

## Наблюдение короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых на основе спутниковых радиолокационных измерений

Е.В. Зубкова<sup>1</sup>, И.Е. Козлов<sup>1,2</sup>, В.Н. Кудрявцев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Российский государственный гидрометеорологический университет  
Санкт-Петербург, 195196, Россия*

<sup>2</sup>*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mails: igor.eko@gmail.com, shigatsi@rshu.ru*

Представлены результаты наблюдения короткопериодных внутренних волн (КВВ) в море Лаптевых, полученные на основе анализа измерений спутникового радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) Envisat ASAR за период с мая по октябрь 2011 г. Анализ 354 радиолокационных изображений (РЛИ) позволил выделить 91 проявление внутренних волн, определить основные районы их распространения и построить карты их основных характеристик. Показано, что ключевые районы наблюдения внутренних волн находятся над континентальным склоном к востоку от о-ва Малый Таймыр и к северо-западу от о-ва Котельный, к востоку от о-ва Большой Бегичев на выходе из Хатангского залива, а также вблизи м. Арктический. Примерно 70% всех наблюдений КВВ приходится на область внешнего шельфа моря Лаптевых, в то время как максимальное количество наблюдений КВВ зарегистрировано в районе к востоку от Хатангского залива. Самые крупные пакеты КВВ зарегистрированы западнее о-вов Бельковский и Столбовой, а также к востоку от о-ва Малый Таймыр. Отмечается, что районы регулярного наблюдения КВВ совпадают с областью системы полыней моря Лаптевых, где внутренние волны приливного периода могут служить одним из основных механизмов формирования запирающих полыней.

**Ключевые слова:** короткопериодные внутренние волны, спутниковые радиолокационные изображения, море Лаптевых

*Одобрена к печати: 04.10.2016  
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-99-109*

Внутренние волны приливного происхождения играют важную роль в изменчивости динамической структуры океана, а их изучение имеет важное прикладное значение для подводного мореплавания и решения акустических задач (Коняев, Сабинин, 1992). В последние годы наблюдается неизменный рост интереса отечественных и зарубежных специалистов к проблеме исследования внутренних волн в Арктике (Морозов и др., 2002; Талипова и др., 2003; Vlasenko et al., 2003; Козлов и др., 2014; Kozlov et al., 2015; Rippeth et al., 2015). Результаты недавних экспериментальных исследований показали, что генерация внутренних волн баротропным приливом над крутыми участками континентального склона приводит к интенсификации турбулентного перемешивания и может стимулировать передачу тепла атлантических вод к поверхности (Rippeth et al., 2015), оказывая тем самым существенное влияние на климатическую систему Северного Ледовитого океана (СЛО). В работах (Dewey et al., 1999; Zakharchuk, 1999; Dmitrenko et al., 2011) показано, что этот эффект является существенным также и для континентального склона моря Лаптевых.

Море Лаптевых – одно из окраинных морей СЛО, является одним из ключевых районов образования полыней и экспорта льда на акватории сибирского арктического шельфа. Гидрологический режим моря характеризуется сильным влиянием пресноводного стока Лены. На акватории моря хорошо выражены приливные колебания, величина прилива составляет около 0,5 м, и только в Хатангском заливе приливные колебания уровня превышают 2 м (Добровольский, Залогин, 1982).

С точки зрения исследования короткопериодных внутренних волн (КВВ), акватория моря Лаптевых является малоизученной. Единственным доступным исследованием, в котором приводятся результаты наблюдения КВВ на основе анализа контактных измерений, является работа (Zakharchuk, 1999). Анализ измерений температуры и солености для северной части моря Лаптевых показал существование хорошо выраженных короткопериодных внутренних волн в сезонном пикноклине на глубинах 15–25 м с периодами от 2 до 15 минут (Zakharchuk, 1999). Кроме этого, в районах измерений также наблюдались характерные проявления внутренних волн на морской поверхности.

В работах (Красильщиков и др., 2003; Талипова и др., 2003; Grimshaw et al., 2004) на основе модельных расчетов исследованы кинематические характеристики, генерация и трансформация уединенных внутренних волн, а также особенности их поверхностных проявлений на трех меридиональных разрезах моря Лаптевых. В этих работах показано, что на шельфе моря Лаптевых может происходить генерация солитонов внутренних волн с амплитудой 4–8 м, которые по мере распространения в мелководную часть моря могут менять свою полярность и приводить к генерации цугов интенсивных короткопериодных внутренних волн. В работе (Морозов, Писарев, 2004) на основе численной модели исследована генерация внутренних приливных волн при трансформации баротропного прилива над материковым склоном и их связь с образованием полыней в море Лаптевых. В этой работе показано, что амплитуда волновых колебаний над склоном может достигать 10 м, а внутренний прилив трансформируется в высокочастотные внутренние волны, распространяющиеся в сторону открытого моря.

Таким образом, проведенные ранее исследования показывают возможность существования КВВ на шельфе моря Лаптевых, но по объективным причинам не дают полной картины об основных очагах их генерации, пространственных характеристиках и особенностях распространения. При этом весьма ценную информацию о поле внутренних волн можно получить на основе измерений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), ставших с недавнего времени «стандартным» инструментом изучения океанских внутренних волн из космоса (Дубина, Митник, 2007; Козлов и др., 2010; Лаврова и др., 2009, 2011; Kozlov et al., 2014).

