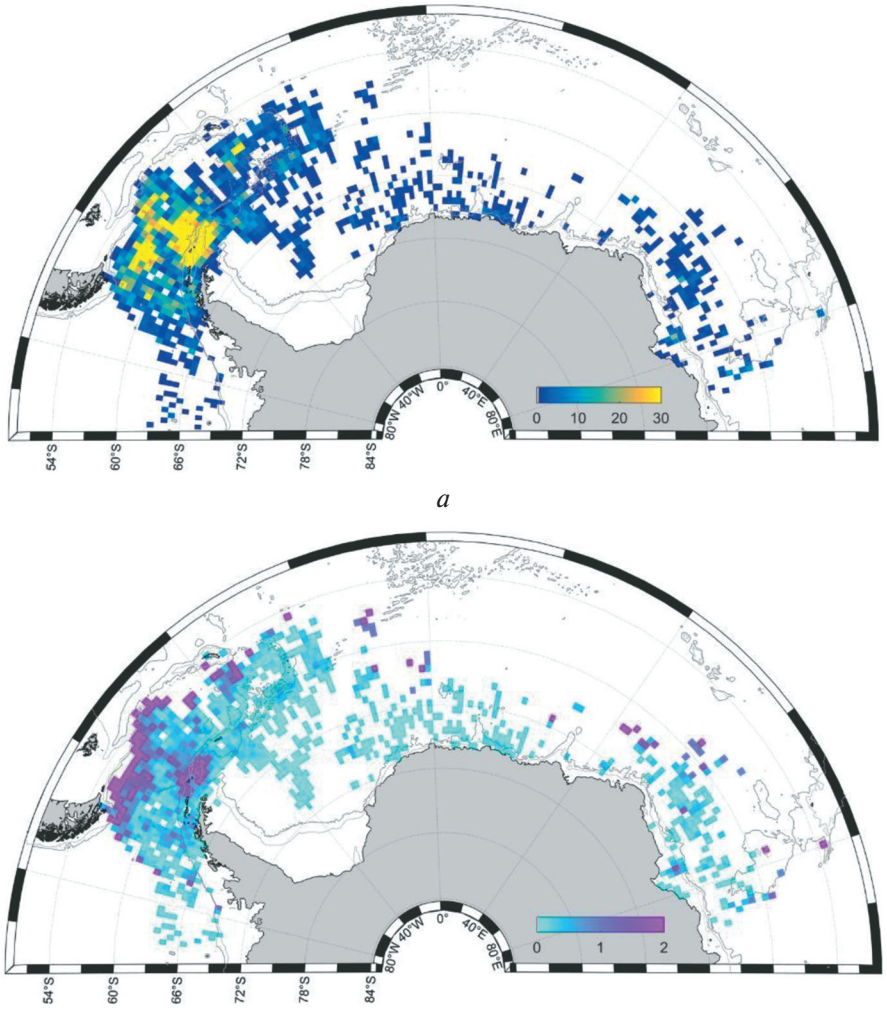


Рис. 3. Пространственное распределение фронтов лидирующих волн на акватории Южного океана по данным Sentinel-1 в феврале 2020 г. Синими прямоугольниками выделены ключевые районы наблюдения КВВ: А — акватория моря Скоша и пролива Дрейка, В — акватория моря Содружества. Зелёным прямоугольником выделен район с наименьшим количеством ПП КВВ в западной части моря Космонавтов. На карту нанесены изобаты 1000 и 2500 м

На *рис. 4а* (см. с. 206) представлена карта пространственного распределения общего количества ПП КВВ, зарегистрированных в заданном квадрате моря. Исходя из карты, наибольшее количество волн (более 20 в заданном квадрате) встречается в западной части акватории моря Скоша, а также в проливе Дрейка. В восточной части моря Скоша ПП КВВ встречаются не так часто, от 10 до 20 волн в заданном квадрате моря. Также некоторые области проявления КВВ можно выделить в акватории моря Содружества (от 5 до 10 волн). В остальной же части Южного океана ПП КВВ регистрировались редко (0–5 волн в заданном квадрате моря). Как и на *рис. 3*, западную часть моря Космонавтов можно выделить как область с наименьшим количеством зарегистрированных ПП КВВ.

