Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Чукотском море по данным спутниковых РСА-наблюдений

Е.В. Зубкова¹, И.Е. Козлов^{1,2}

 ¹ Российский государственный гидрометеорологический университет Санкт-Петербург, 192007, Россия E-mail: shigatsi@rshu.ru
 ² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия E-mail: igor.eko@gmail.com

В работе представлены результаты наблюдения короткопериодных внутренних волн (КВВ) в Чукотском море по данным спутникового радиолокатора с синтезированной апертурой ASAR спутника Envisat за период с мая по октябрь 2007 и 2011 гг. Анализ 365 радиолокационных изображений позволил выделить 112 поверхностных проявлений КВВ. Большинство проявлений внутренних волн (74 %) было зарегистрировано в июле и августе. В ходе работы определены основные пространственные характеристики КВВ, а также выделены ключевые районы их наблюдения. Показано, что пакеты КВВ распространены по акватории моря неравномерно. Значительная их часть расположена в центральной части моря в районе изобаты 75 м, над бровкой шельфа у побережья Чукотского п-ова и вблизи м. Хоп. В глубоководной части моря (>100 м) проявления внутренних волн практически отсутствуют. Отмечается, что общее количество КВВ на акватории Чукотского моря существенно меньше, чем в других морях евразийского сектора Арктики, что, по-видимому, обусловлено относительно ровной донной топографией и слабыми приливными течениями в этом районе, а также меньшей площадью открытой ото льда акватории.

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, спутниковые радиолокационные изображения, Чукотское море, Северный Ледовитый океан

Одобрена к печати: 02.06.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-221-230

Введение

Исследование внутренних волн (BB) в океане остаётся серьёзной научной проблемой, решение которой имеет большое практическое значение. Внутренние волны играют важную роль в изменчивости динамической структуры океана и теплообмене между атмосферой и океаном путём вертикального перемешивания, горизонтального и вертикального переноса импульса и энергии в толще океана. За счёт переноса биогенных веществ из глубинных слоёв в фотический слой BB могут оказывать влияние на развитие планктона и морские экосистемы (Навроцкий и др., 2012). Кроме того, BB являются одним из ключевых процессов, определяющих пространственно-временные характеристики поля скорости звука в океане (Коняев, Сабинин, 1992). В приложении к арктическому региону актуальность исследования BB определяется интенсивным освоением и нефтедобычей на арктическом шельфе, где они могут оказывать существенное влияние на вертикальное перемешивание и перенос тепла (Kozlov et al., 2017; Padman, Dillon, 1991; Rippeth et al., 2015), морской лёд (Carr et al., 2019; Czipott et al., 1991; Могогоv et al., 2019) и формирование заприпайных полыней (Зубкова и др., 2016а; Морозов, Писарев, 2004), являющихся ключевыми районами взаимодействия океана и атмосферы в Арктике.

Всё возрастающее количество исследований ВВ на акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) главным образом сосредоточено в его евразийском секторе (Зубкова и др., 20166; Морозов и др., 2002; Kozlov et al., 2015а; Morozov et al., 2017; Vlasenko et al., 2003; Zimin et al., 2016), при этом практически без внимания остаётся его восточный сектор, в частности Чукотское море.

Чукотское море — крайнее восточнее море евразийского сектора Арктики, соединяющее его с канадским бассейном. Обширный шельф Чукотского моря является одной из ключевых областей генерации донных вод шельфовой зоны Северного Ледовитого океана из-за частого появления полыней (Winsor, Björk, 2000). Рельеф дна Чукотского моря ровный, лишён резких углублений и возвышений, здесь преобладают глубины порядка 50 м, а максимальная глубина не превышает 200 м. Приливы в Чукотском море полусуточные. Высота прилива незначительна по всему побережью Чукотки (0,1-0,15 м), но на о. Врангеля она может доходить до 1,5 м. Скорость приливных течений на акватории в основном не превышает 2 см/с за исключением прибрежной зоны о. Врангеля, где она достигает 6 см/с (Padman, Erofeeva, 2004).