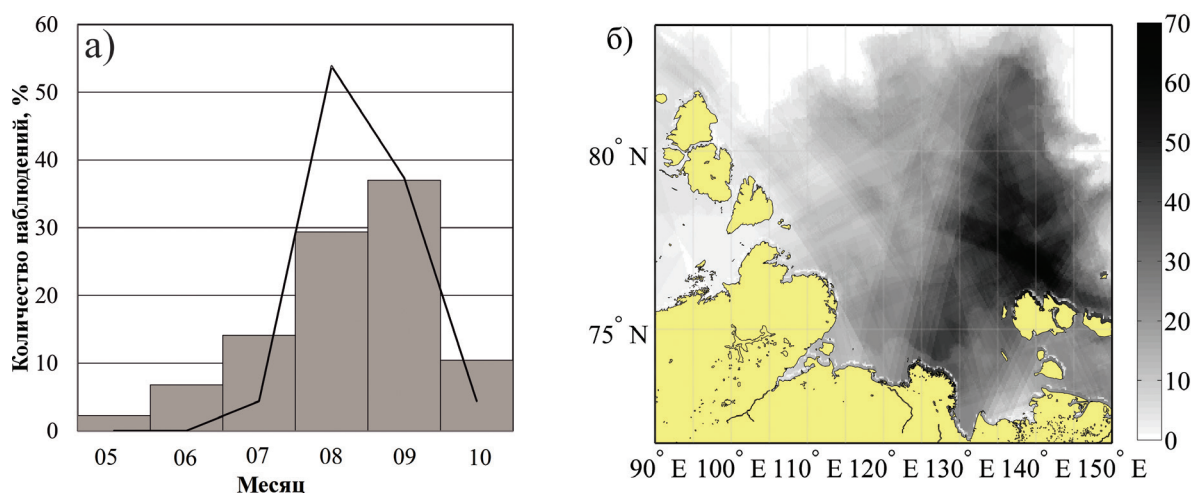
В настоящей работе впервые на основе анализа обширного массива спутниковых радиолокационных изображений за летне-осенний период 2011 года представлены результаты анализа поля КВВ в море Лаптевых. Определены основные районы наблюдения внутренних волн, частота их наблюдения в отдельных районах моря, а также основные пространственные характеристики.

### **Данные и метод**

Для анализа пространственной изменчивости поля КВВ в море Лаптевых использовались изображения спутникового радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА)

Envisat ASAR в режиме съемки Wide Swath Mode с пространственным разрешением  $150 \times 150$  м при различной поляризации РСА сигнала. Спутниковые изображения были получены из роллинг-архива Европейского космического агентства (ЕКА). Анализ и идентификация внутренних волн в изображениях РСА проводились на основе программного обеспечения INTERWAVE (Козлов, Мясоедов, 2012). Всего за период с мая по октябрь 2011 г. было проанализировано 354 РЛИ.

Основное количество снимков, используемых в анализе, приходится на август (30% от всех РЛИ) и сентябрь (~40% от всех РЛИ) – месяцы, когда акватория наиболее открыта ото льда. На *рис. 1* представлена информация о покрытии района исследований спутниковой съемкой.



*Рис. 1. Основные характеристики спутниковых РЛ-наблюдений ВВ в море Лаптевых. а) гистограмма временного распределения спутниковых РЛИ и идентифицированных пакетов КВВ, количество доступных РЛИ показано столбцами, количество выделенных пакетов ВВ – черной кривой; б) карта покрытия свободной ото льда акватории моря Лаптевых спутниковой РЛ-съемкой с мая по октябрь 2011 г.*

Как видно из *рис. 1б*, показывающего эффективное покрытие РСА съемкой открытых ото льда участков морской поверхности, акватория моря покрыта неравномерно. На западную часть приходится около 15–20 РЛИ на единицу площади морской поверхности, на восточную часть моря – около 50 РЛИ, максимум (60–70 РЛИ) приходится на участок к северо-западу от Новосибирских островов. Такое неравномерное покрытие акватории объясняется особенностями ледового режима изучаемого моря, а также значительно большим количеством доступных РЛИ для его восточной части.

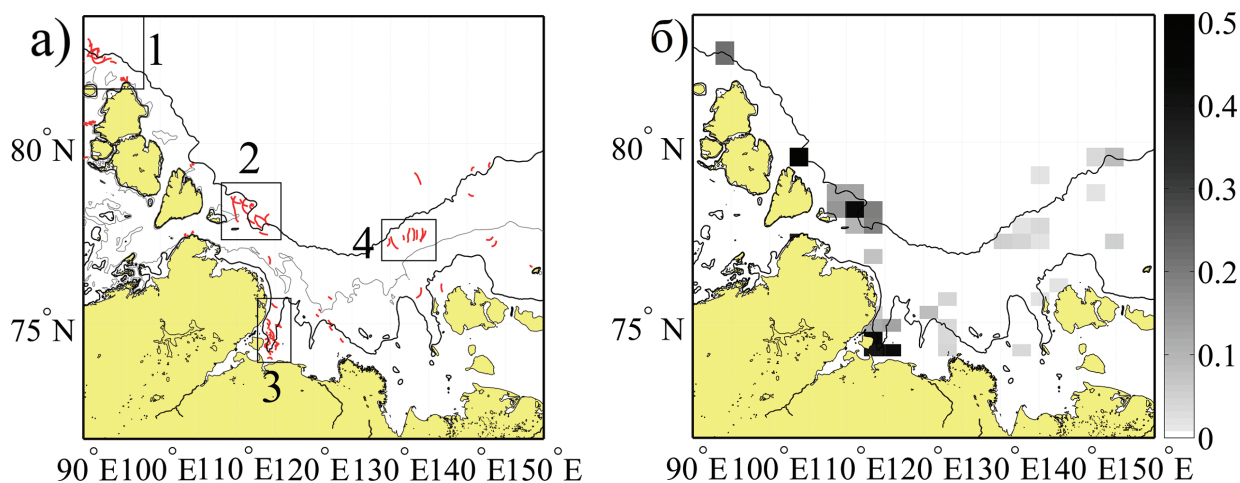
### Результаты спутниковых РСА наблюдений внутренних волн в море Лаптевых

