

**Картирование внутренних
волн Японского моря
по данным спутникового
дистанционного
зондирования**

Дубина В.А. и Митник Л.М.

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН*

Балтийская ул. 43, Владивосток 690041,
Тел: 8-4232-312-854, e-mail: dubina@poi.dvo.ru

Введение

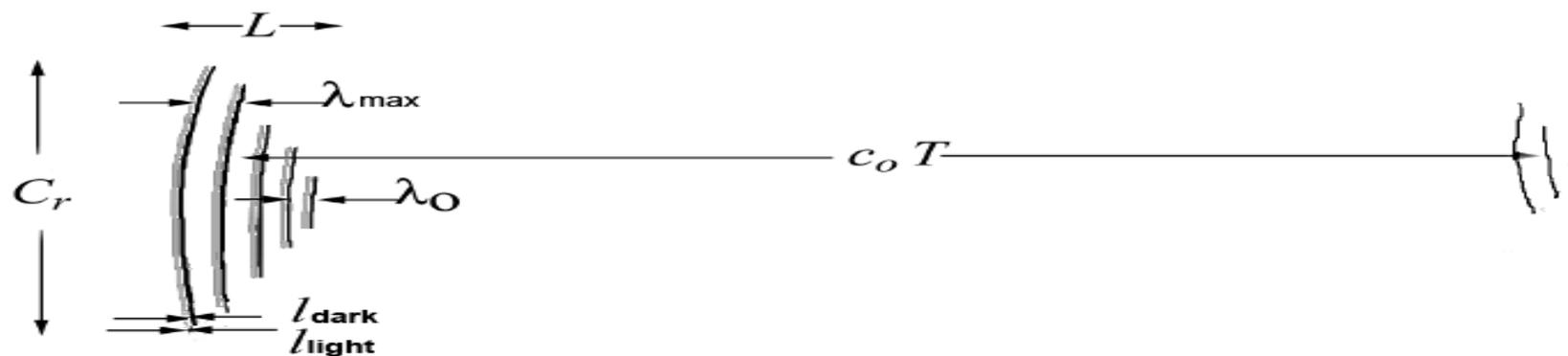
«Внутренние волны можно наблюдать практически всегда, во всех океанах, морях и пресноводных озёрах» [Монин и Красицкий]. Диапазон изменения частот ВВ охватывает область между инерционной частотой и частотой Вайсяля-Брендта. Частотные спектры колебаний температуры океана и горизонтальных компонентов скорости во внутренних волнах внутри этого диапазона не имеют выраженных пиков, что свидетельствует о том, что в океане присутствуют одновременно волны со случайными фазами и амплитудами.

Введение

На диапазон волновых чисел VV не существует ограничений подобных частотным, а пространственные спектры также не имеют выраженных пиков и монотонно спадают с ростом волнового числа с показателем, лежащим в диапазоне $-1\dots-4$.

Данные натурных наблюдений свидетельствуют о климатической горизонтальной изотропии VV .

Причины генерации внутренних волн столь разнообразны, что позволили О. Филипсу заметить: *«...имеется некоторая неопределённость в отношении способа передачи энергии к VV и не из-за недостатка соответствующих механизмов, а скорее из-за избытка их».*

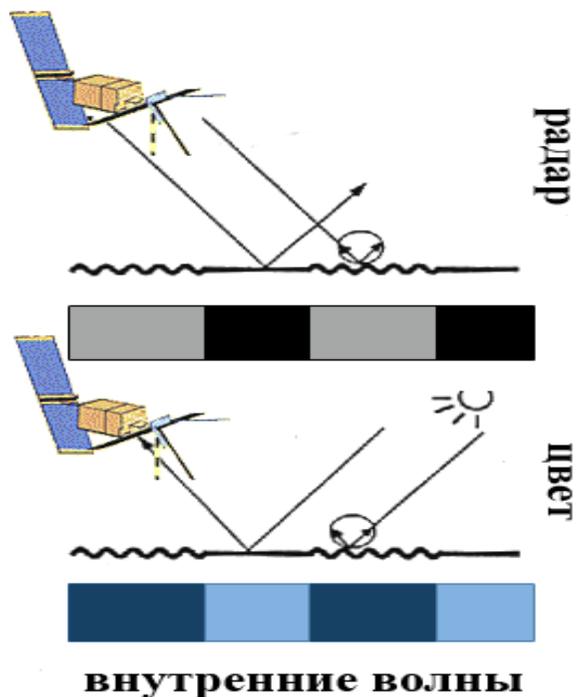


Схематическое представление пакета внутренних волн, сгенерированного на шельфе приливной волной .

Характеристика	Символ
Длина волнового пакета	L
Количество волн в пакете	N
Фазовая скорость	c_0
Максимальная длина волны в пакете	λ_{\max}
Минимальная длина волны в пакете	λ_0
Длина гребня лидирующей волны	C_r
Ширина области повышенной яркости на РЛ изображении внутренней волны	l_{light}
Ширина области пониженной яркости на РЛ изображении внутренней волны	l_{dark}

Наиболее распространёнными считаются пакеты внутренних волн, сгенерированных при взаимодействии приливной волны с шельфом. Каждое индивидуальное колебание в таких пакетах имеет несинусоидальную форму с преобладанием смещения пикноклина вниз (волны понижения).

Амплитуды волн в пакете, их длина и длина гребня уменьшаются от лидирующей волны пакета к конечной. Количество волн в пакете увеличивается на одну с периодом Вяйсяля-Брендта.



Поле скоростей ВВ изменяет параметры ветровых волн, толщину фотического слоя, перераспределяет в нём взвеси и планктон, а на поверхности - плёнки ПАВ, тем самым делая возможным обнаружение ВВ приборами дистанционного зондирования, в том числе и со спутников.

Механизм формирования сигнатур ВВ в видимом диапазоне и в поле РЛ рассеяния периодическими вариациями шероховатости поверхности моря.

В большинство случаев поверхностное проявление ВВ фиксируется на изображениях, полученных в видимом диапазоне и радиолокационными станциями с синтезированной апертурой (РСА). В общем случае ВВ выглядят на спутниковых изображениях в виде квазипериодических линейных структур, яркость которых ниже или выше фоновой.

