Новые районы генерации короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых по данным Sentinel-1

И.Е.Козлов, А.В.Кузьмин

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: ik@mhi-ras.ru

Представлены результаты анализа поля короткопериодных внутренних волн (КВВ) в море Лаптевых, полученные в ходе обработки массива спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) Sentinel-1А/В за летне-осенний период 2020 г. На основе анализа 728 РЛИ выделено 1659 поверхностных проявлений КВВ, построены карты повторяемости КВВ и их основных пространственных характеристик. Большая часть проявлений КВВ зарегистрирована в конце летне-осеннего периода, что может быть связано как с более выраженной вертикальной стратификацией, так и большей площадью открытых ото льда областей. Показано, что наиболее интенсивная генерации КВВ в море Лаптевых происходит на бровке шельфа севернее Новосибирских о-вов и на выходе из Хатангского зал. Эти районы характеризуются интенсивными приливными течениями, максимальными для акватории моря значениями плотности баротропной приливной энергии и скорости её диссипации. Сравнение результатов наблюдений за 2011 и 2020 гг. показало, что основные районы концентрации проявлений КВВ повторяются, но стали значительно шире. Определён ряд новых районов устойчивой генерации КВВ в проливе Вилькицкого и на юго-восточном шельфе Карского моря, к западу от о. Котельный, над глубокой водой в юго-восточной части бассейна Амундсена, а также к северу от о. Новая Сибирь. В результате обработки спутниковых данных за 2020 г. выделено на порядок больше проявлений КВВ по сравнению с 2011 г., что подтверждает эффективность использования данных спутниковых РСА для выявления новых очагов образования КВВ и оценки их влияния на климат Арктики.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, приливные течения, спутниковые радиолокационные изображения, море Лаптевых, Северный Ледовитый океан

Одобрена к печати: 15.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-280-290

Введение

Море Лаптевых — окраинное море Северного Ледовитого океана (СЛО), характеризующееся активной генерацией полыней и морского льда в районах сибирского арктического шельфа, связанной с особенностями гидрологического режима акватории и интенсивными пресноводными стоками рек Лены и Хатанги.

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) — один из наиболее распространённых элементов динамической структуры океана, влияющий на горизонтальный и вертикальный перенос импульса, энергии и биогенных веществ за счёт активного перемешивания водных масс при обрушении этих волн. Результаты численного моделирования подтверждают важную роль внутренних приливных волн в интенсификации диапикнической диффузии и формировании климатических характеристик морей евразийского сектора СЛО (Каган, Тимофеев, 2020), включая процессы ледообразования и формирования полыней (Морозов, Писарев, 2004; Сагг et al., 2019). Интенсивное освоение мелководного шельфа арктических морей определяет возрастающую актуальность определения очагов генерации BB, их распространения, динамики и воздействия на гидрологический и ледовый режимы как шельфовых районов (Каган, Тимофеев, 2020; Свергун и др., 2020; Талипова и др., 2003; Kozlov et al., 2015а; Rippeth et al., 2017), так и глубоководной части СЛО (Fer et al., 2020).

Интенсивность генерации КВВ неразрывно связана с интенсивностью фоновых течений вообще и приливных течений в частности как в шельфовой зоне, так и на континентальном склоне (Marchenko et al., 2021; Zimin et al., 2016). Недавние натурные исследования показали,

что за последние 15 лет с 2004 по 2018 г. общая интенсивность течений и вертикального сдвига скорости в верхнем слое евразийского сектора СЛО существенно возросли (Polyakov et al., 2020), что становится благоприятным фактором для интенсификации образования КВВ и потенциального расширения районов их генерации в этом секторе Арктики.

Ранее на основе анализа данных спутникового радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) Envisat ASAR (*анел*. Advanced Synthetic Aperture Radar) за летний период 2011 г. уже была предпринята попытка исследования характеристик поля KBB в море Лаптевых (Зубкова и др., 2016; Kozlov et al., 2017). Несмотря на достаточно большой набор исходных данных (354 радиолокационных изображения (РЛИ) за май – октябрь 2011 г.), в ходе этих работ был выявлен всего 91 случай регистрации поверхностных проявлений (ПП) КВВ. Последнее объяснялось слабой приливной динамикой моря Лаптевых, обширным присутствием ледяного покрова на значительных участках акватории, а также неоднородным покрытием западной и восточной частей моря. Тем не менее даже этот скромный результат позволил выделить ло-кальные очаги регулярного образования КВВ в море Лаптевых.