Как упоминалось ранее, с точки зрения исследования ВВ акватория Чукотского моря является малоизученной. В работах (Kawaguchi et al., 2015; Rainville, Woodgate, 2009) на основе контактных измерений в летний период исследованы характеристики поля квази-инерционных ВВ ветрового происхождения и их влияние на турбулентное перемешивание в верхнем слое моря. Авторы публикации (Kawaguchi et al., 2015) потенциально рассматривали приливной механизм в качестве одного из возможных механизмов генерации ВВ в районе исследований, но в ходе анализа измерений пришли к выводу, что наблюдаемые ВВ были вызваны штормовым ветром. Таким образом, исследований короткопериодных внутренних волн (KBB), распространяющихся в виде цугов уединённых волн и часто наблюдаемых из космоса (Лаврова, 2018; Jackson, 2004; Kozlov et al., 2014; Lavrova, Mityagina, 2017), в данном районе не проводилось.

Настоящая публикация продолжает цикл работ по исследованию поля КВВ в Арктике на основе анализа данных измерений спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA). В работе впервые представлены результаты анализа поля внутренних волн в Чукотском море по данным спутниковых PCA-измерений за летне-осенний период 2007 и 2011 гг.

Данные и метод

Анализ пространственно-временных характеристик поля КВВ в Чукотском море проводился на основе обработки спутниковых PCA-изображений Envisat (Environmental Satellite) ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) в режиме съёмки Wide Swath Mode с пространственным разрешением 150×150 м при различной поляризации PCA-сигнала. Спутниковые радиолокационные изображения (РЛИ) были получены из роллинг-архива Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA). Анализ и идентификация внутренних волн на изображениях PCA проводились в соответствии с методикой, описанной в работе (Kozlov et al., 2015б). Всего за период с мая по октябрь 2007 и 2011 гг. было проанализировано 365 РЛИ. На *рис. 1* представлена карта покрытия спутниковой PCA-съёмкой открытых ото льда участков морской поверхности. Из *рис. 1* видно, что акватория моря покрыта PCA-съёмкой неравномерно. Большинство РЛИ приходится на центральную часть акватории



(от 100 до 150 РЛИ на единицу морской поверхности), а южнее 70° с. ш. покрытие уменьшается от 50 до 20 РЛИ на единицу морской поверхности. Такое неравномерное покрытие связано с пространственными особенностями ледового режима и радиолокационной съёмки Чукотского моря в период исследований. Основное количество проанализированных снимков приходится на август и сентябрь (57 % от всех РЛИ, *puc. 2*, см. с. 223) месяцы, когда акватория наиболее открыта ото льда.

Рис. 1. Карта покрытия свободной ото льда акватории Чукотского моря спутниковой РСА-съёмкой с июня по октябрь 2007, 2011 гг. На карту нанесена изобата 200 м



Рис. 2. Характеристики спутниковых РСА-наблюдений КВВ в Чукотском море: *а* — гистограмма временного распределения количества спутниковых РЛИ и идентифицированных пакетов КВВ, где столбцы — количество РСА-изображений, чёрная кривая — количество выделенных пакетов КВВ; *б* — сезонное распределение нормированного количества внутренних волн

Результаты спутниковых наблюдений внутренних волн в Чукотском море

В ходе обработки 365 спутниковых изображений было идентифицировано 112 поверхностных проявлений КВВ за два летне-осенних сезона 2007 и 2011 гг. При этом в 2007 г. выделено 52 пакета КВВ, а в 2011 г. несколько больше — 60. Основная часть зарегистрированных внутренних волн приходится на июль и август (~70 %), когда условия стратификации, по-видимому, наиболее благоприятны для генерации КВВ. В июне и сентябре волны регистрировались примерно в три раза реже, в октябре их количество минимально, а в мае ВВ не обнаружены (см. *рис. 2a*). Интересно отметить, что иное сезонное распределение количества ВВ наблюдается при нормировании числа волн на суммарную площадь открытой воды за каждый месяц (см. *рис. 26*). В 2007 г. максимум наблюдений приходится на июль и затем постепенно убывает в течение всего периода наблюдений. В 2011 г. максимальное нормированное количество наблюдений ВВ приходится на июнь и июль, а затем резко уменьшается с минимумом в сентябре и небольшим ростом в октябре. Пиковые нормированные значения в начале сезона 2011 г. по сравнению с 2007 г. обусловлены достаточно частой регистрацией внутренних волн на фоне относительно небольшой площади открытой воды в июне – июле 2011 г.