Данные

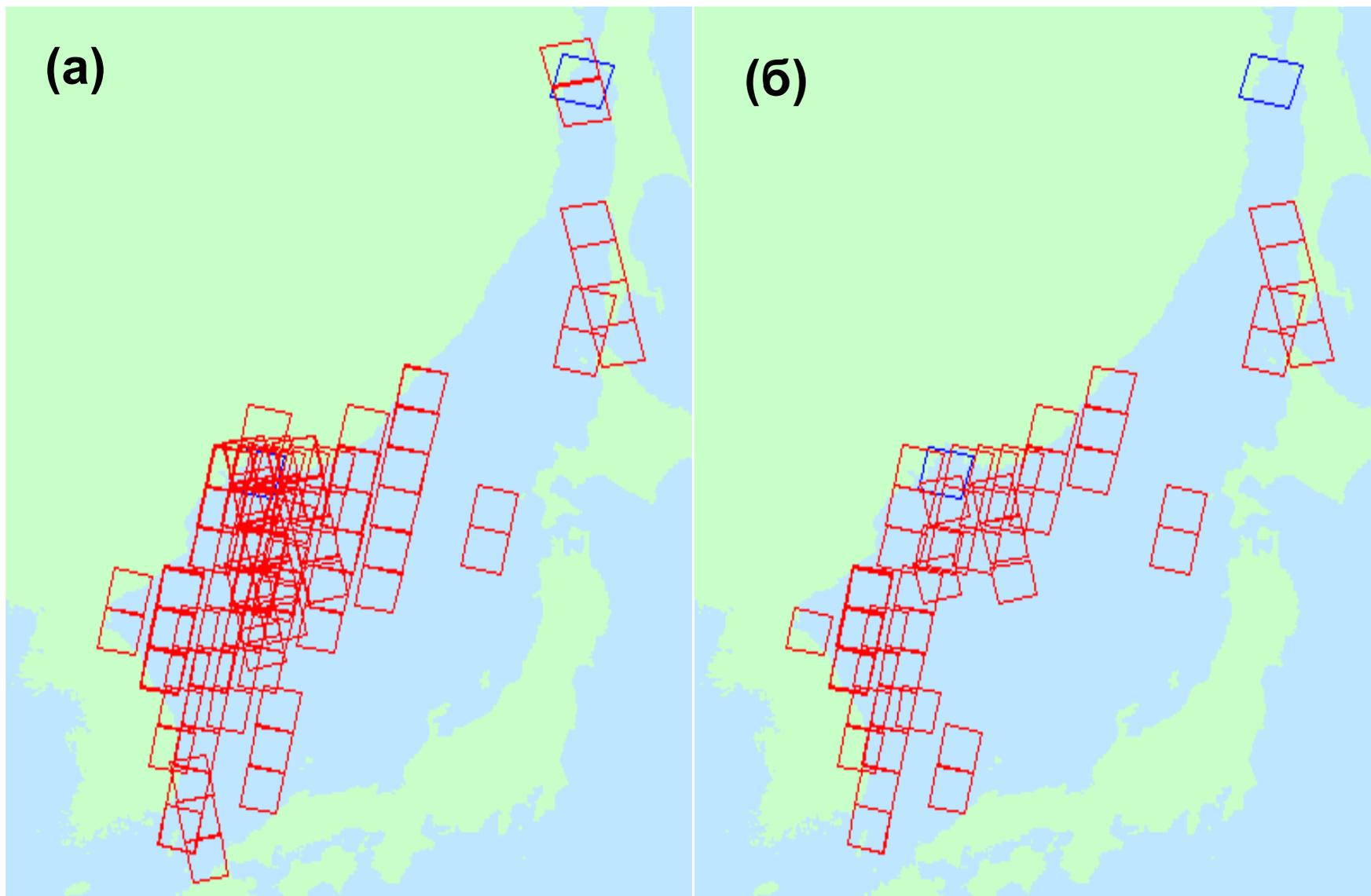
Для анализа пространственной и временной изменчивости внутренних волн в Японском море использовались:

-архив изображений РСА со спутников **ERS-1, ERS-2, Envisat** (около 350 РЛИ) и

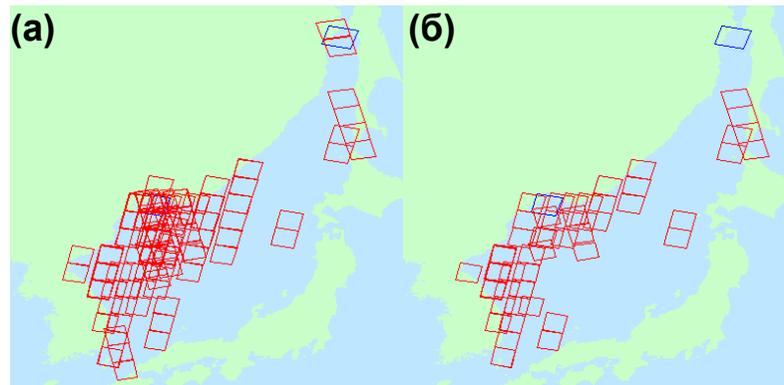
-изображения в видимом диапазоне, полученные спектрорадиометром **MODIS** со спутников **Terra** и **Aqua**.

Архив изображений РСА вместе с метаданными, включающими результаты интерпретации изображений, интегрирован в океанографическую ГИС, созданную на основе технологий Интернета и являющейся корпоративным ресурсом компьютерной сети нескольких институтов ДВО РАН.

Пользователи при наличии соответствующего уровня доступа имеют возможность просматривать каталог и изображения РСА, а также выполнять комплексные запросы на выборку данных по тем или иным критериям (временные интервалы, географические координаты, характеристики спутников, номера орбит, явления в океане и в атмосфере).



Результат выполнения запросов на предоставление всех РЛ изображений Японского моря (а) и изображений с ВВ (б)



а – все изображения по Японскому морю;
 б – изображения, на которых зарегистрированы поверхностные проявления внутренних волн.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Количество фреймов	0	0	0	0	5	4	3	5	35	7	3	1

ВВ зарегистрированы почти на всей акватории моря, которая представлена в архиве изображений РСА. Внутренние волны зарегистрированы на 63 РЛ-изображениях, принятых в период с мая по декабрь месяц (таблица 1). На многих изображениях видны несколько пакетов ВВ. Покрытие Японского моря архивными изображениями РСА отражает районы интересов ТОИ. Поэтому юго-восточная часть Японского моря не исследовалась.

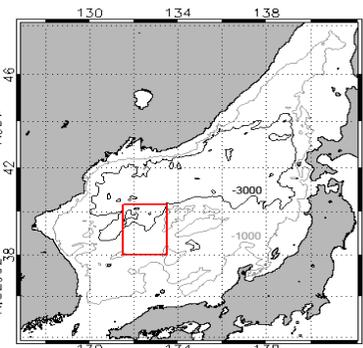
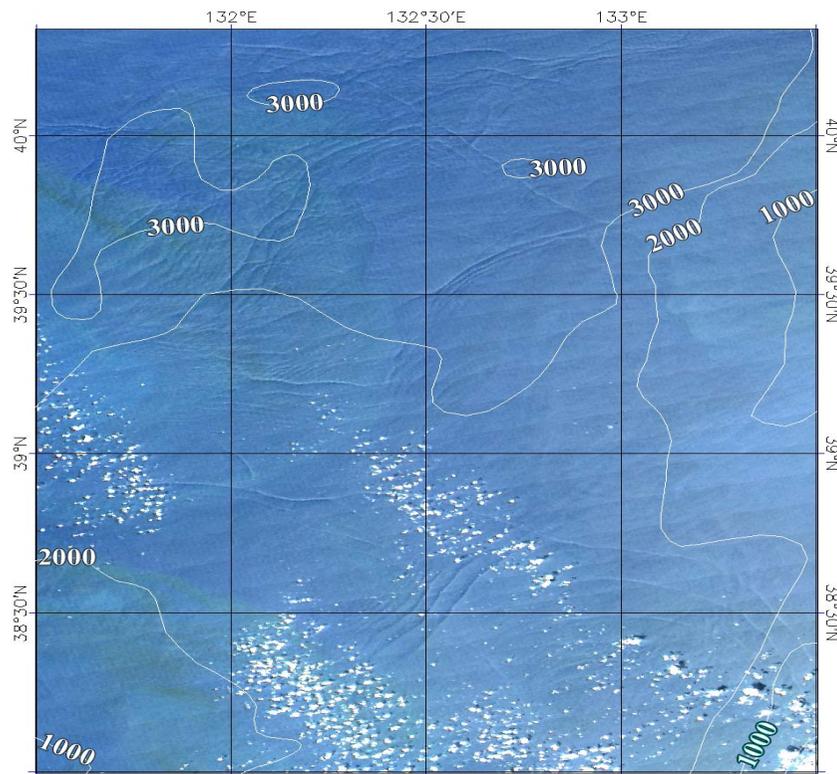
Внутренние волны на изображениях MODIS

Изображения Японского моря, полученные спектрорадиометром MODIS, отбирались и загружались через портал MODIS Rapid Response Project at NASA/GSFC (<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>).