В настоящей работе будут представлены результаты анализа более обширного массива спутниковых PCA-данных Sentinel-1A/B для акватории моря Лаптевых и смежных акваторий Карского и Восточно-Сибирского морей за летне-осенний период 2020 г. Основная цель работы состоит в возможном выявлении новых районов регулярного образования KBB и определении их характеристик на фоне изменившихся гидрологических условий моря Лаптевых при более детальном покрытии акватории спутниковой РЛ-съёмкой, а также в сравнении с более ранними результатами.

Данные и методы

Идентификация поверхностных проявлений КВВ и анализ их характеристик на акватории моря Лаптевых проводились на основе данных полярно-орбитальных спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, запущенных в 2014—2016 гг. В настоящей работе проведён анализ данных Sentinel-1A/B, полученных в С-диапазоне на смежных BB- и ГГ-поляризациях (вертикально-вертикальная и горизонтально-горизонтальная) сигнала при режимах съёмки IW (*англ*. Interferometric Wide Swath — интерферометрический широкозахватный) и EW (*англ*. ExtraWide — сверхширокозахватный) с разрешением 20 и 40 м соответственно. Периодичность съёмки в районе исследований составляет в среднем 1–2 дня.

На *рис. 1* (см. с. 282) приведены примеры поверхностных проявлений КВВ в спутниковых PCA-изображениях различных районов моря Лаптевых. Как правило, ПП КВВ имеют пакетную структуру и проявляются на морской поверхности (и на изображениях PCA) в виде одиночных или последовательных групп чередующихся светлых и тёмных полос (соответственно повышенного и пониженного относительно фона обратного рассеяния PCA-сигнала) когерентной структуры. На *рис. 1г* отмечены характеристики пакетов KBB, которые определялись в ходе работы: длина фронта лидирующей волны и ширина волнового пакета.

Обработка РЛИ, идентификация ПП КВВ и определение их характеристик проводились в программе ESA SNAP (*англ*. European Space Agency, Sentinel Application Platform), а дальнейший анализ полученных результатов и построение пространственных карт выполнялось в среде Mathworks ©Matlab в соответствии с методикой, описанной в работе (Kozlov et al., 2015b).

Всего в ходе исследования получено и обработано 728 РЛИ за период с 1 июля по 31 октября 2020 г. До начала июля и в первой декаде ноября 2020 г. значительные участки моря были закрыты льдом. Карта покрытия акватории моря Лаптевых спутниковой РСА-съёмкой отражена на *рис. 2* (см. с. 282).

Согласно *рис.* 2, покрытие района исследований РСА-съёмкой достаточно неравномерное: наибольшее количество снимков охватывает часть акватории вблизи северо-восточного побережья арх. Северная Земля (80–100 РЛИ) и восточнее п-ова Таймыр (70–80 РЛИ). Менее интенсивно покрыта область в районе Новосибирских о-вов и к северу от них (30–50 РЛИ), а также вблизи заливов (Анабарского, Хатангского, Оленекского и Янского).



Рис. 1. Примеры поверхностных проявлений пакетов КВВ в различных районах моря Лаптевых: *а* — севернее о. Котельный (22.07.2020, 21:53 UTC (*англ*. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время)); *б* — в Анабарском зал. (04.08.2020, 23:44 UTC); *в* — севернее м. Арктический (14.09.2020, 02:06 UTC); *е* — северо-западнее о. Котельный (05.10.2020, 22:17 UTC). Синяя кривая показывает положение лидирующего гребня КВВ, а красная — ширину пакета КВВ



Рис. 2. Покрытие акватории моря Лаптевых РЛ-съёмкой Sentinel-1 с 1 июля по 31 октября 2020 г. Серыми линиями показано положение изобат 50, 200 и 2000 м

Наименее охвачена РЛ-съёмкой центральная часть района исследований над континентальным склоном моря Лаптевых и глубоководные районы. Сравнение с результатами обработки данных прошлых лет (Зубкова и др., 2016; Kozlov et al., 2017) показывает, что и в 2011 г. покрытие РЛ-съёмкой было крайне неоднородным, со значительно большим количеством доступных данных для восточной части моря.

