

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ МЕТОДАМИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИЗ КОСМОСА

аспирант И.Е.КОЗЛОВ<sup>1,2</sup>, д-р физ.-мат. наук В.Н.КУДРЯВЦЕВ<sup>1,2</sup>,  
проф. С.САНДВЕН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, igor.eko@gmail.com

<sup>2</sup>Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, Берген (Норвегия)

Приведены результаты наблюдения океанских внутренних волн (ВВ) в Баренцевом море, полученные при обработке спутниковых радиолокационных (РЛ) изображений за период с июня по август 2007 г. Всего идентифицировано 255 пакетов ВВ на 59 РЛ-снимках ИСЗ Envisat. В ходе работы выделены районы с максимальным количеством пакетов волн, определены диапазоны длин волн и их количество в волновых пакетах, а также сделан вывод о приливном характере образования большинства волновых пакетов. Наибольшее количество пакетов было выявлено к северо-западу от арх. Земля Франца-Иосифа. Исходя из предположения о приливном характере образования наблюдаемых ВВ, определены фазовые скорости пакетов ВВ. Используя дисперсионное соотношение для низшей внутренней моды и рассчитанные значения фазовой скорости волновых пакетов, проведена оценка дефицита «массосодержания» верхнего квазигомогенного слоя (ВКС) и его эволюции во времени. Приводится зависимость радиолокационного контраста проявлений внутренних волн от фоновой скорости ветра, определяющей возможность «визуального» обнаружения ВВ в РЛ-снимках.

**Ключевые слова:** океанские внутренние волны, Баренцево море, радиолокационные изображения моря, ВКС, скорость приводного ветра.

Исследование внутренних волн (ВВ) в океане имеет важное научное и прикладное значение. В частности, ВВ, являясь важным элементом динамической структуры океана, влияют на его «среднее» состояние путем вертикального перемешивания, горизонтального и вертикального переноса импульса и энергии [4, 3]. Кроме этого, знание пространственного распределения параметров ВВ необходимо для обеспечения безопасности подводного мореплавания.

Использование спутниковых методов позволило по-новому взглянуть на проблему изучения океанских ВВ. На основе наблюдений за поверхностными проявлениями внутренних волн, зарегистрированными спутниковыми датчиками, стало возможным определение их пространственных характеристик, районов образования и в некоторых случаях механизмов их генерации. Одними из наиболее эффективных инструментов по обнаружению внутренних волн из космоса, сочетающими высокое пространственное разрешение и всепогодность наблюдений, являются радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Наблюдения океанских ВВ в снимках РСА известны с запуска ИСЗ Seasat в 1978 г. [6]. С тех пор появилось множество статей, описывающих как отдельные случаи наблюдения внутренних волн в радиолокационных изображениях (РЛИ) моря [14, 13], так и их систематическое наблюдение для различных акваторий [8]. При этом наблюдения ВВ на акватории Баренцева моря по данным спутниковых радиолокаторов ограничены лишь несколькими работами, посвященными отдельным случаям проявлений ВВ в РЛ-снимках [2, 9].

Основной целью данной работы является анализ пространственного распределения ВВ в Баренцевом море, определение их характеристик и выявление основных механизмов и районов их генерации на основании коллекции спутниковых РСА-изображений, полученных в июне–августе 2007 г. с ИСЗ Envisat Европейского космического агентства.

Одним из основных источников генерации ВВ на шельфе является взаимодействие баротропного приливного течения с неровностями рельефа морского дна [3, 1]. При прохождении внутренних волн на морской поверхности индуцируются периодические горизонтальные течения [7]. Взаимодействие ветровых волн с этими индуцированными течениями приводит к формированию поверхностных проявлений ВВ в виде контрастов «шероховатости» морской поверхности. В приложении к РЛ-наблюдениям ВВ, наибольший интерес представляют поверхностные проявления ВВ в спектре ветровой ряби на брэгговском волновом числе, т.е. в диапазоне волн, обеспечивающих обратное резонансное рассеяние радиоволн на морской поверхности. При умеренных углах падения длина волны брэгговской ряби примерно соответствует длине радиоволны. Обычно считается, что усиление/ослабление брэгговских волн происходит в зонах конвергенции/дивергенции поверхностных течений. Это приводит к формированию проявления ВВ на РСА-изображениях в виде чередующихся светлых и темных полос (рис. 1). Более подробные сведения по теории проявления океанских внутренних волн в РЛ-снимках могут быть найдены в статьях [5, 10].