Для анализа использовались изображения в видимом диапазоне с разрешением 250 м в истинном цвете, для чего комбинировались каналы 1, 4, 3 (центральные длины волн 0,645, 0,555 и 0,469 мкм). Внешние признаки поверхностного проявления внутренней волны на изображениях в видимом диапазоне схожи с поверхностными проявлениями других мезомасштабных океанических и атмосферных явлений.

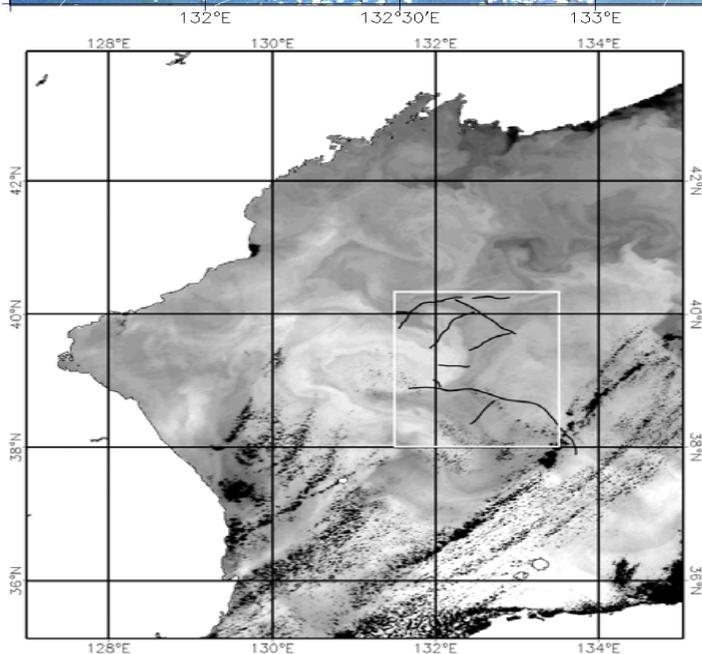
Для последующего анализа отбирались только те случаи, когда,
-характерные для ВВ сигнатуры были видны на изображениях, полученных и с Aqua, и с Terra, осматривающих один и тот же участок поверхности Земли с разницей во времени 80-110 мин и когда
-положение сигнатур не совпадало с температурными градиентами на ИК-изображениях на 11.03 мкм.

Были проанализированы все изображения за август-октябрь 2003-2005 гг., на которых хотя бы четверть акватории Японского моря была открыта от облаков. Дополнительно просматривались отдельные спутниковые изображения, полученные в мае-июле и в ноябре. Внутренние волны на изображениях MODIS были зарегистрированы только в августе-октябре.



Изображения MODIS со спутника Aqua за 03:55 Гр 23 сентября 2003 г.

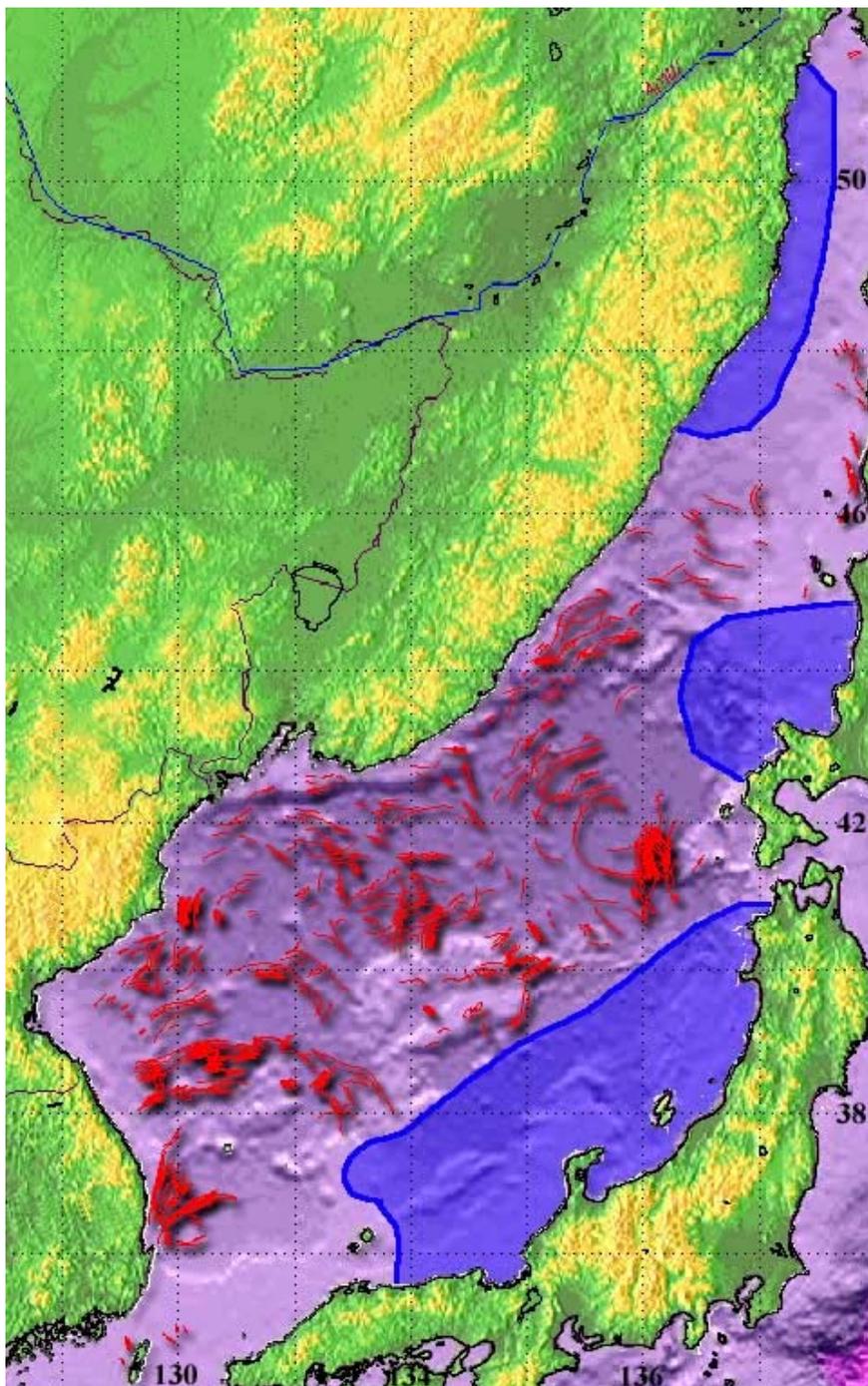
Проявления ВВ на видимом изображении и положение первых солитонов, нанесенное на ИК-изображение.



Границы изображения показаны красным прямоугольником.