На *рис. 4б* показано пространственное распределение повторяемости внутренних волн на РЛИ Южного океана, рассчитанной в виде отношения общего количества зарегистрированных ПП КВВ в заданном квадрате моря (см. *рис. 4а*) к количеству РСА-съёмок данного квадрата. На *рис. 4б* видно, что наиболее часто пакеты КВВ наблюдались на северной и южной периферии пролива Дрейка, вдоль северо-западной границы моря Скоша и вблизи Антарктического п-ова (значения относительной частоты ~2–5). На остальной акватории КВВ фиксировались значительно реже — относительная частота встречаемости не превышает 1, однако следует отметить отдельные районы, где внутренние волны встречались по меньшей мере на каждом снимке. Такие районы зарегистрированы в глубоководной части морей Лазарева, Рисер-Ларсена и Космонавтов, а также на шельфе в море Содружества.

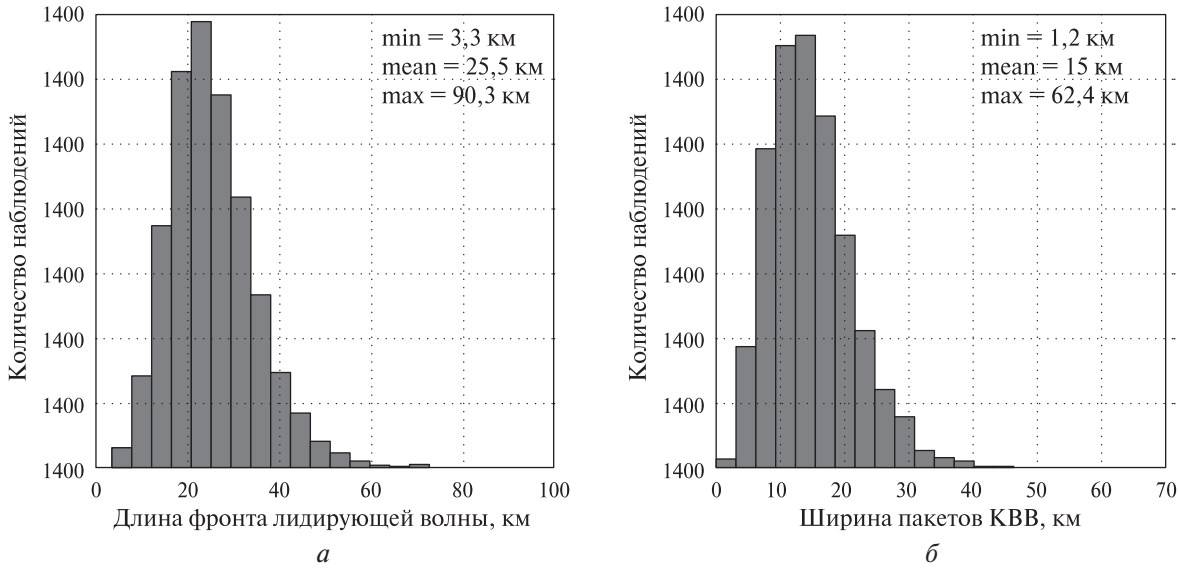
На *рис. 5* приведены гистограммы некоторых пространственных характеристик внутренних волн. Как упоминалось ранее, КВВ наблюдались в виде пакетов по 4–5 уединённых волн (максимум 15 волн). На *рис. 5а* показана гистограмма распределения длины фронта лидирующей волны в пакетах КВВ, где отчётливо виден пик для значений около 20–25 км (среднее значение 25,5 км) при общем диапазоне изменчивости от 3 до 90 км. На *рис. 5б* показана гистограмма распределения значений ширины пакетов КВВ. Как видно, большинство значений находятся в пределах 10–25 км (среднее значение составляет 15 км), в то время как максимальное значение ширины пакета — около 62 км.