Как правило, внутренние волны наблюдались на РЛИ в виде групп (пакетов) из нескольких волн с характерным уменьшением расстояния между ними в сторону тыла пакета, одиночные солитоны фиксировались редко. В ряде случае на РЛИ наблюдались последовательные пакеты внутренних волн, предположительно имеющих один и тот же район генерации. Отметим, что общее количество КВВ, зарегистрированных на акватории Чукотского моря, значительно меньше, чем на акватории других, ранее исследованных арктических морей: Белого, Баренцева, Карского и Гренландского (Зубкова и др., 2016а; Kozlov et al., 2015а, б; Zimin et al., 2016), что в первую очередь может быть обусловлено слабыми приливными течениями в этом районе и достаточно однородным рельефом дна, а также меньшей за период наблюдений площадью открытой ото льда акватории и доступностью спутниковой съёмки для данного региона.

На *рис. За* показано пространственное распределение относительной частоты встречаемости внутренних волн на РЛИ Чукотского моря, рассчитанной в виде отношения общего количества зарегистрированных пакетов КВВ в заданном квадрате моря к количеству РСА-съёмок данного квадрата в безлёдный период. Так, например, значение относительной частоты, равное 0,5, соответствует регистрации одного пакета внутренних волн в заданном квадрате моря на каждом втором РЛИ. Из *рис. За* видно, что наиболее часто пакеты КВВ наблюдались вдоль побережья Чукотского п-ова и вблизи м. Хоп (значения относительной частоты ~0,2–0,3). На остальной акватории КВВ фиксировались значительно реже — относительная частота встречаемости не превышает 0,1.



Рис. 3. Пространственное распределение КВВ на акватории Чукотского моря по результатам спутниковых наблюдений за июнь-октябрь 2007, 2011 гг.: *а* — относительная частота встречаемости КВВ на спутниковых РЛИ; *б* — положение гребней лидирующих волн. На карты нанесены изобаты 50, 75 и 300 м



Рис. 4. Примеры проявления последовательных пакетов KBB на акватории Чукотского моря: *a* — в районе 1 на РЛИ Envisat ASAR от 13.07.2007; *б* — в районе 3 на РЛИ Envisat ASAR от 12.08.2007 ©ESA

На *рис. 36* представлено пространственное распределение гребней лидирующих волн в пакетах КВВ на акватории Чукотского моря. Видно, что пакеты КВВ распространены по акватории неравномерно. Значительная их часть расположена в центральной части акватории в районе изобаты 75 м (районы 2 и 3), а также над бровкой шельфа у побережья Чукотского п-ова (район 1) и м. Хоп (район 4); в глубоководной части моря (>100 м) проявления КВВ практически отсутствуют. На *рис. 4а* показан пример наблюдения последовательных пакетов КВВ в районе 1, распространяющихся на северо-запад в сторону глубокой воды. Среднее расстояние между последовательными пакетами составляет 5 км, а средняя длина лидирующей волны в пакете — около 14 км.

Ранее уже были описаны наблюдения квази-инерционных внутренних волн ветрового происхождения в районе 3 (Kawaguchi et al., 2015). На *рис. 46* представлен фрагмент РЛИ Envisat ASAR от 12 августа 2007 г., демонстрирующий проявление BB в районе выполнения наблюдений, описанных в указанной работе. На РЛИ хорошо различимы несколько последовательных пакетов BB юго-западного направления с чётко выраженной горизонтальной структурой и характерным уменьшением длины волны в сторону тыла пакета от 500 до 250 м. Общий характер РЛ-проявлений BB на *рис. 46*, их периодичность и распространение вблизи неоднородного дна перпендикулярно изобатам (см. *рис. 1*) позволяет предположить, что они имеют приливной характер образования.

На *рис. 5* приведены гистограммы некоторых параметров внутренних волн. Как упоминалось ранее, КВВ наблюдались в виде пакетов по 2-3 уединённых волны (максимум 11 волн) при средней ширине пакета около 1,3 км. Средняя длина волны в пакетах составляет около 0,6 км, максимальная — 1,2 км. Средние наблюдаемые значения длины фронта и площади пакетов КВВ — около 21 км и 30 км² соответственно, но для самых крупных пакетов значения этих параметров достигают 61 км и 162 км².