Для исследования ВВ в Баренцевом море использовались радиолокационные изображения Envisat ASAR в С-диапазоне и режимах съемки WSM (ширина полосы обзора 400×400 км, пространственное разрешение 150×150 м) и IMM (примерно 100×100 км и 150×150 м соответственно) при различной поляризации РЛ-сигнала. Сводные данные о характеристиках РЛ-съемки и количестве зафиксированных проявлений ВВ за отдельный летний месяц даны в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что число наблюдаемых пакетов ВВ в течение лета было различным, минимальным – в июле и наиболее частым – в августе. Это вызвано двумя основными причинами – меньшим количеством РСА-изображений за июнь–июль, а также использованием только тех снимков, где участки моря были свободны ото льда. Количество наблюдений пакетов ВВ в июне и июле примерно одинаково. В августе частота наблюдения пакетов примерно в два раза выше. Повидимому, это связано с более явно выраженной стратификацией верхнего слоя океана, способствующей более эффективной генерации ВВ.

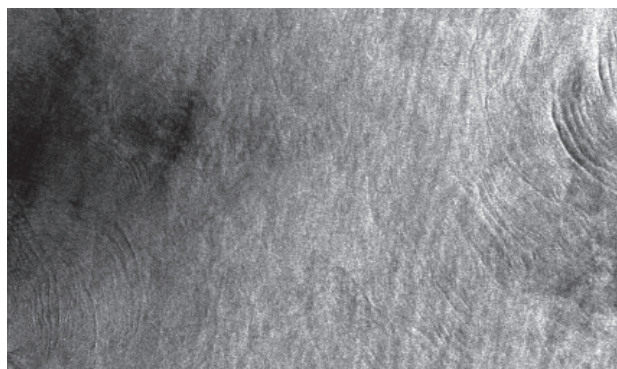


Рис. 1. Пример проявления внутренних волн в Баренцевом море на РЛ-изображении Envisat ASAR от 31 августа 2007 г. © ESA

Таблица 1

Основные характеристики РЛ-наблюдения ВВ в Баренцевом море			
Месяц года	Количество снимков		Количество пакетов ВВ
	IMM	WSM	
Июнь 2007 г.	0	8	22
Июль 2007 г.	5	3	18
Август 2007 г.	14	29	215
Всего	59		255

Процедура анализа РСА-изображений проводилась в два этапа. На первом этапе РСА-изображения подвергались низкочастотной фильтрации, т.е. исключались пространственные вариации поля РЛ-сигнала на масштабах существенно больших длины ВВ. После этой процедуры проявления пакетов ВВ на РСА-изображениях становились «визуально» очевидными, и далее они подвергались количественному анализу. Положения пакетов ВВ, определенных в результате обработки РСА-изображений за весь период наблюдений, показаны на рис. 2.

Согласно представленной карте, ВВ на акватории моря распространены крайне неравномерно. Большинство обнаруженных пакетов ВВ сосредоточено в области свала глубин от 200 до 50 м. Кроме того, проявления ВВ в большинстве снимков наблюдались в виде последовательных пакетов ВВ (см., например, рис. 3 ниже). Это обстоятельство позволяет сделать вывод о приливном характере генерации обнаруженных ВВ.