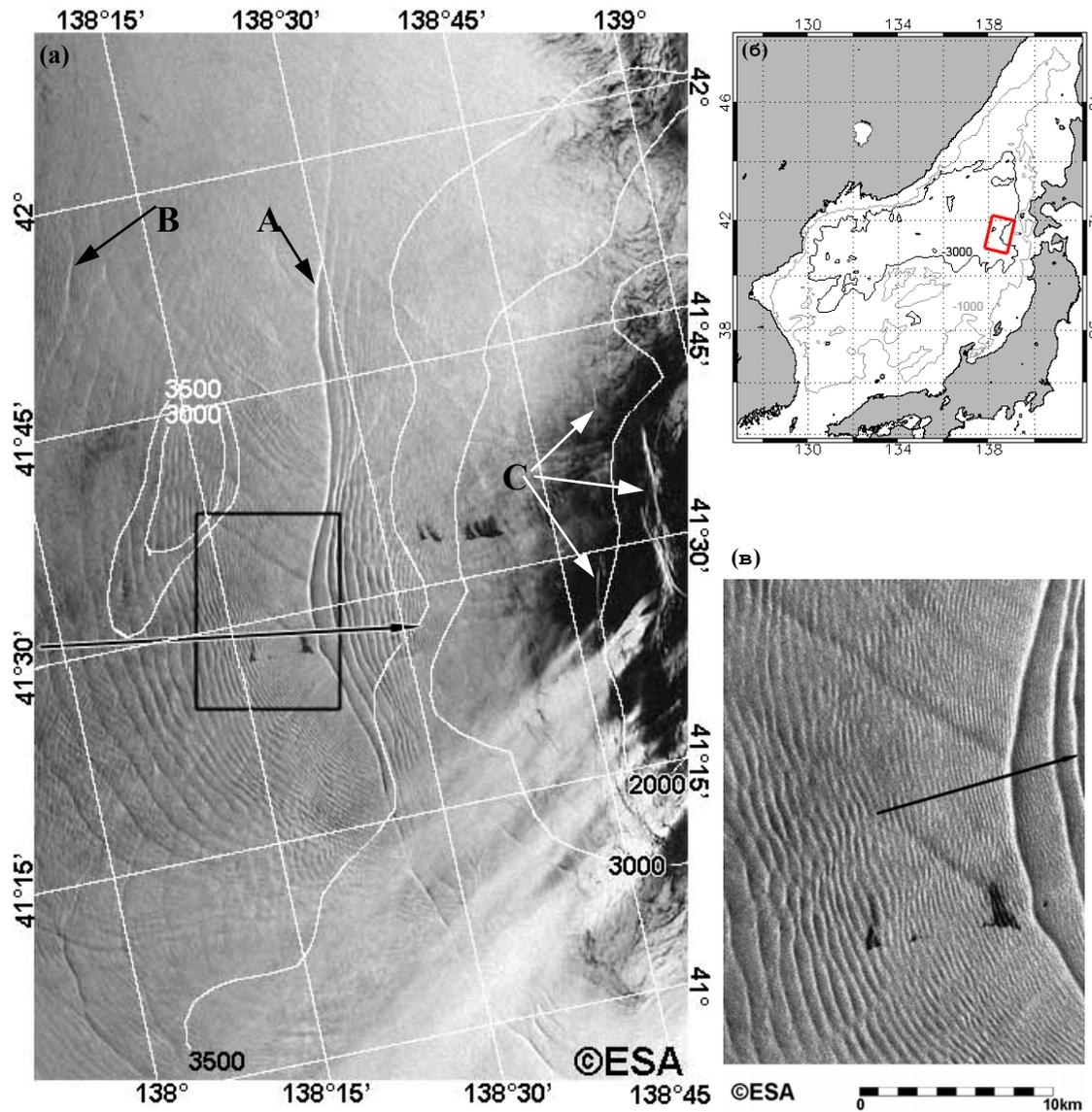
**Пары изображений
спектрорадиометра MODIS,
использованные для картирования
внутренних волн в Японском море.**

Дата	Время, Гр.
	Terra/Aqua
15.09.2003	02:10/03:50
22.09.2003	02:20/03:55
14.09.2004	01:50/03:20
15.09.2004	02:25/04:05
19.09.2004	02:00/03:40
22.09.2004	02:20/04:10



**Пространственное
распределение
внутренних волн в
Японском море по
результатам
спутниковых
измерений.**

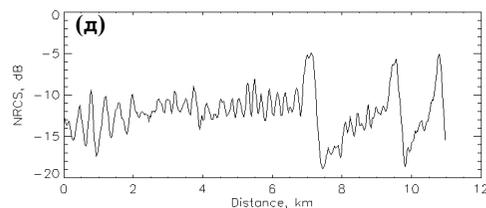
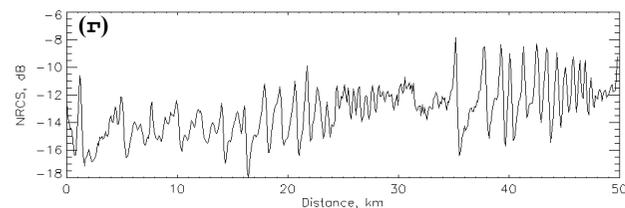
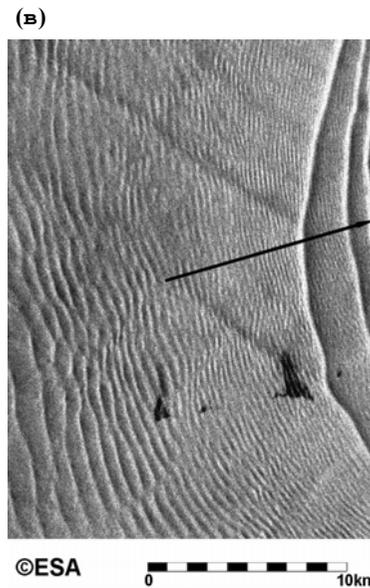
**Синим закрашены
области, в которых ВВ не
зарегистрированы
(включая печатные
источники и изображения
quicklook).**



Пакеты внутренних волн к западу от о. Осима на изображении РСА, полученном со спутника ERS-2 7 сен 1997 г. в 01:32 Гр (а). Изобаты показаны белыми линиями.

Красный прямоугольник отмечает границы изображения РСА на карте Японского моря (б).

Увеличенный фрагмент изображения (в) очерчен чёрным прямоугольником на рисунке (а).



Профили УЭПР (в дБ) вдоль сечений, указанных на рисунках (а) и (в) стрелками, соответственно (г) и (д) .

Характеристики внутренних волн, зарегистрированных 7 сен 1997 г. в 01:32 Гр. на изображении РСА со спутника ERS-2

Характеристика	Символ	А	В
Длина волнового пакета, км	L	17	42.6
Расстояние между лидирующими волнами пакета, км	$c_0 T$	45.5/36.4	42.6
Количество волн в пакете	N	≥ 16	~ 30
Максимальная длина волны в пакете, км	λ_{\max}	1.0-2.7	4.4->6
Минимальная длина волны в пакете, км	λ_0	0.3	0.3
Длина гребня лидирующей волны, км	C_r	140	96
Максимальная ширина области повышенной яркости, м	l_{light}	350	500
Максимальная ширина области пониженной яркости, м	l_{dark}	350	800