Рис. 5. Гистограммы распределения основных параметров внутренних волн на акватории Чукотского моря: *a* — длина гребня лидирующей волны (км); *б* — максимальная длина волны в пакетах КВВ (км); *в* — ширина пакета КВВ (км); *г* — площадь пакетов КВВ (км²)

На рис. 6 представлены карты пространственного распределения основных параметров КВВ. Как видно из *рис. 6a*, пакеты КВВ с длинами волн более 1 км наблюдались к северо-востоку и юго-востоку от о. Врангеля. В центральной и северной частях акватории длины волн в пакетах составляли от 0,4 до 1 км, вдоль побережья Северной Америки и Чукотского п-ова — от 0,4 до 0,7 км, в центральной части акватории — от 0,5 до 0,8 км. В основном на акватории наблюдались цуги ВВ с длиной гребня лидирующей волны 15-25 км, наиболее крупные волны фиксировались у м. Хоп, а также к северу и северо-востоку от о. Геральд, там же зарегистрировано максимальное значение — 61 км (см. рис. 6б). Самые крупные по площади пакеты внутренних волн зарегистрированы у м. Хоп (161 км²) и к северо-востоку от о. Геральд (~110 км²), площадь большинства пакетов KBB — менее 50 км² (см. *рис. 6в*). На *рис. 6е* показана карта пространственного распределения направления распространения внутренних волн на акватории моря (относительно направления на север). Из рис. 6г видно, что в более мелководной части моря (<75 м) пакеты КВВ распространяются перпендикулярно изобатам: вдоль Чукотского п-ова — на восток и северо-восток, вдоль побережья Северной Америки — на запад. На более глубоководной части акватории (>75 м) часть пакетов КВВ распространяется параллельно изобатам (на запад или на восток), остальные — перпендикулярно им.



Рис. 6. Карты пространственного распределения основных параметров внутренних волн на акватории Чукотского моря: *а* — максимальная длина волны в пакетах КВВ (км); *б* — длина гребня лидирующей волны (км); *в* — площадь пакетов КВВ (км²); *г* — направление распространения КВВ. На карты нанесены изобаты 50, 75 и 300 м

Заключение

В работе представлены результаты анализа поля короткопериодных внутренних волн в Чукотском море, полученные в ходе обработки массива спутниковых изображений Envisat ASAR за летне-осенний период 2007 и 2011 гг. Анализ 365 РЛИ позволил выделить 112 пакетов KBB, определить основные районы их наблюдения и построить карты пространственных характеристик внутренних волн.

Внутренние волны наблюдались в виде пакетов уединённых волн при средней ширине пакета около 1,3 км. Средняя длина волны в пакетах КВВ составила 0,6 км, максимальная — 1,2 км. Средние наблюдаемые значения длины фронта и площади пакетов КВВ составили 20 км и 30 км² соответственно, но для самых крупных пакетов значения этих параметров достигают 60 км и 162 км². Большинство наблюдаемых на акватории пакетов КВВ (~80 %) распространяются перпендикулярно изобатам, на внутреннем шельфе волны распространяются от берега, на внешнем — преимущественно в сторону берега.

Общее число случаев регистрации КВВ оказалось значительно меньше, чем для других арктических морей, что, по-видимому, объясняется более слабыми приливными течениями и достаточно однородным рельефом дна Чукотского моря. Абсолютное и нормированное количество наблюдений внутренних волн показывают пик их генерации и наблюдений в июле. Практически все пакеты КВВ регистрировались в областях свала глубин. Основные районы регулярного наблюдения КВВ расположены на шельфе Чукотского п-ова и вблизи м. Хоп.

Несмотря на относительно небольшое число зарегистрированных проявлений KBB, они достаточно широко распространены на акватории Чукотского моря. Анализ возможной изменчивости районов наблюдения BB и интенсивности их генерации в Чукотском море на фоне общих изменений гидрологического и ледового режима СЛО представляется перспективной задачей будущих исследований. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего изучения влияния KBB на перемешивание, перенос тепла и формирование ледяного покрова.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-35-20078 мол_а_вед (обработка данных, идентификация внутренних волн и определение их характеристик), а также гранта Российского научного фонда № 17-77-30019 (анализ пространственно-временной изменчивости внутренних волн). Спутниковые данные Envisat ASAR были получены из Европейского космического агентства в рамках проекта ESA C1F-29721.