В ходе обработки 354 спутниковых изображений был идентифицирован 91 пакет внутренних волн. Основная часть зарегистрированных КВВ приходится на август и сентябрь (~90%), когда большая часть акватории моря была свободна ото льда, в июле и октяб-

ре их количество минимально, а в мае–июне волны не наблюдались. Как правило, проявления КВВ на РЛИ наблюдались в виде групп (пакетов) из нескольких волн с характерным уменьшением расстояния между ними в сторону тыла пакета, одиночные солитоны наблюдались редко. Регулярность наблюдения пакетов внутренних волн в отмеченных ниже районах позволяет сделать предположение о приливном характере их образования. В ряде случаев на РЛИ наблюдались последовательные пакеты внутренних волн, предположительно имеющих один и тот же район генерации.

Отметим, что общее количество внутренних волн, зарегистрированных в море Лаптевых за один летне-осенний период, значительно меньше, чем, например, для акватории соседних морей – Баренцева (Козлов и др., 2010, 2014), Белого (Kozlov et al., 2014) и Карского (Kozlov et al., 2015), что, по-видимому, объясняется более слабыми внутренними приливами в море Лаптевых (Kowalik, Proshutinsky, 1994; Морозов и др., 2002) и меньшей суммарной за период наблюдений площадью открытых ото льда участков моря.

На *рис. 2а* представлена обобщенная карта пространственного распределения гребней лидирующих волн в пакетах КВВ на акватории моря Лаптевых. Как видно из рисунка, внутренние волны распределены на акватории моря неравномерно, значительная их часть расположена вблизи континентального склона над бровкой шельфа, в глубоководной части моря (глубины >300–400 м) проявления КВВ не наблюдались. Можно выделить четыре ключевых района наблюдения КВВ (отмечены цифрами на *рис. 2а*: области над континентальным склоном к северо-западу от м. Арктический (район 1), восточнее о-ва Малый Таймыр (район 2), северо-западнее о-ва Котельный (район 4), а также к востоку от о-ва Большой Бегичев на выходе из Хатангского залива (район 3). Примерно 30% всех наблюдений КВВ приходится на район 3 вблизи Хатангского залива. Как уже отмечалось в работе (Kozlov et al., 2015), район 1, расположенный севернее м. Арктический на границе морей Карского и Лаптевых, по-видимому, является одним из наиболее северных районов регулярного наблюдения КВВ в Арктике.



*Рис. 2. Пространственное распределение внутренних волн на акватории моря Лаптевых по результатам спутниковой РСА съемки за май–октябрь 2011 г. а) положение гребней внутренних волн; б) относительная частота встречаемости КВВ в спутниковых РЛИ. На карты нанесены изобаты 25 м, 50 м и 300 м ИВСаО 3.0 (Jakobsson et al., 2012)*

На *рис. 2б* показано пространственное распределение относительной частоты встречаемости проявлений внутренних волн в РЛИ моря Лаптевых, определяемой в виде отношения общего количества наблюдений ВВ в заданном районе моря к количеству РСА съемок данного района в безледный период. Как видно из *рис. 2б*, максимальное значение этого параметра (0,5) наблюдается в районах 2–3, в районе 1 относительная частота составляет около 0,25, минимальное значение (~0,1) соответствует району 4. Однако для районов 1–3 в западной части моря эта оценка является предварительной, т.к. общее количество РСА измерений здесь невелико (около 15). Отметим, что внутренние волны также наблюдались в прол. Вилькицкого и севернее о-ва Большевик, но малое количество доступных РЛИ не позволяет сделать вывода о регулярном характере их генерации в этих районах. В других районах моря ВВ наблюдались менее регулярно, среднее значение относительной частоты составило 0,1 (т.е. один случай регистрации КВВ на 10 изображений РСА). Важно заметить, что большинство выделенных нами районов наблюдения КВВ располагается в области системы полыней моря Лаптевых, где, согласно работе (Морозов, Писарев, 2004), внутренние волны приливного периода являются постоянным механизмом формирования заприпайных полыней.

В *табл. 1* приведены статистические параметры некоторых характеристик внутренних волн. Обычно ВВ наблюдались в виде пакетов, в среднем по 2–3 (макс. – 10) волны в пакете, при средней ширине пакета около 1,5 км. Средняя длина волны в пакетах составляет около 0,7 км, максимальное значение – 1,7 км. Среднее наблюдаемое значение длины фронта и площади пакетов КВВ составляет около 20 км и 40 км<sup>2</sup> соответственно, но для самых крупных пакетов значения этих параметров достигают 70 км и 250 км<sup>2</sup>.

Таблица 1. Статистические характеристики основных параметров КВВ в море Лаптевых по данным спутниковых РСА наблюдений в летне-осенний период 2011 г.