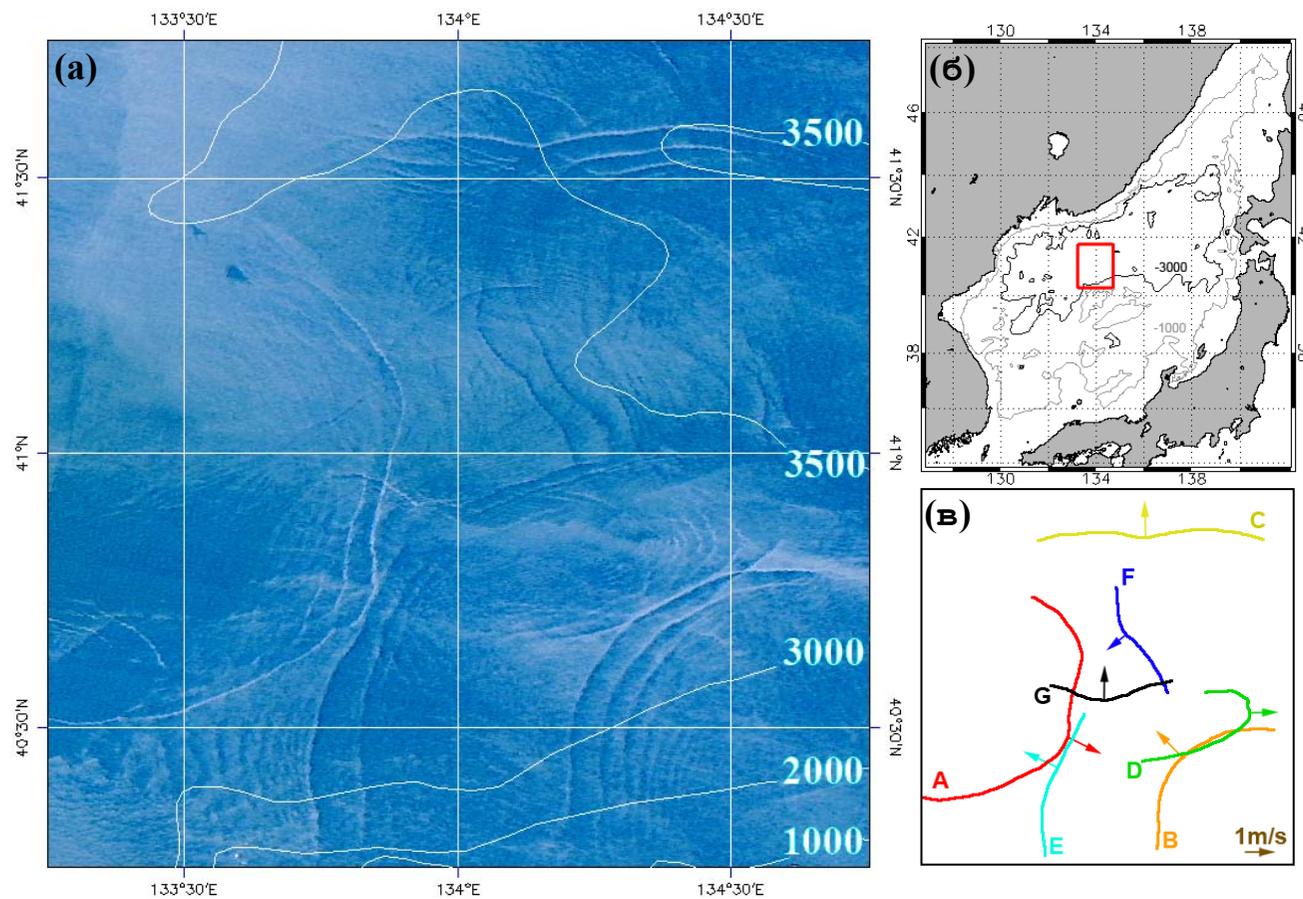
Характеристики внутренних волн, зарегистрированных 7 сен 1997 г. в 01:32 Гр. на изображении РСА со спутника ERS-2

Пакет *A* с длиной гребня лидирующей волны ≈ 140 км состоит как минимум из 16 солитонов. Отпечатки этих солитонов в поле шероховатости поверхности моря видны полностью только в центральной части цуга. В северной части они видны частично, а в южной части – фрагментарно, в двух участках. Расстояние между солитонами в сечении через центр пакета *A* меняется от 2,5 до 0,3 км .

В пакете *B* расстояние между солитонами изменяется от ≈ 5 до 0,3 км на расстоянии ≈ 37 км, а далее, в тылу пакета, наблюдается «волновой след» длиной не менее 5 км, в котором длина волн составляет ~ 200 м. На этот хвост набегают первые солитоны пакета *A*. Подобные периодические линейные структуры с длиной волны ~ 200 и шириной всей группы волн до 15 км изолированно от цугов нелинейных волн наблюдаются в верхней четверти изображения, как «оторванные хвосты»

15 сентября 2003 г.

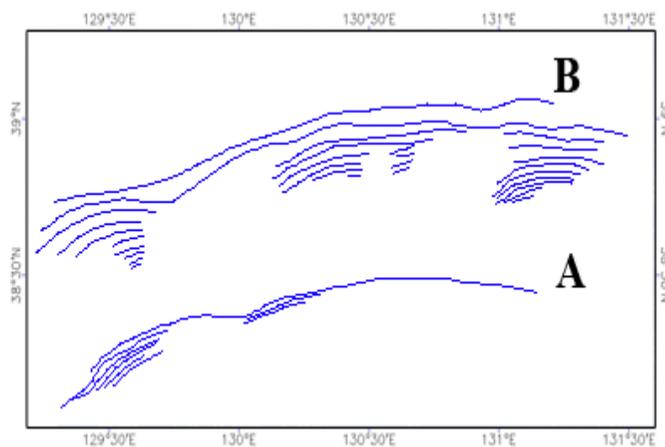
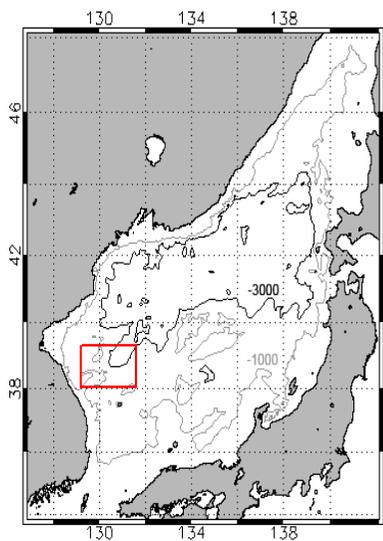
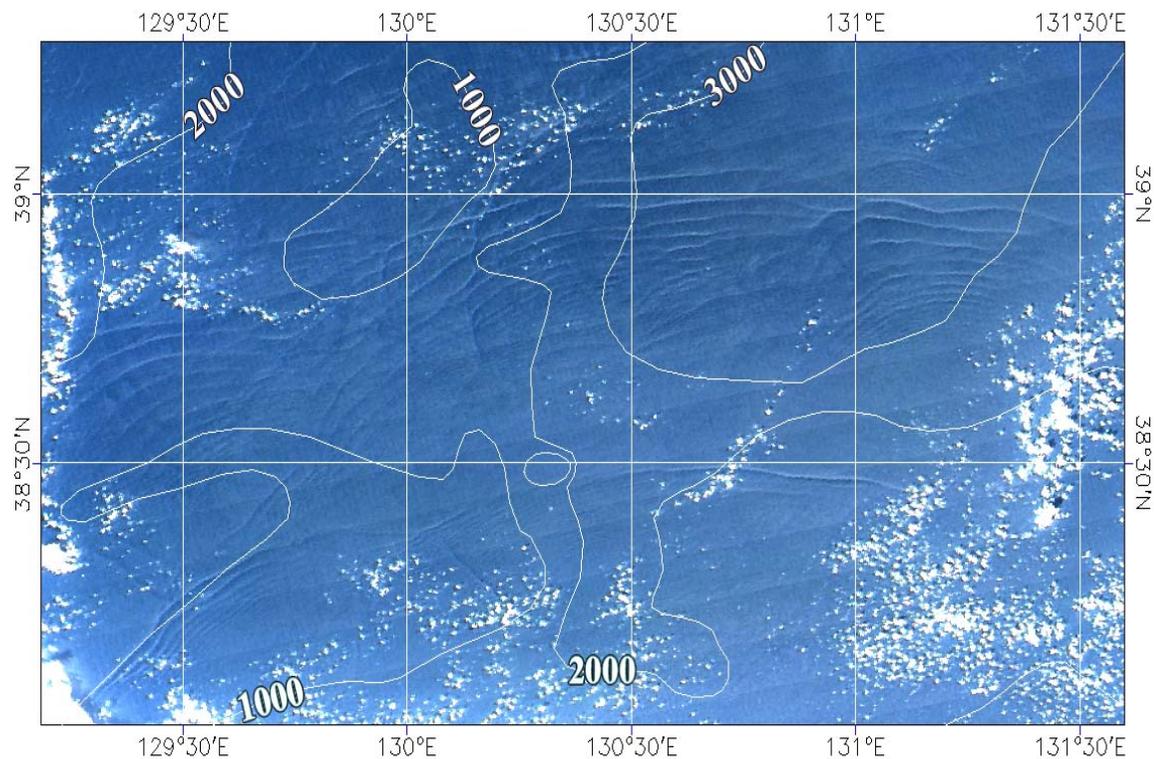
Изображение за 15 сентября охватывает центральную котловину Японского моря к северу от северного хребта Ямато. На изображении отчётливо регистрируются как минимум 7 пакетов внутренних волн, лидирующие солитоны которых изображены на схеме (в). Длины их гребней варьируются от 40 до 122 км, скорости перемещения - от 0,6 до 1,6 м/с. ВВ смещаются над глубинами более 3000 м во всех направлениях, кроме северо-восточного, южного и западного. Волны в пакетах С и G, смещающихся на север, имеют форму, вогнутую в направлении, обратном направлению перемещения. Максимальные длины внутренних волн *λ* *тах* изменяются от 3,5 до 8 км.