Результаты спутниковых наблюдений

В ходе исследования было обнаружено 1659 поверхностных проявлений КВВ за летне-осенний период 2020 г. При анализе 728 РЛИ района исследований было обнаружено, что большая часть проявлений приходится на сентябрь (685 ПП КВВ, ~41%), а наименьшая — на июль (225 ПП КВВ, ~14%). Это может быть связано с более выраженной вертикальной стратификацией, более благоприятными ветровыми условиям (см. *таблицу*) и значительными участками открытой воды в сентябре по сравнению с июлем и октябрём — факторами, способствующими более интенсивной генерации КВВ и их более эффективному наблюдению в спутниковых данных. В *таблице* отражена статистика распределения всех проанализированных данных и идентифицированных ПП КВВ с июля по октябрь 2020 г.

Согласно данным в *таблице*, ПП КВВ были выявлены в 9 % (62 РЛИ) от общего количества РЛИ. При этом 77 % от всех РЛИ содержали в той или иной мере участки акватории, покрытые льдом. В 47 % РЛИ скорость приводного ветра на значительных участках изображения превышала оптимальный диапазон для уверенной идентификации ПП КВВ. Таким образом, учитывая ограничения по ледовым и ветровым условиям, общий процент РЛИ, в которых потенциально могли быть идентифицированы ПП КВВ, существенно выше 9 % от всех РЛИ. В ряде районов, особенно вблизи м. Арктический (район 1) и на бровке шельфа к северу от Новосибирских о-вов (районы 3, 7, 8), на одном РЛИ встречались многочисленные проявления КВВ (>30 ПП КВВ на 1 РЛИ).

Месяц	Всего снимков	РЛИ с сильным ветром	РЛИ со льдом	Снимки с ПП КВВ	Количество снятых КВВ
Июль	207	165	163	11	225
Август	183	133	75	19	438
Сентябрь	185	138	29	21	685
Октябрь	153	128	73	11	311
Bcero:	728	564	340	62	1659

Количество спутниковых данных PCA Sentinel-1A/В и выделенных ПП КВВ с июля по октябрь 2020 г.

Общая карта распределения КВВ на акватории моря Лаптевых отражена на *рис. 3* (см. с. 284). Для удобства сравнения результатов наблюдений КВВ за 2011 и 2020 гг. на *рис. 3* показаны карты с положением лидирующих гребней КВВ за оба этих года. *Рисунок 3a* отражает распределение пакетов КВВ на акватории моря по данным 2011 г. (Зубкова и др., 2016; Kozlov et al., 2017), где авторы выделили четыре ключевых района генерации КВВ: восточнее о. Большевик, севернее арх. Северная Земля, на выходе из Хатангского зал., а также к северозападу от Новосибирских о-вов. На *рис. 3б* показана аналогичная карта с результатами 2020 г. Как видно из рисунка, в 2020 г. основные районы концентрации проявлений КВВ повторяются, но стали значительно обширнее. Это особенно заметно для области континентального склона к северу от о. Комсомолец (район 1 на *рис. 3a*) и бровки шельфа к северо-западу от о. Котельный (район 3 на *рис. 3a*). Кроме того, несложно выделить новые районы регулярной генерации КВВ (обозначены цифрами 5–8 на *рис. 3б*) — это южная и западная части пролива Вилькицкого и юго-восточный мелководный шельф Карского моря (район 5),

мелководный шельф к западу от о. Котельный (район 6), глубоководная область в северовосточной части района исследований (район 7), а также участок шельфа между глубинами 50 и 100 м к северу от о. Новая Сибирь (район 8). Отметим также группу пакетов КВВ, наблюдаемую над глубокой водой юго-западнее хр. Ломоносова.



Рис. 3. Карта общего положения лидирующих гребней волн в пакетах КВВ на акватории моря Лаптевых: *a* — в мае – октябре 2007 г.; *б* — в июле – октябре 2020 г.



Рис. 4. Пространственное распределение повторяемости наблюдений пакетов КВВ на акватории моря Лаптевых с июля по октябрь 2020 г.

Совпадение основных районов наблюдения КВВ в 2011 и 2020 гг. косвенно подтверждает ранее сделанный вывод о приливном характере образования наблюдаемых КВВ. Согласно полученным результатам, район наиболее интенсивной генерации КВВ располагается севернее Новосибирских о-вов. Это подтверждается картой повторяемости наблюдений КВВ на сетке размером 100×60 узлов (*puc. 4*, см. с. 284), рассчитанной в виде отношения суммарного количества ПП КВВ в каждом узле сетки к количеству PCA-съёмок этого узла за весь период наблюдений. Согласно данным приливной модели Arc5km2018 (Erofeeva, Egbert, 2020), эта область характеризуется максимальными для района исследований скоростями приливных течений, достигающими 0,7–0,8 м/с вдоль бровки шельфа и 1 м/с в прибрежной зоне к северу от о. Котельный (Fer et al., 2020).