а

б

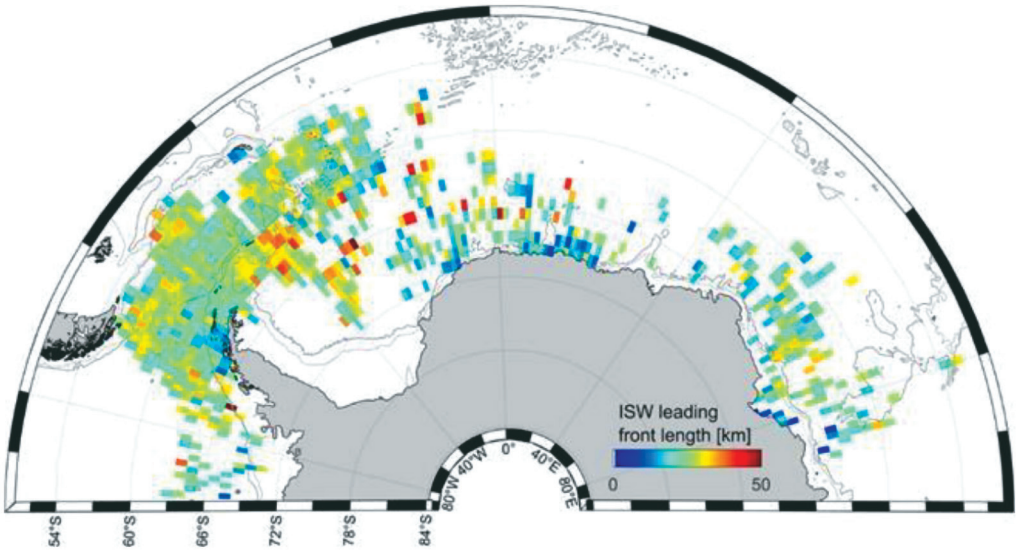
Рис. 4. Карты пространственного распределения основных параметров внутренних волн на акватории Южного океана: *а* — общее количество зарегистрированных пакетов КВВ в заданном квадрате моря; *б* — относительная частота встречаемости КВВ на спутниковых РЛИ. На карты нанесены изобаты 1000 и 2500 м



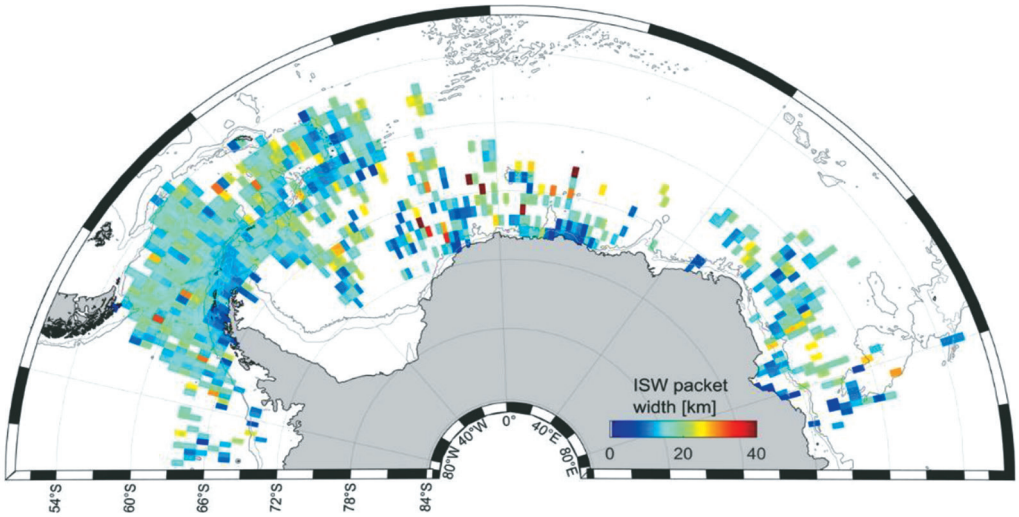
а *б*

Рис. 5. Гистограммы распределения пространственных характеристик КВВ на акватории Южного океана: *а* — длина фронта лидирующей волны (км); *б* — ширина пакета КВВ (км)