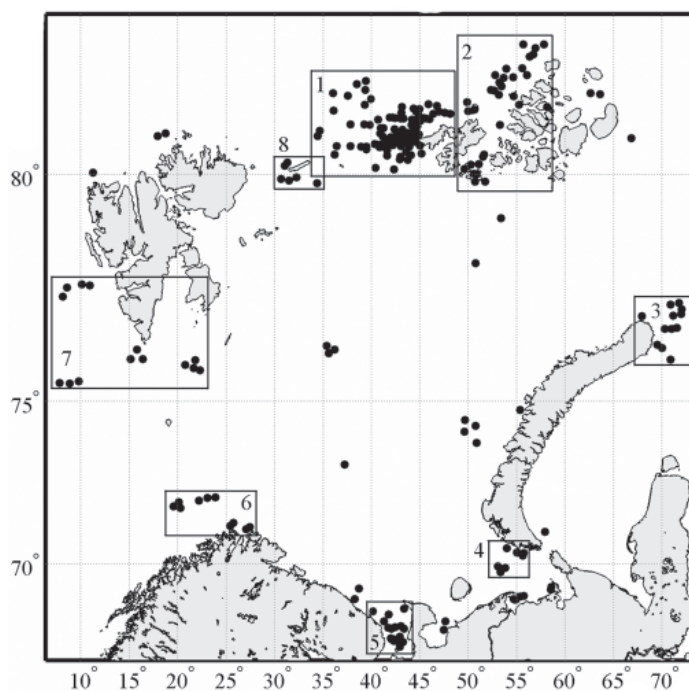


Рис. 2. Местоположение пакетов внутренних волн, обнаруженных в Баренцевом море в июне–августе 2007 г. по данным радиолокатора с синтезированной апертурой Envisat ASAR

Для удобства анализа картированные пакеты ВВ на основании общности географического положения и сходства РЛ-проявлений были объединены в восемь групп, представленных в табл. 2 в порядке убывания количества пакетов в группе. При этом не все из выделенных нами районов в строгом смысле относятся к акватории Баренцева моря, многие из них находятся на границах со смежными акваториями, часто совпадающих с особенностями батиметрии, благоприятными для образования ВВ приливного характера.

Из таблицы видно, что почти половина всех пакетов ВВ (49 %) наблюдалась вблизи арх. Земля Франца-Иосифа (районы 1 и 2 на рис. 2), в особенности к северо-западу от о. Земля Александры (район 1). Далее по количеству пакетов необходимо отметить район к северу от арх. Земля Франца-Иосифа (район 2) и в Воронке Белого моря (район 5). При этом само по себе количество обнаруженных пакетов ВВ мало говорит о регулярности их наблюдений в том или ином районе. Для этих целей была определена средняя частота наблюдаемости ВВ по районам в виде отношения количества пакетов волн к количеству съемок данного района за вычетом тех снимков, когда участок акватории был покрыт льдом. Понятие «средняя» частота наблюдений подразумевает, что на отдельных снимках района могло быть несколько проявлений, тогда как на других снимках проявлений могло не быть. Таким образом, эта величина показывает, сколько проявлений ВВ в среднем приходится на одну съемку района. В результате наиболее часто ВВ наблюдались в северо-восточной части моря вблизи арх. Земля Франца-Иосифа (район 1), в районах к юго-западу от арх. Шпицберген (район 7), севернее мыса Нордкап (район 6) и в Воронке Белого моря (район 5). В то же время районы вблизи Шпицбергена и мыса Нордкап были сняты спутником всего по четыре раза. Очевидно, этого недостаточно для предположения о регулярности образования ВВ в них. С другой стороны, району в центральной части арх. Земля Франца-Иосифа (район 2) соответствует относительно низкая частота наблюдений, но проявления ВВ здесь в небольшом количестве присутствуют почти на каждом снимке.

Таблица 2

Основные районы наблюдения внутренних волн и характеристики их проявлений на РЛ-снимках Баренцева моря

№	Район моря	Кол-во пакетов	Кол-во РЛ-съемок	Частота наблюд.	$\lambda_{\min}$ , м	$\lambda_{\max}$ , м	Длина фронта ведущей волны, км	Кол-во волн в пакете
1	К СЗ от арх. Земля Франца-Иосифа	119	30	3,97	250	3300	20–80	1–20
7	К ЮЗ от арх. Шпицберген	14	4	3,5	900	1800	5–12	2–5
6	Севернее м. Нордкап	10	4	2,5	600	2500	20–140	2–8
5	Воронка Белого моря	17	11	1,55	450	2600	7–75	2–13
3	Севернее о. Новая Земля	13	10	1,3	250	1200	10–26	2–8
2	Севернее арх. Земля Франца-Иосифа	32	29	1,1	250	1700	5–16	1–10
4	Южнее о. Новая Земля	7	11	0,64	300	1300	6–16	4–14
8	Вблизи о. Белый	6	16	0,38	300	1500	4–16	4–9

Максимальная длина волны ВВ, более 3 км, была зафиксирована в районе к северо-западу от арх. Земля Франца-Иосифа. Другие случаи наблюдения длины волн более 2 км были отмечены в районах 5 и 6. Поскольку детальность проявлений ВВ на РЛ-снимках ограничена размерами пиксела 75×75 м, в большинстве случаев минимально различимая длина волны ВВ составила 250–300 м. ВВ с меньшими длинами волн на снимках в указанных режимах РЛ-съемки определить невозможно. Максимальные значения длины фронта ведущей волны наблюдались севернее мыса Нордкап – 140 км, к северо-западу от арх. Земля Франца-Иосифа – 80 км, и в Воронке Белого моря – 75 км. Количество волн в пакетах для одного и того же района сильно варьировалось в течение сезона. Максимальное количество волн наблюдалось северо-западнее арх. Земля Франца-Иосифа – до 20 волн в пакете.