Литература

- 1. *Зубкова Е. В., Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н.* (2016а) Характеристики короткопериодных внутренних волн в Гренландском море по данным спутниковых радиолокационных наблюдений // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2016. №. 45. С. 81–90.
- 2. Зубкова Е. В., Козлов И. Е., Кудрявцев В. Н. (2016б) Наблюдение короткопериодных внутренних волн в море Лаптевых на основе спутниковых радиолокационных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 61–71.
- 3. Коняев К. В., Сабинин К. Д. Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 272 с.
- 4. *Лаврова О. Ю*. Проявление внутренних волн на спутниковых изображениях северо-восточной части Черного моря в июле 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 309–315.
- 5. *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.
- 6. *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.: Гидрометеоиздат, 2002. С. 217–235.
- Навроцкий В. В., Ляпидевский В. Ю., Павлова Е. П. Внутренние волны и их биологические эффекты в шельфовой зоне моря // Вестн. Дальневосточного отд-ния Российской акад. наук. 2012. Т. 6. С. 22–31.
- 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.
- 9. *Czipott P.V., Levine M.D., Paulson C.A., Menemenlis D., Farmer D.M., Williams R.G.* Ice flexure forced by internal wave packets in the Arctic Ocean // Science. 1991. V. 254. No. 5033. P. 832–835.

- 10. *Jackson C. R.* An atlas of internal solitary-like waves and their properties. 2nd ed. Alexandria, VA: Global Ocean Associates, 2004.
- 11. *Kawaguchi Y., Nishino S., Inoue J.* Fixed-point observation of mixed layer evolution in the seasonally ice-free Chukchi Sea: Turbulent mixing due to gale winds and internal gravity waves // J. Physical Oceanography. 2015. V. 45. No. 3. P. 836–853.
- 12. *Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B.* SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 147. P. 99–107.
- 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 // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2015. P. 947–949.
- Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N., Zubkova E. V., Zimin A. V., Chapron B. (2015b) Characteristics of shortperiod internal waves in the Kara Sea // 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.
- 16. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 9. C. 892.
- 17. *Morozov E. G., Kozlov I. E., Shchuka S.A., Frey D. I.* Internal tide in the Kara Gates Strait // Oceanology. 2017. V. 57. No. 1. P. 8–18.
- Morozov E. G., Marchenko A. V., Filchuk K. V., Kowalik Z., Marchenko N. A., Ryzhov I. V. Sea ice evolution and internal wave generation due to a tidal jet in a frozen sea // Applied Ocean Research. 2019. V. 87. P. 179–191. DOI: 10.1016/j.apor.2019.03.024.
- 19. *Padman L., Dillon T. M.* Turbulent mixing near the Yermak Plateau during the coordinated Eastern Arctic Experiment // J. Geophysical Research: Oceans. 1991. V. 96. No. C3. P. 4769–4782.
- 20. *Padman L., Erofeeva S.A.* A Barotropic Inverse Tidal Model for the Arctic Ocean // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31. No. 2. 8 p.
- 21. *Rainville L., Woodgate R.A.* Observations of internal wave generation in the seasonally ice-free Arctic // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36. No. 23. 5 p.
- 22. *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. Geoscience. 2015. V. 8. P. 191–194. DOI: 10.1038/ngeo2350.
- 23. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude // Deep Sea Research Pt. I. 2003. V. 50. No. 2. P. 317–338. DOI: 10.1016/S0967-0637(03)00018-9.
- 24. Winsor P., Björk G. Polynya activity in the Arctic Ocean from 1958 to 1997 // J. Geophysical Research: Oceans. 2000. V. 105. No. C4. P. 8789–8803.
- 25. 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. V. 52. No. 9. P. 951–960.

Characteristics of short-period internal waves in the Chukchi Sea based on spaceborne SAR observations

E. V. Zubkova¹, I. E. Kozlov^{1,2}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia E-mail: shigatsi@rshu.ru
² Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia E-mail: igor.ekoi@gmail.com

In this work, we present the results of short-period internal waves (IWs) observations in the Chukchi Sea based on the analysis of spaceborne Envisat ASAR data acquired in May – October 2007 and 2011. Analysis of 365 SAR images enabled to identify 112 IWs packets. Most of them (74 %) were identified in July and August. Main spatial characteristics of IWs trains were obtained, and their key generation sites identified. It is shown that IWs trains are spread over the sea rather inhomogeneously. Most of them are found near the 75 m isobath, at the shelf break near Chukchi Peninsula and in the vicinity

of Cape Point Hope. Very small number of IWs was identified over the deeper parts of the sea (>100 m depths). As noticed, the total number of IWs identified over the Chukchi Sea is much smaller than it was observed earlier over the other Eurasian Arctic Seas, which is plausibly attributed to the relatively smooth bottom topography and weak tidal currents in this region, as well as lower area of open water in the sea.