На *рис. 6* представлены карты пространственного распределения средних значений длины фронта лидирующей волны и ширины пакетов КВВ, определённые на горизонтальной сетке размером 30×160 ячеек. Как видно из *рис. 6а*, в основном на акватории наблюдались цуги КВВ с длиной фронта лидирующей волны около 20–35 км, наиболее крупные пакеты внутренних волн фиксировались на некотором удалении от участков с неоднородной топографией и в глубоководных районах, что, по-видимому, связано с более развитым полем внутреннего волнения в стороне от их непосредственных районов генерации. Максимальное значение длины фронта лидирующей волны (90,3 км) зарегистрировано в море Уэдделла, где фиксируются максимальные бароклинные полусуточные приливы с наибольшей скоростью приливных течений около 0,2 м/с (Beckmann et al., 2003; Richter et al., 2020). Самые протяжённые пакеты внутренних волн также были зарегистрированы в глубоководной части Южного океана. Наименьшие по своим параметрам пакеты КВВ встречались в основном вблизи прикромочной ледовой зоны морей Лазарева, Рисер-Ларсена и Содружества, а также с западной стороны Антарктического п-ова. На акватории моря Скоша и в проливе Дрейка, где КВВ имели максимальную повторяемость, их пространственные параметры имели средние значения.



а



б

Рис. 6. Карты пространственного распределения основных параметров внутренних волн на акватории Южного океана: *а* — длина фронта лидирующей волны (км); *б* — ширина пакетов (км). На карты нанесены изобаты 1000 и 2500 м

Заключение

В настоящей работе впервые на основе анализа спутниковых РСА-данных Sentinel-1A/B за февраль 2020 г. выполнен анализ характеристик поля КВВ в атлантическом и индийском секторах Южного океана. Анализ 1037 РЛИ позволил выделить 6888 пакетов КВВ, определить основные районы их генерации и построить карты основных пространственных характеристик внутренних волн.

Как правило, внутренние волны наблюдались в виде пакетов уединённых волн при средней ширине пакета 15 км и средней длине гребня лидирующей волны около 25 км. Большинство наблюдаемых на акватории пакетов КВВ (~85 %) зарегистрированы в проливе Дрейка, море Скоша и северо-западной части моря Уэдделла, что в первую очередь может быть обусловлено сильными приливными и фоновыми течениями в этих районах, а также достаточно неоднородным рельефом дна. Второй причиной более частой регистрации КВВ в этих районах могут быть большая площадь открытой воды и высокая плотность спутниковых измерений (около 53 % всех доступных данных). Другим районом высокой повторяемости КВВ выступают южная и центральная части моря Содружества, где пакеты КВВ часто наблюдались вблизи прикромочной ледовой зоны.

Интересно отметить, что на акватории моря Уэдделла, где значения скорости приливных течений максимальны и достигают 0,2 м/с, зарегистрировано относительно небольшое количество проявлений КВВ, особенно в его южной части, что в первую очередь обусловлено наличием льда даже в период максимального ледотаяния.

В дальнейшем планируется более детальный анализ связи наблюдаемых внутренних волн с полем приливных течений, анализ их кинематических характеристик на основе использования последовательных РСА-измерений (см., например, работы (Козлов, Михайличенко, 2021; Kozlov et al., 2020)), а также анализ вертикальной структуры наблюдаемых волн и механизмов их генерации на основе привлечения данных контактных измерений.

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 075–03-2021-372/5. Спутниковые данные Sentinel-1A/B были получены из архивов системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus Open Access Hub (https://scihub.copernicus.eu).

Литература

1. *Бондур В. Г.*, *Морозов Е. Г.*, *Бельчанский Г. И.*, *Гребенюк Ю. В.* Радиолокационная съемка и численное моделирование внутренних приливных волн в шельфовой зоне // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 2. С. 51–63.
2. *Дулов В. А.*, *Юровская М. В.*, *Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофиз. журн. 2015. № 6(186). С. 43–60. DOI: 10.22449/0233-7584-2015-6-43-60.
3. *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.
4. *Коняев К. В.*, *Сабинин К. Д.* Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.
5. *Apel J. R.*, *Holbrook J. R.*, *Liu A. K.*, *Tsai J. J.* The Sulu Sea internal soliton experiment // J. Physical Oceanography. 1985. V. 15. No. 12. P. 1625–1651. https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<1625:TSSISE>2.0.CO;2.
6. *Beckmann A.*, *Pereira A. F.* Lateral tidal mixing in the Antarctic marginal seas // Ocean Dynamics. 2003. V. 53. No. 1. P. 21–26. DOI: 10.1007/s10236-002-0020-9.
7. *Chiu C. S.*, *Ramp S. R.*, *Miller C. W.*, *Lynch J. F.*, *Duda T. F.*, *Tang T. Y.* Acoustic intensity fluctuations induced by South China Sea internal tides and solitons // IEEE J. Oceanic Engineering. 2004. V. 29. No. 4. P. 1249–1263. DOI: 10.1109/JOE.2004.834173.
8. *da Silva J. C. B.*, *Ermakov S. A.*, *Robinson I. S.*, *Jeans D. R. G.*, *Kijashko S. V.* Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf: 1. Short-period internal waves // J. Geophysical Research: Oceans. 1998. V. 103. No. C4. P. 8009–8031. DOI: 10.1029/97JC02725.