<i>Параметр ВВ</i>	<i>Максимум</i>	<i>Минимум</i>	<i>Среднее</i>	<i>Медиана</i>
максимальная длина волны, км	1,67	0,30	0,66	0,55
длина гребня лидирующей волны, км	71,95	4,19	19,88	17,15
ширина пакета, км	5,76	0,40	1,53	1,17
площадь пакета, км <sup>2</sup>	247,75	2,59	37,78	17,70

На *рис. 3* представлены карты пространственного распределения основных параметров КВВ, указанные в *табл. 2*. Как видно из *рис. 3а*, пакеты КВВ с длинами волн внутри пакетов более 1,4 км наблюдались к востоку от п-ова Таймыр и о-ва Большевик. Вблизи устья р. Хатанга длина волны в пакетах КВВ варьировалась от 0,3 до 0,7 км, к северо-западу от Новосибирских о-вов наблюдались длины волн до 1,2 км.

Как правило, на акватории моря наблюдались цуги КВВ с длиной гребня лидирующей волны 15–30 км, более крупные пакеты с длиной гребня 40 км и более наблюдались к западу и северо-западу от о-ва Котельный и восточнее о-ва Большевик, там же зарегистрировано максимальное значение – 72 км (см. *рис. 3б*). Самые крупные по площади пакеты КВВ зарегистрированы в восточной части моря к западу от о-ва Бельковский (247 км<sup>2</sup>),



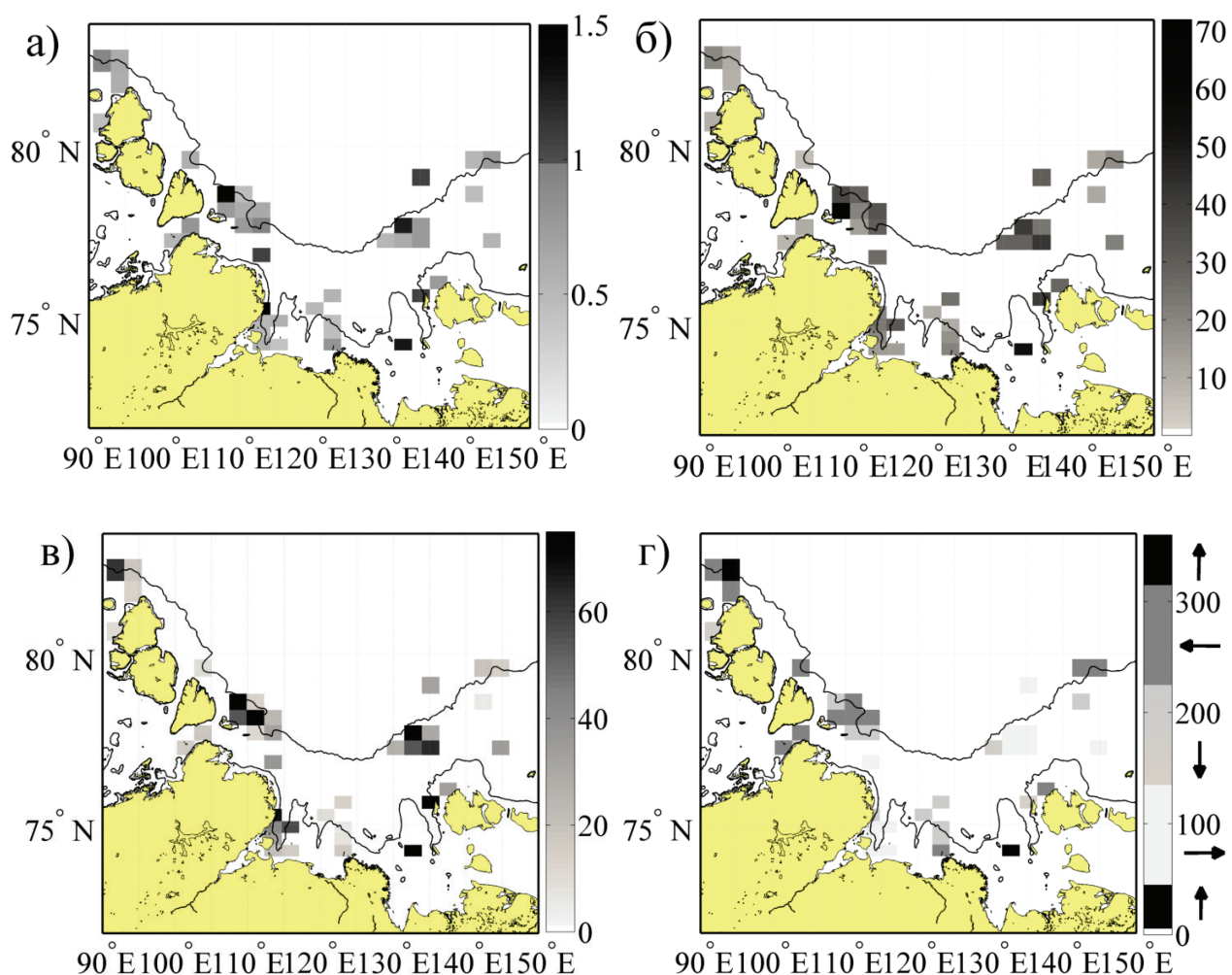


Рис. 3. Пространственное распределение основных параметров внутренних волн на акватории моря Лаптевых. а) максимальная длина волн в пакетах КВВ (км); б) длина гребня лидирующей волны (км); в) площадь пакетов КВВ (км<sup>2</sup>); г) направления распространения КВВ. На карты нанесены изобаты 25 м и 300 м

к западу от о-ва Столбовой (~150 км<sup>2</sup>), а также восточнее о-ва Малый Таймыр (~160 км<sup>2</sup>). Большинство пакетов имеет площадь менее 100 км<sup>2</sup> (рис. 3в).