Вторым по значимости считается район на выходе из Хатангского зал. к северо-западу и юго-востоку от о. Большой Бегичев, здесь повторяемость наблюдений KBB также достигает максимальных значений 0,5–0,7. Согласно данным приливных моделей Arc5km2018 и QUODDY-4 (Kagan, Timofeev, 2020), скорость приливных течений в этом районе может достигать 0,6–0,7 м/с. В этом же районе средняя плотность полной баротропной приливной энергии оказывается максимальной (>2000 Дж/м²) для акватории моря (Kagan, Timofeev, 2020). В обоих вышеуказанных районах наблюдаются максимальные для акватории моря Лаптевых значения скорости диссипации баротропной приливной энергии (Kagan, Timofeev, 2020; Kagan et al., 2008). Всё это хорошо укладывается в общие представления о генерации пакетов KBB по типу запрепятственных волн в результате взаимодействия интенсивных приливных течений с неоднородной топографией, в результате которого значительная часть приливной энергии уходит на образование пакетов нелинейных внутренних волн (Rippeth et al., 2017).

В новых районах 5–8 (см. *рис. 36*) значения повторяемости наблюдений КВВ близки и в среднем составляют 0,2–0,3, но в отдельных локальных точках достигают 0,4–0,5. Плотность баротропной приливной энергии в них находится в диапазоне 100–1000 Дж/м², а значения скорости диссипации баротропной приливной энергии также выше фона (Kagan et al., 2008).

Рассмотрим теперь некоторые особенности распределения отдельных пространственных характеристик КВВ. На *puc. 5* (см. с. 286) показано распределение средних значений длины лидирующего фронта КВВ (см. *puc. 5a*) и ширины пакета КВВ (см. *puc. 5b*), описывающих размеры пакетов КВВ в продольном и поперечном направлениях. Как видно из *puc. 5a*, более высокие средние значения длины фронта лидирующего гребня (далее — длина фронта) в пакетах КВВ, около 10–15 км, наблюдаются во всех районах севернее 76° с. ш. В южных районах моря Лаптевых они, как правило, не превышают 10–12 км и в среднем составляют 5–7 км. Для средних значений ширины пакета КВВ наблюдается аналогичная закономерность, за исключением района восточнее о. Комсомолец, где, как и в окрестности Хатангского зал., средняя ширина пакетов КВВ составляет около 0,5–1,5 км. Минимальные значения этого параметра наблюдаются в прибрежных районах стока рек Анабар, Лены, Хатангы и Оленек. В остальных, более северных районах моря среднее значение этого параметра составляет около 2–2,5 км.

Гистограммы распределения обоих параметров показаны на *рис. 6* (см. с. 286). Пиковое значение для длины фронта составляет около 10 км, а максимальные достигают 40–50 км и наблюдаются над континентальным склоном к северу от Новосибирских о-вов, в проливе Вилькицкого и нескольких локальных районах в северо-западной части моря Лаптевых (см. *рис. 5а*). Для ширины пакета КВВ пиковое значение составляет 1,5 км, а максимальные значения доходят до 8-11 км и наблюдаются примерно в тех же районах. Отметим, что наблюдаемые значения ширины пакетов КВВ в море Лаптевых хорошо согласуются с их размерами в Карском море, тогда как средние значения длины фронта лидирующих волн в Карском море были в несколько раз больше (Kozlov et al., 2015b).

В целом отмеченные пространственные различия в средних значениях обоих параметров могут говорить о разнице в морфометрических характеристиках дна в районах генерации КВВ и времени жизни наблюдаемых пакетов КВВ. Логично предположить, что генерация пакетов КВВ с большей (меньшей) длиной лидирующего гребня должна происходить на более протяжённых склонах (подводных горах, порогах и т. п.). Ширина пакетов КВВ определяется межсолитонным расстоянием (иначе — длиной волны отдельных солитонов), а также их количеством. Для пакетов КВВ, образованных по типу запрепятственных волн, первый параметр, прежде всего, зависит от горизонтального масштаба препятствия, а второй — от времени жизни волнового пакета. Таким образом, можно предположить, что более высокие относительно фона значения ширины пакетов КВВ должны наблюдаться в районах с более протяжёнными неоднородностями морского дна либо на некотором удалении от предполагаемых мест генерации.