В целом стоит отметить, что в большинстве случаев проявления ВВ на РЛИ имели дугообразную форму. В ряде случаев по последовательным пакетам ВВ было несложно определить примерный район их генерации. Также обычно наблюдалось характерное увеличение расстояния между последовательными пакетами ВВ по мере удаления от места генерации и уменьшение длины волны в пакетах от фронта к тылу в силу нелинейности ВВ.

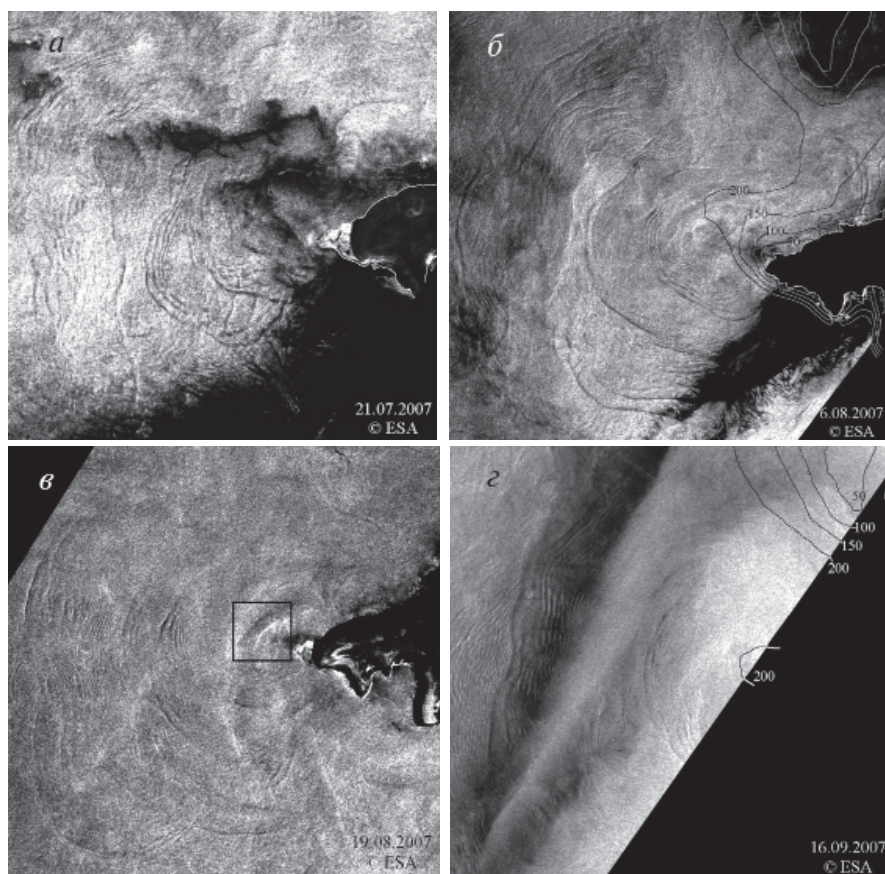


Рис. 3. Фрагменты РЛ-снимков Envisat ASAR с регулярным проявлением внутренних волн приливного характера к западу от о. Земля Александры, арх. Земля Франца-Иосифа за период с 21 июля по 16 сентября 2007 г.: *a* – 21 июля, *б* – 6 августа, *в* – 19 августа *z* – 16 сентября. © ESA



Рассмотрим подробнее район к северо-западу от арх. Земля Франца-Иосифа. Как показано выше, данный район отмечен максимальными частотой наблюдения ВВ и количеством их проявлений. Форма и интенсивность проявлений ВВ здесь крайне разнообразны в зависимости от батиметрии и фоновых гидрометеорологических условий. На рис. 3 в качестве примеров проявлений внутренних волн в данном районе представлены фрагменты четырех РЛ-снимков Envisat ASAR за разные даты с июля по сентябрь 2007 г.