На рис. 3г показана карта пространственного распределения направлений распространения внутренних волн на акватории моря (направление указано относительно направления на север). Как видно из рис. 3г, для каждого отдельного района моря можно выделить свое преобладающее направление. Так, например, вблизи устья р. Хатанга внутренние волны распространяются в северо-восточном направлении, в устьевой области р. Лена – на юго-запад; в пр. Вилькицкого, восточнее и севернее о-ва Большевик преобладает западное направление; над континентальным склоном к северо-западу от Новосибирских о-вов внутренние волны распространяются на восток.

Согласно спутниковым наблюдениям, на внешнем шельфе моря Лаптевых внутренние волны чаще всего распространяются поперек изобат в сторону берега. На рис. 4 показан пример проявления последовательных пакетов КВВ в районе 2 к востоку от о-ва Малый Таймыр, направленных на запад в сторону берега. Согласно рис. 4б, расстояние между

последовательными цугами внутренних волн составляет около 21 км. Поскольку основной энергонесущей приливной частотой в море Лаптевых является частота  $M_2$  (см. например, Kowalik, Proshutinsky, 1994), уместно предположить, что наблюдаемые пакеты внутренних волн образуются также с частотой лунного полусуточного прилива (т.е. каждые 12,4 ч). Измеряя расстояние между последовательными пакетами КВВ и принимая, что время между моментами их генерации составляет 12,4 ч, несложно оценить скорость распространения наблюдаемых внутренних волн. В этом случае ее значение составит  $\sim 0,5$  м/с. Отметим, что полученное нами значение фазовой скорости КВВ хорошо согласуется с наблюдаемым значением (0,55 м/с), полученным для этого же района на основе контактных измерений (Zakharchuk, 1999). Таким образом, описанный выше простой подход дает весьма неплохой результат и может быть использован для оценки фазовой скорости КВВ на основе спутниковых измерений.

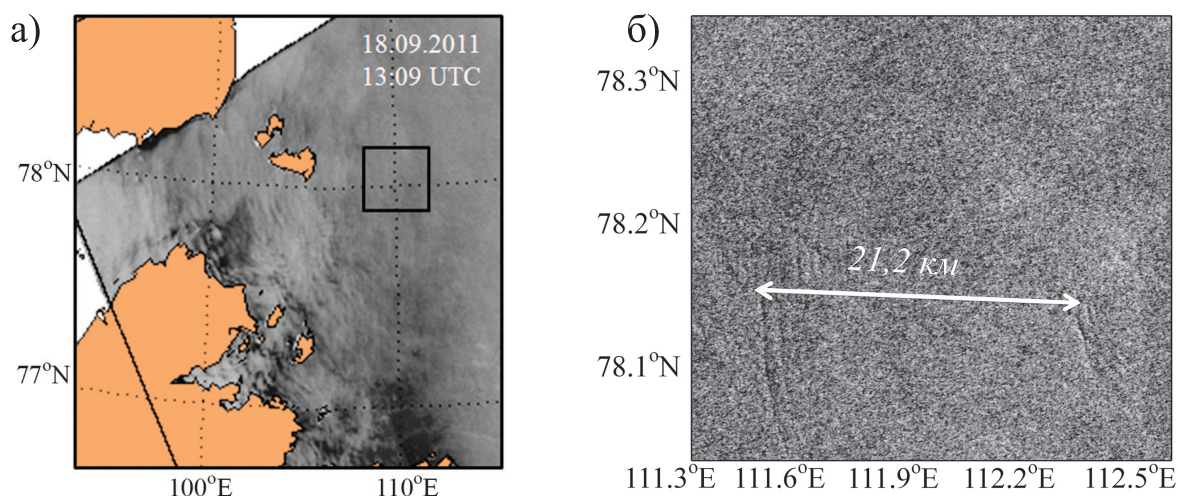


Рис. 4. Пример проявления пакетов внутренних волн в районе 2 к востоку от о-ва Малый Таймыр на РЛИ Envisat ASAR от 18.09.2011 г. (13:09 UTC). а) карта северо-западной части моря Лаптевых с отмеченным положением фрагмента РЛИ; б) увеличенный фрагмент РЛИ с проявлением внутренних волн, движущихся в сторону берега © ESA

На внутреннем шельфе внутренние волны распространяются как в сторону берега, так и в сторону открытого моря. Так, например, в шельфовой области вблизи дельты р. Лена пакеты КВВ направлены к берегу, в то время как результаты модельных расчетов прогнозируют их распространение в сторону открытого моря (Морозов, Писарев, 2004). Пакеты внутренних волн, направленные в открытое море, наблюдались только в районе 3 вблизи Хатангского залива (рис. 5). На рис. 5 показаны увеличенные фрагменты РЛИ Envisat ASAR от 3 августа 2011 г. с характерными проявлениями цугов КВВ, направленных на северо-восток со стороны Анабарского залива. В этом районе расстояния между последовательными пакетами КВВ составили 6–24 км, что в терминах фазовой скорости дает значения 0,15–0,5 м/с. Аналогичные оценки фазовой скорости были получены в работе (Талипова и др., 2003) на основе численной модели для этой части моря Лаптевых.