Рис. 5. Пространственное распределение характеристик КВВ на акватории моря Лаптевых с июля по октябрь 2020 г.: *а* — длина фронта лидирующего гребня в пакете КВВ; *б* — длина пакета КВВ



Рис. 6. Гистограммы распределения характеристик КВВ в море Лаптевых с июля по октябрь 2020 г.: *а* — распределение значений средней длины фронта лидирующего гребня КВВ в пакете, *б* — распределение значений средней длины пакета КВВ

Заключение

В работе представлены результаты анализа поля короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых, полученные в ходе обработки массива спутниковых изображений Sentinel-1A/В за летне-осенний период 2020 г. На основе анализа 728 РЛИ выделено 1659 поверхностных проявлений КВВ, построены карты повторяемости КВВ и их основных пространственных характеристик.

Большая часть проявлений КВВ зарегистрирована в сентябре, что может быть связано с более выраженной вертикальной стратификацией, благоприятными ветровыми условиями и большей площадью открытых ото льда областей — факторами, способствующими более интенсивной генерации КВВ и их более эффективному наблюдению в спутниковых данных.

Полученный результат, основанный на значительном количестве наблюдений, однозначно показывает, что наиболее интенсивная генерация КВВ в море Лаптевых происходит на бровке шельфа севернее Новосибирских о-вов и на выходе из Хатангского зал. Эти районы характеризуются интенсивными приливными течениями, максимальными для акватории моря значениями плотности баротропной приливной энергии и скорости её диссипации.

Сравнение результатов наблюдений за 2011 и 2020 гг. показало, что основные районы концентрации проявлений КВВ повторяются, но стали значительно шире. При этом выделен ряд новых районов устойчивой генерации КВВ в проливе Вилькицкого и на юго-восточном шельфе Карского моря, к западу от о. Котельный, над глубокой водой в юго-восточной части бассейна Амундсена, а также к северу от о. Новая Сибирь. По результатам обработки спутниковых данных за 2020 г. выделено на порядок больше проявлений КВВ по сравнению с 2011 г. С одной стороны, это может быть объяснено более высоким пространственным разрешением данных Sentinel-1 по сравнению с данными Envisat ASAR. С другой стороны, полученный результат может быть обусловлен формированием в последние годы более благоприятных для генерации КВВ гидрологических и ледовых условий в результате так называемой «атлантификации» евразийского сектора Арктики (Polyakov et al., 2017). При этом более интенсивная генерация КВВ может, в свою очередь, привести к интенсификации перемешивания и вертикальных потоков тепла к нижней границе льда, способствуя, таким образом, увеличению площади безлёдных участков и наблюдению КВВ из космоса. В таком ключе используемый подход и полученные результаты могут служить основой для выявления новых очагов образования КВВ и оценки их влияния на климат Арктики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00278. Спутниковые данные Sentinel-1А/В были получены из архивов системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus Open Access Hub (https://scihub.copernicus.eu).

Литература

- 1. Зубкова Е. В., Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н. Наблюдение короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых на основе спутниковых радиолокационных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 99–109. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-99-109.
- 2. *Каган Б.А., Тимофеев А.А.* Динамика и энергетика полусуточных приливов в море Лаптевых: результаты высокоразрешающего моделирования поверхностного прилива М2 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 1. С. 15–23. DOI: 10.7868/S2073667320010025.
- 3. *Морозов Е. Г., Писарев С. В.* Внутренние волны и образование полыней в море Лаптевых // Докл. Российской акад. наук. 2004. Т. 398. № 2. С. 255–258.
- 4. *Свергун Е. И., Зимин А. В., Атаджанова О. А., Жегулин Г. В., Романенков Д. А., Коник А. А., Козлов И. Е.* Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне Баренцева моря по данным контактных и спутниковых наблюдений // Фундам. и приклад. гидрофизика. 2020. Т. 13. № 4. Р. 78–86. DOI: 10.7868/S2073667320040073.