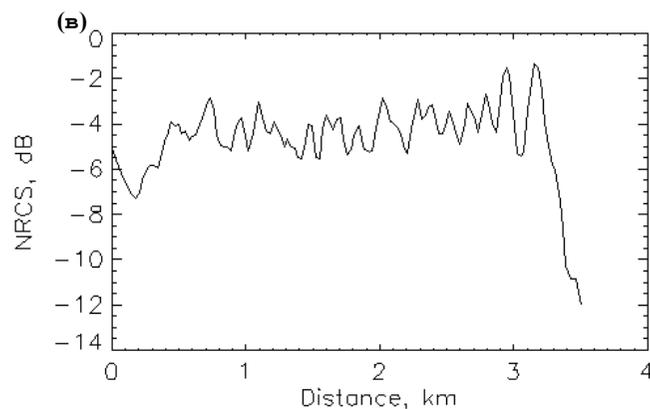
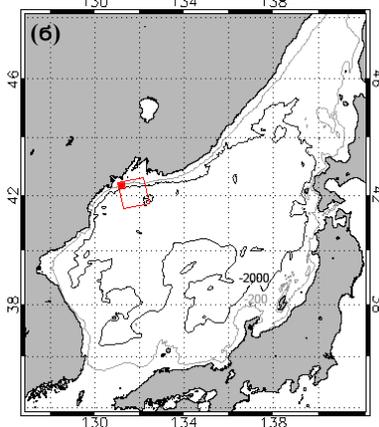
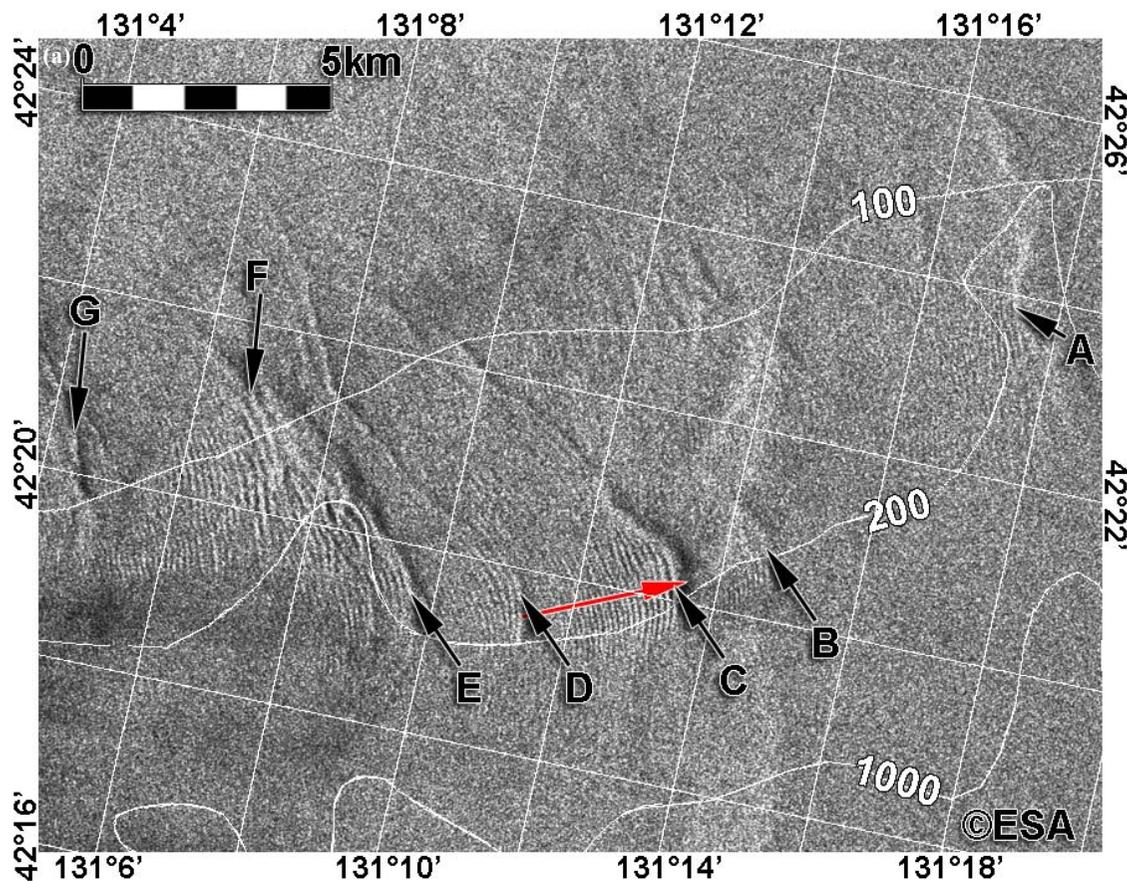
Пакеты внутренних волн на изображении в видимом диапазоне, полученном спектрорадиометром MODIS со спутника Terra 15 сентября 2003 в 2:10 Гр (а). Границы изображения на карте Японского моря (б); положение лидирующих волн в пакетах (стрелками показаны скорость и направление перемещения ВВ) (в).

Характеристики внутренних волн, зарегистрированных 15 сен 2003 г. спектрорадиометром MODIS в видимом диапазоне со спутника Terra в 2:10 Гр. и со спутника Aqua в 03:50 Гр. Максимальная длина волны рассчитывалась между первой и второй волнами пакета примерно в средней части гребня. Первое значение - в 02:10 Гр., второе - в 03:50 Гр. Для фазовой скорости указан диапазон.