Отметим ряд важных особенностей проявлений ВВ на представленных фрагментах РЛИ и их связь с фоновыми ветровыми условиями. Для удобства интерпретации и определения взаимного положения фрагментов снимков на изображениях от 6 августа и 16 сентября 2007 г. (рис. 3б, г) нанесены изобаты 50, 100, 150 и 200 м (USGS Gtop30). Скорость приводного ветра здесь и далее определялась по РЛИ на основе алгоритма СМОД4 [12], направление ветра определялось по модели NCEP GFS 0.5.

На рис. 3а приведен фрагмент РЛ-изображения от 21 июля 2007 г. Метеорологическая обстановка на момент съемки характеризовалась слабым ветром со средней скоростью 3,5–4 м/с северо-восточного направления. На изображении видны несколько последовательных пакетов ВВ с выраженной концентрической формой. Расстояние между пакетами 3,5–7 км. Среднее количество волн в пакетах равно 6–8. Длина фронта ведущей волны – от 30 до 60 км. Ширина пакетов ВВ составляет 3,5–5 км, увеличиваясь по мере удаления от предположительного района генерации. Максимальная длина волны в пакетах соответствует ведущей волне и составляет от 1 до 2,2 км, минимальная длина волны в тылу пакета не более 300 м.

На снимке от 6 августа 2007 г. (рис. 3б) проявления ВВ имеют форму концентрических окружностей, выходящих как бы из одной «точки» генерации. Поле ветра в данном случае характеризовалось скоростью 4–4,5 м/с северного направления. В этих условиях отчетливо видны четыре следующих друг за другом пакета ВВ, границы между ними и внутренняя структура волн в пакетах. Расстояние между пакетами составляет 6–16 км. Длина фронта ведущей волны в пакетах – от 20 до 80 км. Ширина пакетов – от 4 до 14 км. Количество волн в пакетах варьируется от 13 до 20. Длина волны ВВ составляет от 900 м до 3,3 км, минимальная длина в тылу пакетов от 250 м.

На РЛ-снимке от 19 августа 2007 г. (рис. 3в) отчетливо видны лишь отдельные фрагменты последовательных пакетов ВВ. Ветер в фоновой области достигает 9–10 м/с, южного направления. РЛ-контрасты проявлений ВВ существенно ниже, чем в предыдущих случаях. Форма волн в пакетах преимущественно дугообразная. Расстояние между пакетами и длину гребня ведущей волны установить сложно. Количество волн в пакетах – 9 и более. Местами наблюдаются уединенные солитоны. Ширина пакетов составляет 4–10 км. Длина волны в начале пакета – 1,5–2,3 км, минимально различимая длина волны в тылу пакета – 250–300 м.

Основной особенностью РЛИ от 16 сентября 2007 г. (рис. 3г) является наличие атмосферного фронта с штилевой областью, отобразившейся на снимке в виде вытянутого темного участка. На изображении видны два пакета ВВ дугообразной формы, первый и наиболее отчетливый пакет проявился в штилевой области (левая часть фрагмента), второй – в области со средней скоростью ветра около 4,5 м/с и северо-восточным направлением (центральная часть фрагмента). Расстояние между последовательными пакетами составило 14–20 км. Ширина пакетов – 5–13 км. Длина фронта ведущей волны пакета в штилевой области равна примерно 70 км, пакета в центральной части – около 45 км. Количество волн в первом пакете – 14, во втором – 10. Максимальная и минимальная длина волны в первом пакете составили 3200 м (лидирующая волна) и 350 м (в тылу пакета), для второго пакета – 1900 м и 250 м соответственно.

Как видно, на всех фрагментах РЛИ проявления ВВ имели характерную дугообразную форму, позволяющую определить место их предположительной генерации — район к северо-западу от мыса Мэри Хармсуорт (отмечен рамкой на рис. 3а), в котором наблюдается свал глубин с 200 до 50 м (рис. 3б). Также для проявлений ВВ характерно увеличение длины волны в пакетах по мере удаления от предположительного места генерации. Другой особенностью проявлений пакетов ВВ является их максимальная удаленность от района генерации в западном направлении.