- 5. *Талипова Т. Г., Полухин Н. В., Куркин А.А., Лавренов И.В.* Моделирование трансформации солитонов внутренних волн на шельфе моря Лаптевых // Изв. Акад. инженерных наук им. А. М. Прохорова. Сер.: Приклад. математика и механика. 2003. № 4. С. 3–16.
- 6. Carr M., Sutherland P., Haase A., Evers K. U., Fer I., Jensen A., Kalisch H., Berntsen J., Parau E., Thiem O., Davies P.A. Laboratory Experiments on Internal Solitary Waves in Ice-Covered Waters // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. No. 21. P. 12230–12238. DOI: 10.1029/2019GL084710.
- 7. *Erofeeva S.*, *Egbert G.* Arc5km2018: Arctic Ocean Inverse Tide Model on a 5 kilometer grid, 2018. Arctic Data Center, 2020. DOI: 10.18739/A21R6N14K.
- 8. *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. Part. No. e2020GL088083. 10 p. DOI: 10.1029/2020GL088083.
- 9. *Kagan B.A., Timofeev A.A.* High-Resolution Modeling of Semidiurnal Internal Tidal Waves in the Laptev Sea in the Ice-Free Period: Their Dynamics and Energetics // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2020. V. 56. P. 512–521. DOI: 10.1134/S0001433820050047.
- 10. *Kagan B.A., Romanenkov D.A., Sofina E. V.* Tidal ice drift and ice-generated changes in the tidal dynamics/ energetics on the Siberian Continental Shelf // Continental Shelf Research. 2008. V. 28. No. 3. P. 351–368.
- Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., Atadzhanova O., Zimin A., Romanenkov D., Myasoedov A., Chapron B. (2015a) SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2015. P. 947–949.
- 12. *Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Zubkova E. V., Zimin A. V., Chapron B.* (2015b) 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.
- 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. V. 14. No. 11. P. 2047– 2051. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2749681.
- 14. *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.
- Polyakov I. V., Pnyushkov A. V., Alkire B., Bauman M., Carmack C., Goszczko I., Guthrie J. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. 2017. V. 356. No. 6335. P. 285–291. DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Polyakov I. V., Rippeth T. P., Fer I., Baumann T. M., Carmack E. C., Ivanov V. V., Janout M., Padman L., Pnyushkov A. V., Rember R. Intensification of Near-Surface Currents and Shear in the Eastern Arctic Ocean // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. No. 16. Art. No. e2020GL089469. 9 p. DOI: 10.1029/2020GL089469.
- Rippeth T. P., Vlasenko V., Stashchuk N., Scannell B. D., Green J. A. M., Lincoln B. J., Bacon S. Conversion and mixing poleward of the critical latitude (an Arctic case study) // Geophysical Research Letters. 2017. V. 44. No. 24. P. 12349–12357. DOI: 10.1002/2017GL075310.
- Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O.A., Chapron B. Monitoring short-periodinternal waves in the White Sea // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. V. 52. No. 9. P. 951–960. DOI: 10.1134/ S0001433816090309.

New regions of short-period internal wave generation in the Laptev Sea revealed from Sentinel-1 data

I.E. Kozlov, A.V. Kuzmin

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mail: ik@mhi-ras.ru

The paper presents the results of the analysis of short-period internal waves (SIWs) in the Laptev Sea obtained during processing of Sentinel-1A/B satellite imagery for the summer-autumn period of 2020. Based on the analysis of 728 radar images, 1659 surface manifestations of SIWs were identified, maps of the SIW probability and their main spatial characteristics were plotted. Most of the SIW manifestations were recorded at the end of the summer-autumn period, which could be associated with both

more pronounced vertical stratification and a larger ice-free area. It is shown that the most intense SIW generation in the Laptev Sea occurs at the shelf break region north of the New Siberian Islands and at the exit from the Khatanga Bay. These areas are characterized by intense tidal currents, and the highest values of barotropic tidal energy density and its dissipation rate. Comparison of the results of observations for 2011 and 2020 showed that the main areas of concentration of SIW manifestations are similar, but have become much wider. A number of new areas of stable SIW generation have been identified in the Vilkitsky Strait and on the southeastern shelf of the Kara Sea, to the west of Kotelny Island, above deep water in the southeastern part of the Amundsen Basin, as well as to the north of Novaya Sibir Island. As a result of satellite data processing for 2020, an order of magnitude more SIW manifestations were identified compared to 2011, which confirms the effectiveness of using satellite SAR data to identify new regions of SIW formation and assess their impact on the Arctic climate.