Волновой пакет	Длина гребня, C_p км	Максимальная длина волны λ_{max} , км	Фазовая скорость, м/с C_0	Направление перемещения
A	122	4.2, 5.2	0.7-1.2	ЮВ
B	74	4.8, 5.2	1.0-1.6	СЗ
C	80	4.8, 5.8	1.1-1.6	С
D	56	5.0, 5.2	1.0	В
E	65	7.2, 8.0	1.3	СЗ
F	40	7.5, 8.0	0.6-1.0	ЮЗ
G	45	2.8, 3.5	1.0	С



Пакеты
внутренних волн
на изображении в
видимом
диапазоне,
полученном
спектрорадио-
метром MODIS со
спутника Aqua
22 сентября 2004
в 4:10 Гр. (а),
границы
изображения на
карте Японского
моря (б) и схема
внутренних волн
(в).

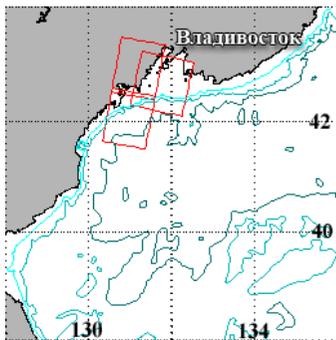


Цуги внутренних волн
 на фрагменте
 изображения РСА со
 спутника ERS-2 за
 29 августа 2000 г. в
 13:27 Гр (а).
 Границы изображения
 РСА на карте
 Японского моря
 отмечены красным
 прямоугольником (б).
 Профиль УЭПР (в дБ)
 вдоль сечения,
 указанного красной
 стрелкой на рисунке (а)

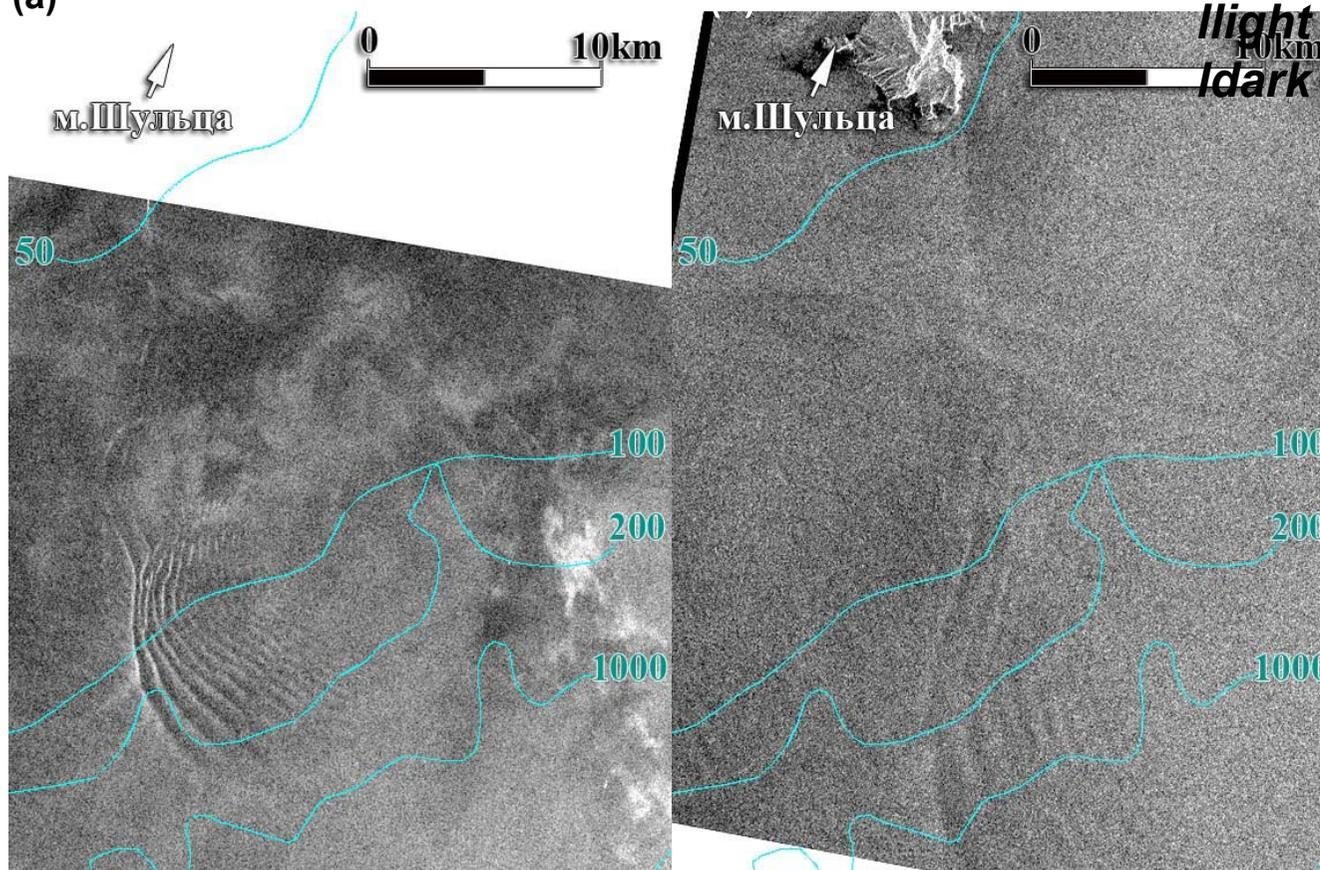
Пакеты внутренних волн в юго-западной части залива Петра Великого

На изображении РСА со спутника ERS-2 за 29 августа 2000 г. в 13:27 Гр. различимы как минимум 7 цугов ВВ. Длина гребней у всех лидирующих солитонов - $\approx 8-10$ км. В поле РЛ-рассеяния эти солитоны выглядят как тёмные волнистые линии, к которым примыкают линии повышенной по сравнению с фоном яркости. Волны смещаются вдоль кромки шельфа на глубинах от $\approx 80-90$ м до 300-400 м.

Последующие солитоны в пакетах различимы только за южной частью лидирующих волн и длина их гребней составляет 2-4 км. Максимальная длина волны в пакетах - $\approx 200-300$ м, минимальная – меньше 100 м. В пакете С, лучше различимом, чем остальные, количество волн не менее 20. Пакеты ВВ смещаются в направлении подводного каньона, положение которого отмечено изгибом изобаты 200 м в правой части изображения. Этот каньон является местом генерации ВВ, которые затем движутся в направлении, противоположном тому, что было отмечено 29 августа 2000 г. Примеры такой генерации зафиксированы на изображениях РСА со спутника Envisat 7 и 10 октября 2005 г.