Регулярность наблюдения последовательных пакетов ВВ в этом районе позволяет определить внутрисезонные изменения фазовой скорости волн и связать их с характеристиками ВКС. Поскольку полное открытие данного района ото льда наблюдалось лишь в середине июля, т.е. количество исходной полезной информации по району сократилось почти вдвое, для анализа дополнительно были привлечены четыре РЛ-снимка за сентябрь и один снимок за октябрь 2007 г. Измеряя расстояние между последовательными пакетами ВВ и предполагая образование нового пакета волн каждый приливной цикл (т.е. каждые 12,4 часа), несложно определить фазовую скорость волн в пакетах. Значения фазовой скорости пакетов волн в заранее выбранном направлении были определены для всех снимков данного района (табл. 3).

Согласно [11], дисперсионное соотношение для низшей внутренней моды может быть записано в виде:

$$c^2 = \frac{g}{k} \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{\text{cth}kd + \text{cth}k(D-d)}, \quad (1)$$

где  $d$  — глубина залегания пикноклина,  $D$  — глубина,  $\Delta\rho$  — разность плотности воды, расположенной ниже и выше пикноклина,  $c$  — фазовая скорость ВВ,  $k$  — волновое число,  $\rho$  — плотность воды ниже пикноклина,  $g$  — ускорение свободного падения. При  $kd \ll 1$  это выражение принимает вид

$$c^2 = g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{1}{1 + kd\text{cth}k(D-d)}, \quad (2)$$

что при  $\text{cth}k(D-d) \sim 1$  может быть приблизительно записано как:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} d = \frac{c^2}{g}. \quad (3)$$

Таким образом, на основании полученных значений фазовой скорости внутренних волн из табл. 3 и используя выражение (3) можно провести оценку дефицита «массо содержания» верхнего слоя океана и его эволюции во времени (рис. 4).

Полученный результат может быть проинтерпретирован следующим образом. Интенсивный солнечный прогрев в течение лета приводит к увеличению перепада плотности в слое скачка. На рис. 4 этому соответствует период с середины июля по середину сентября. Согласно представленным данным, максимальный перепад плотности в пикноклине приходится на первую половину сентября. Далее наблюдается выраженное уменьшение величины  $(\Delta\rho/\rho)d$ , что может быть объяснено началом осенне-зимнего выхолаживания и ледообразованием в данном районе. Таким образом, определение величины  $(\Delta\rho/\rho)d$  на основе наблюдений ВВ в РЛ-снимках позволяет проводить интегральную оценку изменений характеристик ВКС в период открытия данной части моря ото льда.

Как отмечалось выше, проявления ВВ на РЛИ существенно зависят от фоновых условий приводного ветра (рис. 3). Наблюдения поверхностных проявлений ВВ в данном районе позволяют оценить зависимость РЛ-контраста проявлений ВВ от скорости приводного ветра в фоновой области (рис. 5). В данном случае величина контраста РЛ-сигнала определялась в виде отношения  $K = \sigma_{max}^0 / \sigma_{min}^0$ , где  $\sigma_{max}^0$  — уровень обратного рассеяния на наветренной (светлой) стороне проявле-

Таблица 3

Изменение фазовой скорости внутренних волн западнее о. Земля Александры с середины июля по начало октября 2007 г.

Дата	19.07	21.07	1.08	2.08	4.08	6.08	14.08	15.08
Расстояние между цугами, м	5375	5950	8250	7550	7650	10250	10450	10750
Фазовая скорость цуга, м/с	0,120	0,133	0,185	0,169	0,171	0,230	0,234	0,241
Дата	20.08	31.08	4.09	15.09	19.09	29.09	2.10	
Расстояние между цугами, м	10350	10100	12150	10650	9550	7550	7500	
Фазовая скорость цуга, м/с	0,232	0,226	0,272	0,239	0,214	0,169	0,168	

ния ведущей волны ВВ, а  $\sigma_{min}^0$  – уровень обратного рассеяния на подветренной (темной) стороне проявления ведущей волны.