9. *Fan K.*, *Fu B.*, *Gu Y.*, *Yu X.*, *Liu T.*, *Shi A.*, *Xu K.*, *Gan X.* Internal wave parameters retrieval from space-borne SAR image // Frontiers of Earth Science. 2015. V. 9. No. 4. P. 700–708. DOI: 10.1007/s11707-015-0506-7.
10. *Fer I.*, *Koenig Z.*, *Kozlov I. E.*, *Ostrowski M.*, *Rippeth T. P.*, *Padman L.*, *Bosse A.*, *Kolas E.* Tidally forced lee waves drive turbulent mixing along the Arctic Ocean margins // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. No. 16. e2020GL088083. https://doi.org/10.1029/2020GL088083.
11. *Foldvik A.*, *Middleton J. H.*, *Foster T. D.* The tides of the southern Weddell Sea // Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers. 1990. V. 37. No. 8. P. 1345–1362. DOI: 10.1016/0198-0149(90)90047-Y.
12. *Garabato A. C. N.*, *Polzin K.*, *King B.*, *Heywood K.*, *Visbeck M.* Widespread intense turbulent mixing in the Southern Ocean // Science. 2004. V. 303. No. 5655. P. 210–213. DOI: 10.1126/science.1090929.
13. *Garabato A. C. N.*, *Nurser A. J. G.*, *Scott R. B.*, *Scott R.B.*, *Goff J. A.* The impact of small-scale topography on the dynamical balance of the ocean // J. Physical Oceanography. 2013. V. 43. No. 3. P. 647–668. https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-056.1.
14. *Han S. C.*, *Ray R. D.*, *Luthcke S. B.* Ocean tidal solutions in Antarctica from GRACE inter-satellite tracking data // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. No. 21. DOI: 10.1029/2007GL031540.
15. *Horne E.*, *Beckebanze F.*, *Micard D.*, *Odier P.*, *Maas L. R. M.*, *Joubaud S.* Particle transport induced by internal wave beam streaming in lateral boundary layers // J. Fluid Mechanics. 2019. V. 870. P. 848–869. DOI: 10.1017/jfm.2019.251.
16. *Jackson C. R.*, *da Silva J. C. B.*, *Jeans G.*, *Alpers W.*, *Caruso M. J.* Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery // Oceanography. 2013. V. 26. No. 2. P. 68–79. https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.32.
17. *Kozlov I.*, *Kudryavtsev V.*, *Zubkova E. V.*, *Zimin A. V.*, *Chapron B.* Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea inferred from satellite SAR data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. V. 51. No. 9. P. 1073–1087. DOI: 10.1134/S0001433815090121.
18. *Kozlov I. E.*, *Zubkova E. V.*, *Kudryavtsev V. N.* Internal solitary waves in the Laptev Sea: first results of space-borne SAR observations // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2017. V. 14. No. 11. P. 2047–2051. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2749681.
19. *Kozlov I. E.*, *Plotnikov E. V.*, *Manucharyan G. E.* Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // The Cryosphere. 2020. V. 14. No. 9. P. 2941–2947. https://doi.org/10.5194/tc-14-2941-2020.
20. *Kudryavtsev V.*, *Kozlov I.*, *Chapron B.*, *Johannessen J. A.* Quad-polarization SAR features of ocean currents // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119. No. 9. P. 6046–6065. https://doi.org/10.1002/2014JC010173.
21. *Kunze E.*, *Firing E.*, *Hummon J. M.*, *Chereskin T. K.*, *Thurnherr A. M.* Global abyssal mixing inferred from lowered ADCP shear and CTD strain profiles // J. Physical Oceanography. 2006. V. 36. No. 8. P. 1553–1576. https://doi.org/10.1175/JPO2926.1.
22. *Marchenko A. V.*, *Morozov E. G.*, *Kozlov I. E.*, *Frey D. I.* High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen // Continental Shelf Research. 2021. V. 227. Art. No. 104523. DOI: 10.1016/j.csr.2021.104523.
23. *Moum J. N.*, *Farmer D. M.*, *Smyth W. D.*, *Armi L.*, *Vagle S.* Structure and generation of turbulence at interfaces strained by internal solitary waves propagating shoreward over the continental shelf // J. Physical Oceanography. 2003. V. 33. No. 10. P. 2093–2112. https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<2093:SAGOTA>2.0.CO;2.
24. *Nikurashin M.*, *Ferrari R.* Radiation and dissipation of internal waves generated by geostrophic motions impinging on small-scale topography: Application to the Southern Ocean // J. Physical Oceanography. 2010. V. 40. No. 5. P. 2025–2042. https://doi.org/10.1175/2010JPO4315.1.
25. *Osborne A. R.*, *Burch T. L.*, *Scarlet R. I.* The influence of internal waves on deep-water drilling // J. Petroleum Technology. 1978. V. 30. No. 10. Paper No. SPE-6913-PA. P. 1497–1504. https://doi.org/10.2118/6913-PA.
26. *Padman L.*, *Erofeeva S. Y.*, *Fricker H. A.* Improving Antarctic tide models by assimilation of ICESat laser altimetry over ice shelves // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. No. 22. DOI: 10.1029/2008GL035592.
27. *Ray R. D.* A preliminary tidal analysis of ICESat laser altimetry: Southern Ross Ice Shelf // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. No. 2. https://doi.org/10.1029/2007GL032125.
28. *Richter O.*, *Gwyther D. E.*, *King M. A.*, *Galton-Fenzi B. K.* Tidal modulation of Antarctic ice shelf melting // The Cryosphere Discussions. 2020. P. 1–32. https://doi.org/10.5194/tc-2020-16.
29. *Scott R. B.*, *Goff J. A.*, *Garabato A. C. N.*, *Nurser A. J. G.* Global rate and spectral characteristics of internal gravity wave generation by geostrophic flow over topography // J. Geophysical Research: Oceans. 2011. V. 116. No. C9. DOI: 10.1029/2011JC007005
30. *Sloyan B. M.* Spatial variability of mixing in the Southern Ocean // Geophysical Research Letters. 2005. V. 32. No. 18. https://doi.org/10.1029/2005GL023568.
31. *Woodson C. B.* The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems // Annual Review of Marine Science. 2018. V. 10. P. 421–441. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063619.
32. *Wu L.*, *Jing Z.*, *Riser S.*, *Visbeck M.* Seasonal and spatial variations of Southern Ocean diapycnal mixing from Argo profiling floats // Nature Geoscience. 2011. V. 4. No. 6. P. 363–366. DOI: 10.1038/ngeo1156.