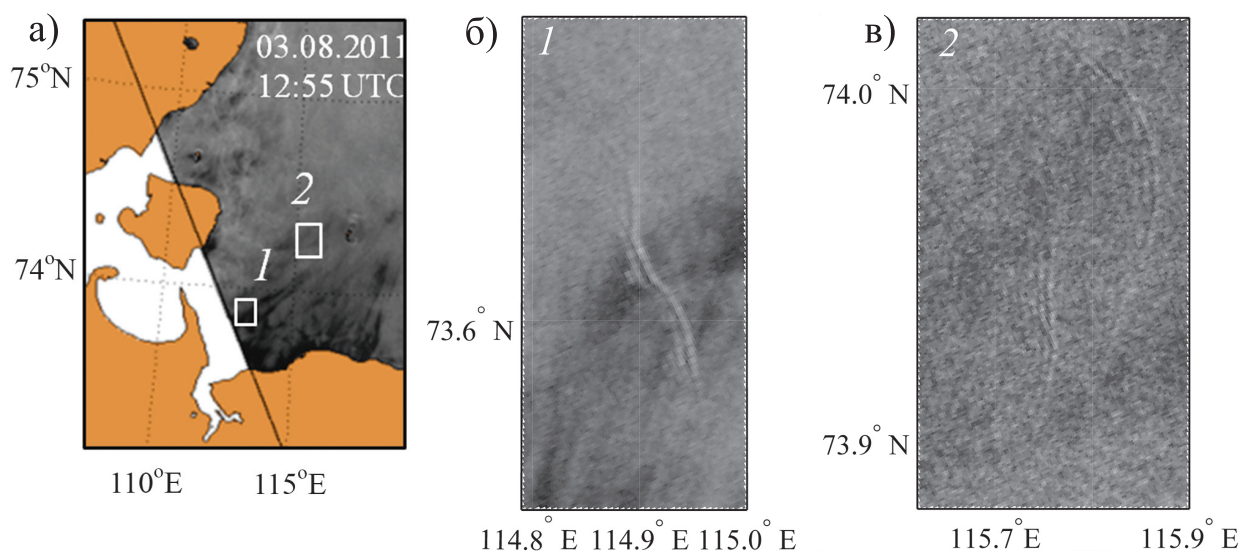


Рис. 5. Пример проявления пакетов внутренних волн в районе 3 вблизи Анабарского залива на РЛИ Envisat ASAR от 03.08.2011 г. (12:55 UTC). а) карта юго-западной части моря Лаптевых с отмеченными положениями фрагментов РЛИ; б), в) увеличенные фрагменты РЛИ с проявлениями внутренних волн, движущихся в сторону открытого моря © ESA

### Заключение

В работе представлены результаты анализа поля короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых, полученные в ходе обработки массива спутниковых радиолокационных изображений Envisat ASAR за летне-осенний период 2011 г. Анализ 354 РЛИ позволил выделить 91 пакет КВВ, определить основные районы их распространения и построить карты пространственных характеристик внутренних волн.

Общее число случаев регистрации поверхностных проявлений ВВ в море Лаптевых оказалось значительно меньшим, чем для акватории соседних морей – Баренцева, Белого и Карского, что, по-видимому, объясняется менее интенсивными внутренними приливами в море Лаптевых. Ключевые районы наблюдения внутренних волн находятся над континентальным склоном к востоку от о-ва Малый Таймыр и к северо-западу от о-ва Котельный, к востоку от о-ва Большой Бегичев на выходе из Хатангского залива, а также вблизи м. Арктический. Максимальное количество наблюдений ВВ приходится на район вблизи устья р. Хатанга. Самые крупные пакеты КВВ зарегистрированы западнее о-вов Бельковский и Столбовой, а также к востоку от о-ва Малый Таймыр. На внешнем шельфе моря Лаптевых внутренние волны распространяются преимущественно в сторону берега, а на внутреннем шельфе они направлены как в сторону берега, так и в открытое море.

Отмечается, что районы регулярного наблюдения КВВ совпадают с областью системы полыней моря Лаптевых, где внутренние волны приливного периода могут служить одним из основных механизмов формирования заприпайных полыней. Мы полагаем, что результаты этой работы могут оказаться полезными для дальнейших исследований влияния внутренних волн на термодинамический режим моря, включая их вклад в вертикальное перемешивание.



Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-5562.2016.5, а также в рамках государственного задания № 0827-2014-0011 и проектной части государственного задания № 5.2483.2014/К. Работа Козлова И.Е. по обработке и анализу спутниковых РСА изображений поддержана РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-60072 мол\_а\_дж. Спутниковые данные ENVISAT ASAR были получены из Европейского космического агентства в рамках проекта ESA C1F-29721.