Из рис. 5 видно, что высокие значения РЛ-контраста,  $K \sim 3-4,5$  дБ, соответствующие наиболее четким проявлениям ВВ в РЛ-снимках, наблюдались при фоновой скорости приводного ветра от 2,5 до 6 м/с. Диапазону скоростей 6–10 м/с соответствуют меньшие значения контраста РЛ-сигнала,  $K \sim 1,5-2,5$  дБ, и проявления ВВ сложнее идентифицируются на РЛИ. При скоростях ветра более 10 м/с «визуальное» обнаружение ВВ в РЛ-снимках крайне затруднено. Поэтому при анализе РСА-изображений с целью обнаружения проявлений ВВ следует обращать особое внимание на характеристики приводного ветра.

В работе проведен анализ проявлений океанских внутренних волн в радиолокационных снимках Баренцева моря с июня по август 2007 г. Как правило, ВВ на РЛИ проявлялись в виде нескольких последовательных пакетов с характерной дугообразной формой, позволяющей приблизительно определить район их генерации. Регулярность наблюдений пакетов ВВ и форма их проявлений позволили сделать вывод о преимущественно приливном характере образования наблюдаемых ВВ. В ходе работы было выделено восемь районов Баренцева моря с максимальным количеством наблюдений пакетов ВВ, определены диапазоны длины волны, длины фронта ведущей волны и количества волн в пакетах ВВ. Для каждого из районов была определена средняя частота наблюдаемости ВВ на РЛ-снимках. В результате максимальная частота наблюдаемости ВВ определена для района к северо-западу от арх. Земля Франца-Иосифа. Для этого же района зафиксированы максималь-

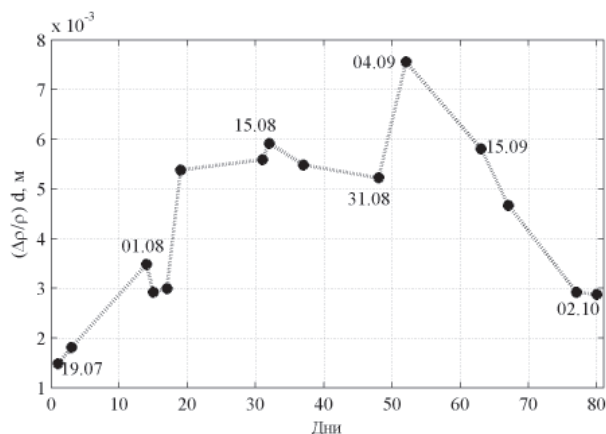


Рис. 4. Относительные изменения дефицита «массосодержания» ВКС и его внутрисезонная изменчивость



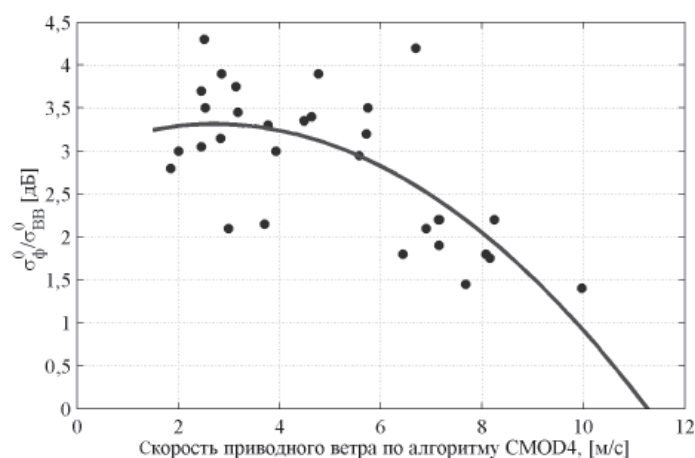


Рис. 5. Зависимость радиолокационного контраста проявлений внутренних волн от фоновой скорости приводного ветра, восстановленного на основе алгоритма СМОД4

ные значения длины волны, длины фронта ведущей волны и количества волн в пакетах ВВ.

Предполагая приливной характер образования ВВ в районе к северо-западу от ЗФИ, были определены значения фазовой скорости ВВ за период с 19 июля по 2 октября 2007 г. Затем на основе полученных значений фазовой скорости ВВ и дисперсионного соотношения для низшей внутренней моды проведена оценка дефицита «массосодержания»  $(\Delta\rho/\rho)d$  верхнего квазиоднородного слоя. Особенность изменений величины  $(\Delta\rho/\rho)d$  в течение рассматриваемого периода согласуется с общим представлением об изменениях характеристик ВКС в летне-осенний период.