Characteristics of short-period internal waves in the Southern Ocean inferred from Sentinel-1A/B SAR satellite data

Ya. I. Bakueva, I. E. Kozlov

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mails: yasya1egupova@gmail.com, ik@mhi-ras.ru

This paper presents the results of observations of short-period internal waves (SIWs) over ice-free areas of the Southern Ocean. The study was conducted in the Indian and Atlantic sectors, namely in the Drake Passage and the Scotia, Weddell, Riser-Larsen, Lazarev, Cosmonauts, and Commonwealth Seas using Sentinel-1A/B satellite data for February 2020. Form the analysis of surface manifestations of SIWs in SAR images we determined by the areas of their generation and space-time characteristics, such as crest length of the leading wave and packet width. In total, 1037 radar images were analyzed and 6888 surface manifestations of SIWs were identified. Key areas of SIWs activity defined by their maximum probability were recorded in the Drake Passage, above the continental slope to the northeast of the Antarctic Peninsula in the Scotia Sea, and also above the shelf slope in the Commonwealth Sea. Internal waves were observed as packets of 4–5 solitary waves with a leading wave crest length of about 15–30 km, an average packet width of about 15 km (most values are within 10–25 km), and a characteristic decrease in the distance between them towards the rear of the packet; single solitons were rarely recorded.