Keywords: short-period internal waves, tidal currents, satellite radar images, Laptev Sea, Arctic Ocean

Accepted: 15.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-280-290

References

- 1. Zubkova E. V., Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Spaceborne SAR observations of short-period internal waves in the Laptev Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 99–109 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-99-109.
- Kagan B.A., Timofeev A.A., Dynamics and energetics of tides in the Laptev Sea: the results of high-resolving modeling of the surface semidiurnal tide M2, *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2020, Vol. 13, No. 1, pp. 15–23 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667320010025.
- 3. Morozov E.G., Pisarev S.V., Internal waves and polynya formation in the Laptev Sea, *Doklady Earth Sciences*, 2004, Vol. 398, No. 7, pp. 983–986.
- Svergun E. I., Zimin A. V., Atadzhanova O. A., Zhegulin G. V., Romanenkov D. A., Konik A. A., Kozlov I. E., Short-Period Internal Waves in the Coastal Zone of the Barents Sea According to Expedition and Satellite Observation, *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 2020, Vol. 13, No. 4, pp. 78–86 (in Russian), DOI: 10.7868/S2073667320040073.
- 5. Talipova T. G., Polukhin N. V., Kurkin A.A., Lavrenov I. V., Modeling the transformation of internal wave solitons on the Laptev Sea shelf, *Izvestiya Akademii inzhenernykh nauk im. A. M. Prokhorova. Ser.: Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2003, No. 4, pp. 3–16 (in Russian).
- Carr M., Sutherland P., Haase A., Evers K. U., Fer I., Jensen A., Kalisch H., Berntsen J., Parau E., Thiem O., Davies P.A., Laboratory Experiments on Internal Solitary Waves in Ice-Covered Waters, *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, No. 21, pp. 12230–12238, DOI: 10.1029/2019GL084710.
- 7. Erofeeva S., Egbert G., *Arc5km2018: Arctic Ocean Inverse Tide Model on a 5 kilometer grid*, *2018*, Arctic Data Center, 2020, DOI: 10.18739/A21R6N14K.
- 8. 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, Art. No. e2020GL088083, 10 p., DOI: 10.1029/2020GL088083.
- 9. Kagan B.A., Timofeev A.A., High-Resolution Modeling of Semidiurnal Internal Tidal Waves in the Laptev Sea in the Ice-Free Period: Their Dynamics and Energetics, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, Vol. 56, pp. 512–521, DOI: 10.1134/S0001433820050047.
- 10. Kagan B.A., Romanenkov D.A., Sofina E.V., Tidal ice drift and ice-generated changes in the tidal dynamics/energetics on the Siberian Continental Shelf, *Continental Shelf Research*, 2008, Vol. 28, No. 3, pp. 351–368.
- 11. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E., Atadzhanova O., Zimin A., Romanenkov D., Myasoedov A., Chapron B. (2015a), SAR observations of internal waves in the Russian Arctic seas, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2015, pp. 947–949.
- 12. Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Zubkova E. V., Zimin A. V., Chapron B. (2015b), Characteristics of shortperiod 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.
- 13. 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.
- 14. 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.

- 15. Polyakov I. V., Pnyushkov A. V., Alkire B., Bauman M., Carmack C., Goszczko I., Guthrie J., Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean, *Science*, 2017, Vol. 356, No. 6335, pp. 285–291, DOI: 10.1126/science.aai8204.
- Polyakov I. V., Rippeth T. P., Fer I., Baumann T. M., Carmack E. C., Ivanov V. V., Janout M., Padman L., Pnyushkov A. V., Rember R., Intensification of Near-Surface Currents and Shear in the Eastern Arctic Ocean, *Geophysical Research Letters*, 2020, Vol. 47, No. 16, Art. No. e2020GL089469, 9 p., DOI: 10.1029/2020GL089469.
- 17. Rippeth T. P., Vlasenko V., Stashchuk N., Scannell B. D., Green J. A. M., Lincoln B. J., Bacon S., Tidal conversion and mixing poleward of the critical latitude (an Arctic case study), *Geophysical Research Letters*, 2017, Vol. 4, No. 24, pp. 12349–12357, DOI: 10.1002/2017GL075310.
- Zimin A. V., Kozlov I. E., Atadzhanova O. A., Chapron B., Monitoring short-period internal waves in the White Sea, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 951–960, DOI: 10.1134/ S0001433816090309.