На основе наблюдений проявлений ВВ на РЛ-снимках северо-восточной части Баренцева моря определена зависимость РЛ-контраста проявлений внутренних волн от фоновой скорости приводного ветра. Показано, что наилучшим образом ВВ регистрируются на РЛИ в диапазоне скорости ветра от 2,5 до 6 м/с. При более высоких ветрах идентификация ВВ на РЛ-снимках моря затруднительна.

*Данная работа выполнена при финансовой поддержке Норвежского Совета по науке в рамках проектов MAREBASE № ES4303333 и YGGDRASIL № 195724/V11.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г., Морозов Е.Г., Бельчанский Г.И., Гребенюк Ю.В. Радиолокационная съемка и численное моделирование внутренних приливных волн в шельфовой зоне // Исследование Земли из Космоса. 2006. № 2. С. 51–63.
2. Дикинис А.В., Иванов А.Ю., Карлин Л.Н., Мальцева И.Г., Маров М.Н., Неронский Л.Б., Рамм Н.С., Фукс В.Р., Авенариус И.Г., Березин Н.П., Дудкин С.Ю., Зайцев В.В., Леонтьев Е.В., Рынская А.К., Степанов П.В., Федосеева Н.В. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «Алмаз-1». М.: ГЕОС, 1999. 119 с.
3. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
4. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 375 с.
5. Da Silva J.C., Ermakov S.A., Robinson I.S. The character of short-period internal wave ERS SAR signatures at very low wind speeds. // Proceedings of the 3rd ERS Symposium on Space at the Service of our Environment. Florence, 1997. P. 1305–1310.
6. Fu L.L., Holt B. Seasat views oceans and sea ice with synthetic aperture radar // JPL Publication 81–120. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 1982. 200 p.

7. Gargett A.E., Hughes B.A. On the interaction of surface and internal waves // Journal of Fluid Mechanics. 1972. Vol. 52(1). P. 179–191.
8. Jackson C.R., Apel J.R. An Atlas of internal solitary-like waves and their properties. Washington, 2004. 559 p.
9. Kozlov I. SAR signatures of oceanic internal waves in the Barents Sea (Proceedings of the 2nd International Workshop on Advances in SAR Oceanography from Envisat and ERS missions, 25–29 January 2010, Frascati, Italy, (ESA SP-656), ESA Publications Division. 2008. DVD-ROM. Загл. с этикетки диска)
10. Kudryavtsev V., Akimov D., Johannessen J., Chapron B. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. C07016, doi:10.1029/2004JC002505. P. 1–27.
11. Phillips O.M. The dynamics of the upper ocean. New York: Cambridge Univ. Press, 1977. 366 p.
12. Stoffelen A., Anderson D. Scatterometer data interpretation: Estimation and validation of the transfer function CMOD4 // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102(C3). P. 5767–5780.
13. Susanto R.D., Mitnik L.M., Zheng Q. Ocean internal waves observed in the Lombok Strait // Oceanography. 2005. Vol. 18 (4). P. 80–87.
14. Zeng K., Alpers W. Generation of internal solitary waves in the Sulu Sea and their refraction by bottom topography studied by ERS SAR imagery and a numerical model // Int. J. Remote Sensing. 2004. 25(7-8). P. 1277–1281.

I.E.KOZLOV, V.N.KUDRYAVTSEV, S.SANDVEN

### SOME RESULTS OF INTERNAL WAVES STUDY IN THE BARENTS SEA USING SATELLITE RADAR DATA

*The paper describes the results of oceanic internal waves (IW) study in the Barents Sea obtained through the processing of satellite radar imagery for July–August 2007. In general 255 IW packets were identified on 59 Envisat ASAR images. Regions with maximum IW occurrences were identified, wave lengths and numbers of waves in IW packets defined. Interaction of tidal currents with bottom topography is suggested to be the main source of IW's generation for the most of observed packets. Maximum number of IW packets was identified to the north-west from Franz Josef Land. Assuming IW generation by tides, phase speeds of IW were defined. Using dispersion relation for IW Mode 1 and calculated phase speeds of IW packets, estimate of mass content of upper mixed layer and its time evolution are given. Dependence of radar contrast of IW signatures on background wind speed, defining observability of IWs in radar imagery, is presented.*

*Keywords:* oceanic internal waves, the Barents Sea, radar images, upper mixed layer, near-surface wind speed.