Keywords: short-period internal waves, SAR imaging, Chukchi Sea, Arctic Ocean

Accepted: 02.06.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-221-230

References

- 1. Zubkova E. V., Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N. (2016a), Kharakteristiki korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v Grenlandskom more po dannym sputnikovykh radiolokatsionnykh nablyudenii (Short-period internal waves characteristics in the Greenland sea based on SAR spaceborne observations), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2016, No. 45, pp. 81–90.
- Zubkova E. V., Kozlov I. E., Kudryavtsev V. N. (2016b), Nablyudenie korotkoperiodnykh vnutrennikh voln v more Laptevykh na osnove sputnikovykh radiolokatsionnykh izmerenii (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. 61–71.
- 3. Konyaev K. V., Sabinin K. D., *Volny vnutri okeana* (Waves in the ocean), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 272 p.
- 4. Lavrova O. Yu., Proyavlenie vnutrennikh voln na sputnikovykh izobrazheniyakh severo-vostochnoi chasti Chernogo morya v iyule 2017 g. (Internal waves observed in satellite images of the northeastern Black Sea in July 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 309–315.
- 5. 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 Rossiiskoi akademii nauk*, 2004, Vol. 398, No. 2, pp. 255–258.
- 6. 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.
- Navrotskii V. V., Lyapidevskii V. Yu., Pavlova E. P., Vnutrennie volny i ikh biologicheskie effekty v shel'fovoi zone morya (Internal waves and their biological effects in the seas shelf zone), *Vestnik Dal'nevostochnogo* otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2012, Vol. 6, pp. 22–31.
- 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, *Geo-physical Research Letters*, 2019, Vol. 46, No. 21, pp. 12230–12238, DOI: 10.1029/2019GL084710.
- 9. Czipott P.V., Levine M.D., Paulson C.A., Menemenlis D., Farmer D.M., Williams R.G., Ice flexure forced by internal wave packets in the Arctic Ocean, *Science*, 1991, Vol. 254, No. 5033, pp. 832–835.
- 10. Jackson C. R., *An atlas of internal solitary-like waves and their properties*, 2nd ed., Alexandria, VA: Global Ocean Associates, 2004.
- Kawaguchi Y., Nishino S., Inoue J., Fixed-point observation of mixed layer evolution in the seasonally icefree Chukchi Sea: Turbulent mixing due to gale winds and internal gravity waves, *J. Physical Oceanography*, 2015, Vol. 45, No. 3, pp. 836–853.
- 12. Kozlov I., Romanenkov D., Zimin A., Chapron B., SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 147, pp. 99–107.
- 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, *Proc. IEEE Intern. Geo*science and Remote Sensing Symp. (IGARSS), 2015, pp. 947–949.
- 14. Kozlov I., Kudryavtsev V., Zubkova E. V., Zimin A. V., Chapron B. (2015b), 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.
- 15. 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.
- 16. Lavrova O., Mityagina M., Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 9, p. 892.

- 17. Morozov E. G., Kozlov I. E., Shchuka S. A., Frey D. I., Internal tide in the Kara Gates Strait, *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 8–18.
- Morozov E. G., Marchenko A. V., Filchuk K. V., Kowalik Z., Marchenko N. A., Ryzhov I. V., Sea ice evolution and internal wave generation due to a tidal jet in a frozen sea, *Ocean Research*, 2019, Vol. 87, pp. 179–191, DOI: 10.1016/j.apor.2019.03.024.
- 19. Padman L., Dillon T. M., Turbulent mixing near the Yermak Plateau during the coordinated Eastern Arctic Experiment, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1991, Vol. 96, No. C3, pp. 4769–4782.
- 20. Padman L., Erofeeva S.A., Barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean, *Geophysical Research Letters*, 2004, Vol. 31, No. 2, 8 p.
- 21. Rainville L., Woodgate R.A., Observations of internal wave generation in the seasonally ice-free Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, No. 23, 5 p.
- 22. 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 Geoscience*, 2015, Vol. 8, pp. 191–194, DOI: 10.1038/ngeo2350.
- 23. Vlasenko V., Stashchuk N., Hutter K., Sabinin K., Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude, *Deep Sea Research Part I*, 2003, Vol. 50, No. 2, pp. 317–338, DOI: 10.1016/S0967-0637(03)00018-9.
- 24. Winsor P., Björk G., Polynya activity in the Arctic Ocean from 1958 to 1997, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2000, Vol. 105, No. C4, pp. 8789–8803.
- 25. 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.