## Литература

1. Добровольский А.Д., Залогин Б.С. Моря СССР. М.: Изд. Московского университета, 1982. 272 с.
2. Дубина В.А., Митник Л.М. Внутренние волны в Японском море: пространственно-временное распределение и характеристики по данным спутникового дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 3. С. 37–46.
3. Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Сандвен С. Некоторые результаты исследования внутренних волн в Баренцевом море методами радиолокационного зондирования из космоса // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 86. С. 60–69.
4. Козлов И.Е., Кудрявцев В.Н., Зубкова Е.В., Атаджанова О.А., Зимин А.В., Романенков Д.А., Шапрон Б., Мясоедов А.Г. Районы генерации внутренних волн в Баренцевом, Карском и Белом морях по данным спутниковых РСА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 338–345.
5. Козлов И.Е., Мясоедов А.Г. INTERWAVE: Определение характеристик океанских внутренних волн по их проявлениям в спутниковых радиолокационных снимках морской поверхности. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012660637, 26.11.2012.
6. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
7. Красильщиков А.А., Полухина О.Е., Талипова Т.Г., Куркин А.А. Уединенные внутренние волны и их поверхностные проявления на шельфе моря Лаптевых // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Серия: Прикладная математика и механика. 2003. № 4. С. 156–170.
8. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д. Проявление внутренних волн на морской поверхности в северо-восточной части Черного моря // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 6. С. 49–55.
9. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в Каспийском море // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 2. С. 40–48.
10. Талипова Т.Г., Полухин Н.В., Куркин А.А., Лавренов И.В. Моделирование трансформации солитонов внутренних волн на шельфе моря Лаптевых // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Серия: Прикладная математика и механика. 2003. № 4. С. 3–16.
11. Морозов Е.Г., Писарев С.В., Ерофеева С.Ю. Внутренние приливные волны в арктических морях России // Поверхностные и внутренние волны в Арктических морях. Ред. И.В. Лавренова, Е.Г. Морозова. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. С. 217–235.
12. Морозов Е.Г., Писарев С.В. Внутренние волны и образование полыней в море Лаптевых // Доклады РАН. 2004. Т. 398. № 2. С. 255–258.
13. Dewey R., Muench R., Gunn J. Mixing and vertical heat flux estimates in the Arctic Eurasian Basin // J. Mar. Syst. 1999. Vol. 21. P. 199–205. DOI: 10.1016/S0924-7963(99)00014-7.
14. Dmitrenko I.A., Ivanov V.V., Kirillov S.A., Vinogradova E.L., Torres-Valdes S., Bauch D. Properties of the Atlantic derived halocline waters over the Laptev Sea continental margin: Evidence from 2002 to 2009 // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. No. C10024. P. 1–9. DOI: 10.1029/2011JC007269.
15. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T., Kurkin A. Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves // J. Phys. Oceanogr. 2004. Vol. 34. P. 277–2791. DOI: 10.1175/JPO2652.1.
16. Jakobsson M., Mayer L.A., Coakley B., Dowdeswell J.A., Forbes S., Fridman B., Hodnesdal H., Noormets R., Pedersen R., Rebesco M., Schenke H.W., Zarayskaya Y., Accettella D., Armstrong A., Anderson R.M., Bienhoff P., Camerlenghi A., Church I., Edwards M., Gardner J.V., Hall J.K., Hell B., Hestvik O., Kristoffersen Y., Marcusen C., Mohammad R., Mosher D., Nghiem S.V., Pedrosa M.T., Travaglini P.G., Weatherall P. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39. No. L12609. DOI: 10.1029/2012GL052219.
17. Kowalik Z., Proshutinsky Y. The Arctic Ocean tides. In: The Polar Oceans and their Role in Shaping the Global Environment. AGU, 1994. P. 137–158.
18. Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B. SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea // Remote Sens. Environ. 2014. Vol. 147. P. 99–107. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.017.
19. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E.V., Zimin A.V., Chapron B., Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea // Izvestiya: Atmospheric and Oceanic Physics. 2015. № 9. Vol. 51. P. 1073–1087. DOI: 10.1134/S0001433815090121.
20. Rippeth T.P., Lincoln B.J., Lenn Y.-D., Mattias Green J.A., Sundfjord A., Bacon S. Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography // Nature Geosci. 2015. Vol. 8. P. 191–194. DOI: 10.1038/ngeo2350.

21. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude // Deep Sea Res. Part I. 2003. Vol. 50. No. 2. P. 317–338. DOI: 10.1016/S0967-0637(03)00018-9.
22. Zakharchuk E.A. Internal waves in the Laptev Sea. In: Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Dynamics and History. Berlin, Springer-Verlag, 1999. P. 43–51.

## Spaceborne SAR observations of short-period internal waves in the Laptev Sea

E.V. Zubkova<sup>1</sup>, I.E. Kozlov<sup>1,2</sup>, V.N. Kudryavtsev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg 195196, Russia

<sup>2</sup>Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia

E-mails: igor.eko@gmail.com, shigatsi@rshu.ru

In this paper we present results of short-period internal wave (SIW) observations in the Laptev Sea based on analysis of spaceborne Envisat ASAR data acquired between May–October 2011. Analysis of 354 SAR images helped to identify 91 distinct internal wave signatures, reveal key regions of their occurrence and build spatial maps of main SIW characteristics. It is shown that key regions of SIW observations are found over the continental slope regions east to Maly Taymyr Island and north-west to Kotelny Island, east to Bolshoy Begichev Island close to the Gulf of Khatanga, and north–west to the Arctic Cape. About 70% of all SIW observations correspond to the outer shelf of the Laptev Sea, while the maximum number of SIW occurrence is located in the vicinity of the Gulf of Khatanga. The largest SIW packets were registered to the west of Belkovsky and Stolbovoy islands, as well as to the east of Maly Taymyr Island. It is shown that regions of regular SIW observations coincide with the Laptev Sea polynya system, where internal tidal waves are known to be one of the mechanisms responsible for polynya formation.