Keywords: short-period internal waves, satellite radar sea surface, Southern Ocean, Drake Passage, Scotch Sea, Weddell Sea, Lazarev Sea, Riiser-Larsen Sea, Commonwealth Sea, Cosmonauts Sea

Accepted: 18.04.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-201-211

References

1. Bondur V. G., Morozov E. G., Bel'chansky G. I., Grebenyuk Yu. V., Radar imaging and numerical simulation of internal tidal waves nearby U. S. North-Eastern Coast, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 2, pp. 51–63 (in Russian).
2. Dulov V. A., Yurovskaya M. V., Kozlov I. E., Coastal Zone of Sevastopol on High Resolution Satellite Images, *Physical Oceanography*, 2015, No. 6, pp. 39–54, DOI: 10.22449/1573-160X-2015-6-39-54.
3. Kozlov I. E., 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, pp. 181–192 (in Rusian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-181-192.
4. Konyaev K. V., Sabinin K. D., *Volny vnutri okeana* (Waves inside the ocean), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 272 p. (in Russian).
5. Apel J. R., Holbrook J. R., Liu A. K., Tsai J. J., The Sulu Sea internal soliton experiment, *J. Physical Oceanography*, 1985, Vol. 15, No. 12, pp. 1625–1651, https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<1625:TSSISE>2.0.CO;2.
6. Beckmann A., Pereira A. F., Lateral tidal mixing in the Antarctic marginal seas, *Ocean Dynamics*, 2003, Vol. 53, No. 1, pp. 21–26, DOI: 10.1007/s10236-002-0020-9.
7. Chiu C. S., Ramp S. R., Miller C. W., Lynch J. F., Duda T. F., Tang T. Y., Acoustic intensity fluctuations induced by South China Sea internal tides and solitons, *IEEE J. Oceanic Engineering*, 2004, Vol. 29, No. 4, pp. 1249–1263, DOI: 10.1109/JOE.2004.834173.
8. da Silva J. C. B., Ermakov S. A., Robinson I. S., Jeans D. R. G., Kijashko S. V., Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf: 1. Hort-period internal waves, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1998, Vol. 103, No. C4, pp. 8009–8031, DOI: 10.1029/97JC02725.
9. Fan K., Fu B., Gu Y., Yu X., Liu T., Shi A., Xu K., Gan X., Internal wave parameters retrieval from space-borne SAR image, *Frontiers of Earth Science*, 2015, Vol. 9, No. 4, pp. 700–708, DOI: 10.1007/s11707-015-0506-7.
10. Fer I., Koenig Z., Kozlov I. E., Ostrowski M., Rippeth T. P., Padman L., Bosse A., Kolas E., Tidally forced lee waves drive turbulent mixing along the Arctic Ocean margins, *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, No. 16, e2020GL088083, https://doi.org/10.1029/2020GL088083.
11. Foldvik A., Middleton J. H., Foster T. D., The tides of the southern Weddell Sea, *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1990, Vol. 37, No. 8, pp. 1345–1362, DOI: 10.1016/0198-0149(90)90047-Y.