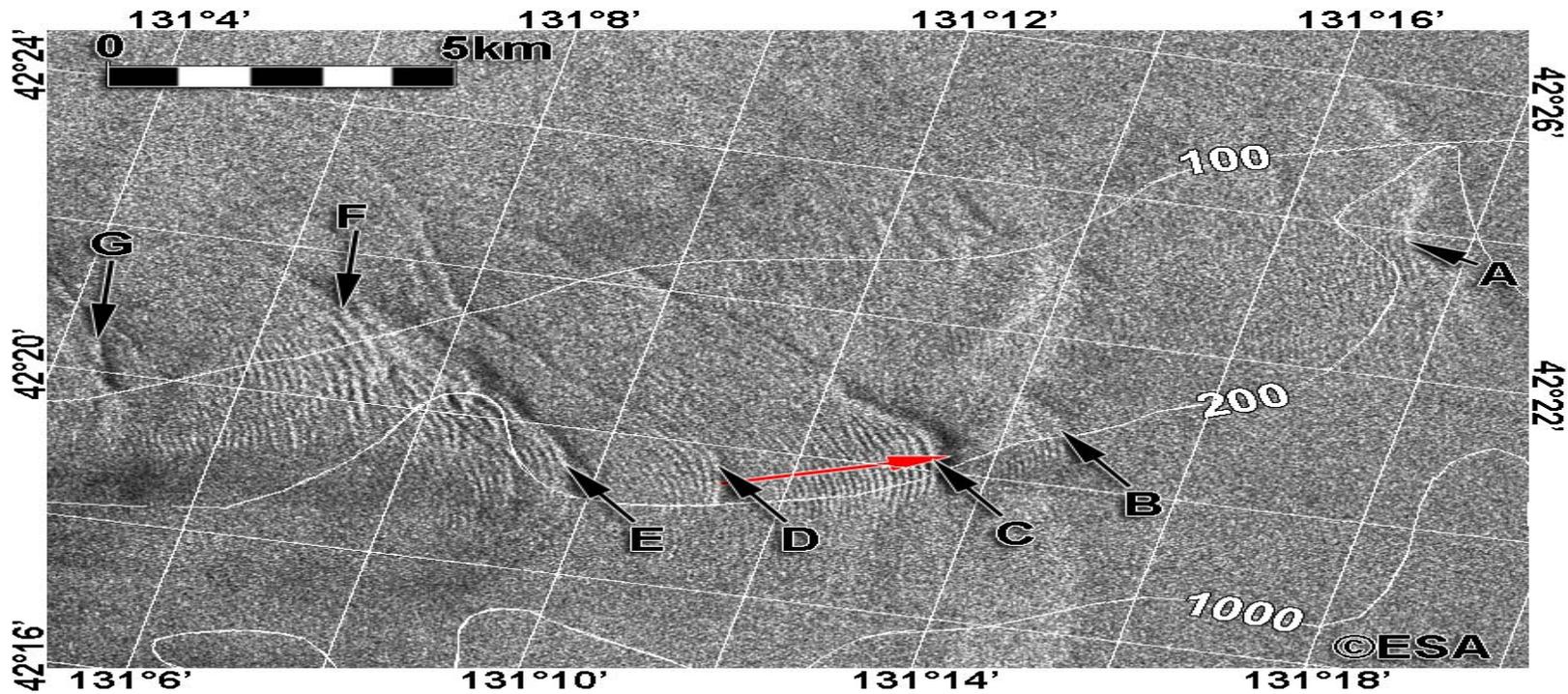
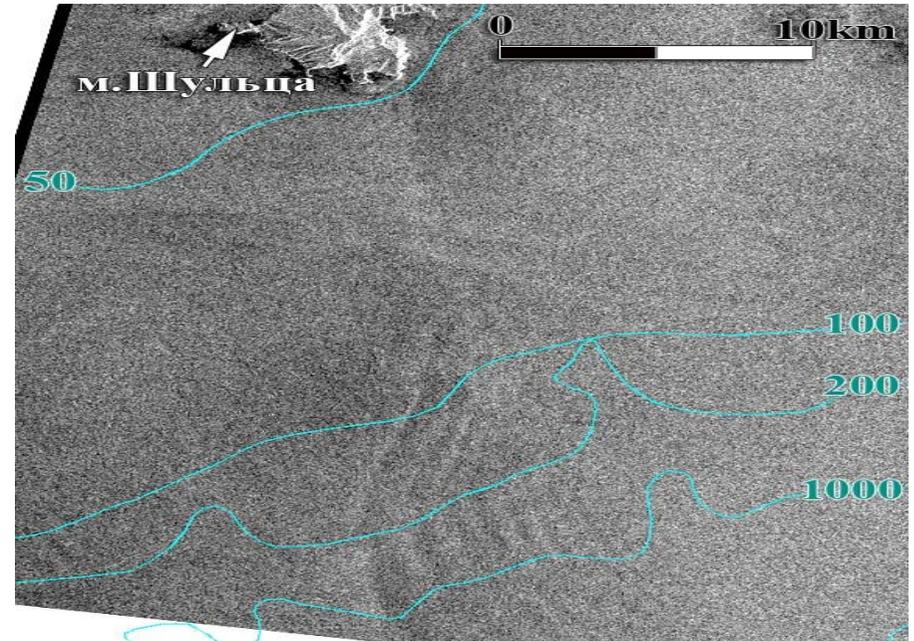
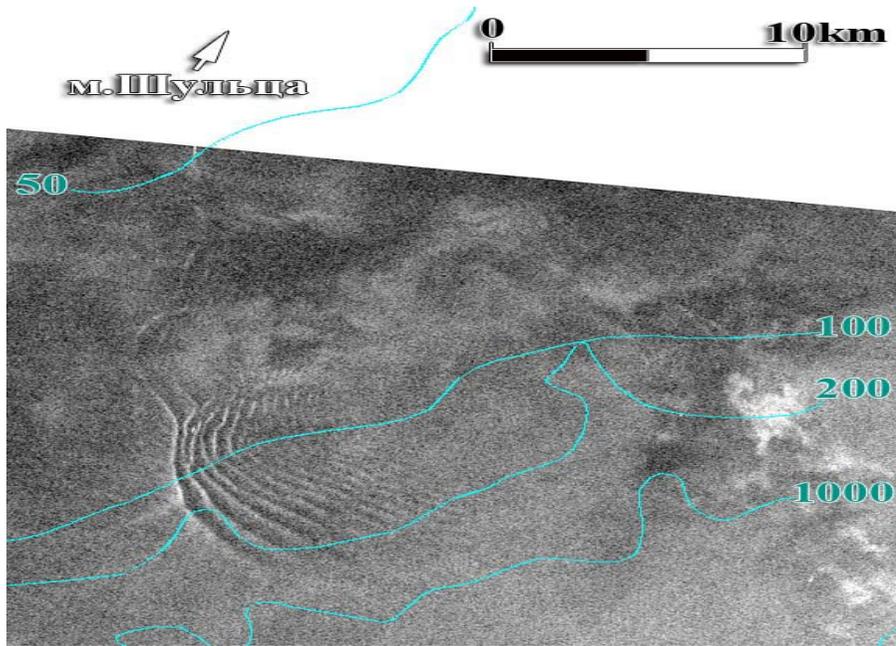


(a)



Символ	7 окт	10 окт
L	5.6	8
N	≥ 11	≥ 8
λ_{max}	0.3-1.0	1.5-2.4
λ_0	0.3	0.6
Cr	10	15*
I_{light}	500	500
I_{dark}	500	1000

Пакеты внутренних волн к югу от п-ва Гамова в заливе Петра Великого на изображениях РСА, полученных со спутника Envisat 7 октября 2005 г. в 01:25 Гр. (а) и 10 октября 2005 г. в 01:30 Гр. (б)



На акватории Японского моря поверхностные проявления ВВ зафиксированы в районах с глубинами от 30 до 3500 м. Наблюдаются как одиночные волны, так и цуги, количество солитонов в которых достигает 30. Длины гребней лидирующих волн варьируют от 4 до 250 км, длина волны (расстояние между первым и вторым солитонами в пакете) изменяется от 100 м до 14,5 км. Скорость перемещения внутренних волн в открытых районах Японского моря составляет 0,6-1,8 м/с. Оценки получены по данным спектрорадиометра MODIS со спутников Terra и Aqua с разницей в ≈ 100 мин и PCA со спутников ERS-2 и Envisat с разницей в 30 мин. В открытой части моря волны перемещаются во всех направлениях (строго южное направление наиболее редкое), на материковом склоне и шельфе они смешаются как параллельно берегу, так и под различными углами вплоть до 90° .