**Keywords:** short-period internal waves, SAR imaging, Laptev Sea

*Accepted: 04.10.2016*

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-99-109

### References

1. Dobrovol'skii A.D., Zalugin B.S., *Morya SSSR (USSR Seas)*, Moscow: Izd. Moskovskogo universiteta, 1982, 272 p.
2. Dubina V.A., Mitnik L.M., Vnutrennie volny v Yaponskom more: prostranstvenno-vremennoe raspredelenie i kharakteristiki po dannym sputnikovogo distantsionnogo zondirovaniya (Internal waves in the Sea of Japan: spatio-temporal distribution and characteristics based on remote sensing data), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 3, pp. 37–46.
3. Kozlov I.E., Kudryavtsev V.N., Sandven S., Nekotorye rezul'taty issledovaniya vnutrennikh voln v Barentsevom more metodami radiolokatsionnogo zondirovaniya iz kosmosa (Some results of internal waves study in the Barents Sea using satellite radar data), *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2010, No. 86, pp. 60–69.
4. Kozlov I.E., Kudryavtsev V.N., Zubkova E.V., Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Ro-manenkov D.A., Chapron B., Myasoedov A.G., Raiony generatsii vnutrennikh voln v Barentsevom, Karskom i Belom moryakh po dannym sputnikovykh RSA (Generation sites of nonlinear internal waves in the Barents, Kara and White seas from spaceborne SAR observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 338–345.
5. Kozlov I.E., Myasoedov A.G., INTERWAVE: Opredelenie kharakteristik okeanskikh vnutrennikh voln po ikh proyavleniyam v sputnikovykh radiolokatsionnykh snimkakh morskoi poverkhnosti (INTERWAVE: Retrieval of characteristics of oceanic internal waves from their signatures in SAR images of ocean surface), *Russian State Software Patent No. 2012660637*, 26.11.2012.
6. Konyaev K.V., Sabinin K.D., *Volny vnutri okeana (Waves in the ocean)*, Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 272 p.
7. Krasil'shchikov A.A., Poloukhina O.E., Talipova T.G., Kurkin A.A., Uedinennye vnutrennie volny i ikh poverkhnostnye proyavleniya na shel' fe morya Laptevykh (The solitary internal waves and surface manifestations on the Laptev Sea shelf), *Izvestiya Akademii inzhenernykh nauk im. A.M. Prokhorova. Ser.: Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2003, No. 4, pp. 156–170.
8. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Proyavlenie vnutrennikh voln na morskoi poverkhnosti v severo-vostochnoi chasti Chernogo moray (The manifestation of internal waves on the sea surface in the northeastern part of the Black Sea), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 6, pp. 49–55.

9. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sabinin K.D., Serebryanyi A.N., Sputnikovye nablyudeniya poverkhnostnykh proyavlenii vnutrennikh voln v Kaspiiskom more (Satellite observations of surface manifestations of internal waves in the Caspian Sea), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011b, No. 2, pp. 40–48.
10. Talipova T.G., Polukhin N.V., Kurkin A.A., Lavrenov I.V., Modelirovanie transformatsii solitonov vnutrennikh voln na shel'fe morya Laptevykh (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.
11. Morozov E.G., Pisarev S.V., Erofeeva S.Yu., Vnutrennie prilivnye volny v arkticheskikh moryakh Rossii (Internal tides in the Russian Arctic seas), In: *Poverkhnostnye i vnutrennie volny v arkticheskikh moryakh* (Surface and internal waves in the Arctic seas), Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002, pp. 217–235.
12. Morozov E.G., Pisarev S.V., Vnutrennie volny i obrazovanie polynei v more Laptevykh (Internal waves and formation of polynyas in the Laptev Sea), *Doklady RAN*, 2004, Vol. 398, No. 2, pp. 255–258.
13. Dewey R., Muench R., Gunn J., Mixing and vertical heat flux estimates in the Arctic Eurasian Basin, *J. Mar. Syst.*, 1999, Vol. 21, pp. 199–205. DOI: 10.1016/S0924-7963(99)00014-7.
14. Dmitrenko I.A., Ivanov V.V., Kirillov S.A., Vinogradova E.L., Torres-Valdes S., Bauch D., Properties of the Atlantic derived halocline waters over the Laptev Sea continental margin: Evidence from 2002 to 2009, *J. Geophys. Res.*, 2011, Vol. 116. No. C10024, DOI: 10.1029/2011JC007269.
15. Grimshaw R., Pelinovsky E., Talipova T., Kurkin A., Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves, *J. Phys. Oceanogr.*, 2004, Vol. 34, pp. 2774–2791, DOI: 10.1175/JPO2652.1.
16. Jakobsson M., Mayer L.A., Coakley B., Dowdeswell J.A., Forbes S., Fridman B., Hodnesdal H., Noormets R., Pedersen R., Rebecco M., Schenke H.W., Zarayskaya Y., Accettella D., Armstrong A., Anderson R.M., Bienhoff P., Camerlenghi A., Church I., Edwards M., Gardner J.V., Hall J.K., Hell B., Hestvik O., Kristoffersen Y., Marcusen C., Mohammad R., Mosher D., Nghiem S.V., Pedrosa M.T., Travaglini P.G., Weatherall P., The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0, *Geophys. Res. Lett.*, 2012, Vol. 39. No. L12609. DOI: 10.1029/2012GL052219.
17. Kowalik Z., Proshutinsky Y., The Arctic Ocean tides, In: *The Polar Oceans and their Role in Shaping the Global Environment*, AGU, 1994, pp. 137–158.
18. Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B., SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea, *Remote Sens. Environ.*, 2014, Vol. 147, pp. 99–107. DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.017.
19. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E.V., Zimin A.V., Chapron B., Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea, *Izvestiya: Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, No. 9, Vol. 51, pp. 1073–1087. DOI: 10.1134/S0001433815090121.
20. Rippeth T.P., Lincoln B.J., Lenn Y.-D., Mattias Green J.A., Sundfjord A., Bacon S., Tide-mediated warming of Arctic halocline by Atlantic heat fluxes over rough topography, *Nature Geosci.*, 2015, No. 8, pp. 191–194. DOI: 10.1038/ngeo2350.
21. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K., Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude, *Deep Sea Res. Part*, 2003, Vol. 50, No. 2, pp. 317–338. DOI: 10.1016/S0967-0637(03)00018-9.
22. Zakharchuk E.A., Internal waves in the Laptev Sea, In: *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic. Dynamics and History*, Berlin, Springer-Verlag, 1999, pp. 43–51.