12. Garabato A. C. N., Polzin K., King B., Heywood K., Visbeck M., Widespread intense turbulent mixing in the Southern Ocean, *Science*, 2004, Vol. 303, No. 5655, pp. 210–213, DOI: 10.1126/science.1090929.
13. Garabato A. C. N., Nurser A. J. G., Scott R. B., Scott R. B., Goff J. A., The impact of small-scale topography on the dynamical balance of the ocean, *J. Physical Oceanography*, 2013, Vol. 43, No. 3, pp. 647–668, https://doi.org/10.1175/JPO-D-12-056.1.
14. Han S. C., Ray R. D., Luthcke S. B., Ocean tidal solutions in Antarctica from GRACE inter-satellite tracking data, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, No. 21, DOI: 10.1029/2007GL031540.
15. Horne E., Beckebanze F., Micard D., Odier P., Maas L. R. M., Joubaud S., Particle transport induced by internal wave beam streaming in lateral boundary layers, *J. Fluid Mechanics*, 2019, Vol. 870, pp. 848–869, DOI: 10.1017/jfm.2019.251.
16. Jackson C. R., da Silva J. C. B., Jeans G., Alpers W., Caruso M. J., Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery, *Oceanography*, 2013, Vol. 26, No. 2, pp. 68–79, https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.32.
17. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E. V., Zimin A. V., Chapron B., 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, pp. 1073–1087, DOI: 10.1134/S0001433815090121.
18. 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, pp. 2047–2051, DOI: 10.1109/LGRS.2017.2749681.
19. Kozlov I. E., Plotnikov E. V., Manucharyan G. E., Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14, No. 9, pp. 2941–2947, https://doi.org/10.5194/tc-14-2941-2020.
20. Kudryavtsev V., Kozlov I., Chapron B., Johannessen J. A., Quad-polarization SAR features of ocean currents, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol. 119, No. 9, pp. 6046–6065, https://doi.org/10.1002/2014JC010173.
21. Kunze E., Firing E., Hummon J. M., Chereskin T. K., Thurnherr A. M., Global abyssal mixing inferred from lowered ADCP shear and CTD strain profiles, *J. Physical Oceanography*, 2006, Vol. 36, No. 8, pp. 1553–1576, https://doi.org/10.1175/JPO2926.1.
22. Marchenko A. V., Morozov E. G., Kozlov I. E., Frey D. I., High-amplitude internal waves southeast of Spitsbergen, *Continental Shelf Research*, 2021, Vol. 227, Art. No. 104523, DOI: 10.1016/j.csr.2021.104523.
23. Moum J. N., Farmer D. M., Smyth W. D., Armi L., Vagle S., Structure and generation of turbulence at interfaces strained by internal solitary waves propagating shoreward over the continental shelf, *J. Physical Oceanography*, 2003, Vol. 33, No. 10, pp. 2093–2112, https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<2093:SAGOTA>2.0.CO;2.
24. Nikurashin M., Ferrari R., Radiation and dissipation of internal waves generated by geostrophic motions impinging on small-scale topography: Application to the Southern Ocean, *J. Physical Oceanography*, 2010, Vol. 40, No. 5, pp. 2025–2042, https://doi.org/10.1175/2010JPO4315.1.
25. Osborne A. R., Burch T. L., Scarlet R. I., The influence of internal waves on deep-water drilling, *J. Petroleum Technology*, 1978, Vol. 30, No. 10, Paper No. SPE-6913-PA, pp. 1497–1504, https://doi.org/10.2118/6913-PA.
26. Padman L., Erofeeva S. Y., Fricker H. A., Improving Antarctic tide models by assimilation of ICESat laser altimetry over ice shelves, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, No. 22, DOI: 10.1029/2008GL035592.
27. Ray R. D., A preliminary tidal analysis of ICESat laser altimetry: Southern Ross Ice Shelf, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, No. 2, https://doi.org/10.1029/2007GL032125.
28. Richter O., Gwyther D. E., King M. A., Galton-Fenzi B. K., Tidal modulation of Antarctic ice shelf melting, *The Cryosphere Discussions*, 2020, pp. 1–32, https://doi.org/10.5194/tc-2020-16.
29. Scott R. B., Goff J. A., Garabato A. C. N., Nurser A. J. G., Global rate and spectral characteristics of internal gravity wave generation by geostrophic flow over topography, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2011, Vol. 116, No. C9, DOI: 10.1029/2011JC007005.
30. Sloyan B. M., Spatial variability of mixing in the Southern Ocean, *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol. 32, No. 18, https://doi.org/10.1029/2005GL023568.
31. Woodson C. B., The fate and impact of internal waves in nearshore ecosystems, *Annual Review of Marine Science*, 2018, Vol. 10, pp. 421–441, https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121916-063619.
32. Wu L., Jing Z., Riser S., Visbeck M., Seasonal and spatial variations of Southern Ocean diapycnal mixing from Argo profiling floats, *Nature Geoscience*, 2011, Vol. 4, No. 6, pp. 363–366, DOI: 10.1038/ngeo1156.