

Обработка сигналов, информации и изображений

DOI 10.24412/2221-2574-2024-3-25-33

УДК 551.501.89

СВЯЗЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ПАРАМЕТРАМИ ФИЛЬТРА ГАБОРА

Федосеева Наталья Владимировна

кандидат географических наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ).

E-mail: fednat@mail.ru

Симакина Татьяна Евгеньевна

кандидат физико-математических наук, доцент, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ).

E-mail: tatiana.simakina@gmail.com

Щербакова Валерия Александровна

студент, Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ).

E-mail: shebakova72@mail.ru

Адрес: 192007, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79.

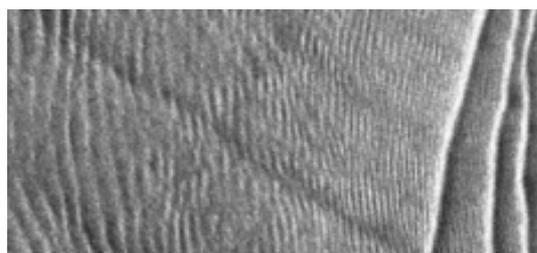
Аннотация: Для извлечения информации о термической структуре вод и динамике происходящих процессов, в частности внутренних волн (ВВ), в районах, используемых для рыбного промысла, целесообразно использовать радиолокационные спутниковые изображения. Горизонтальные градиенты скорости течения, вызывающие внутренние волны, модулируют шероховатость морской поверхности, перераспределяют взвеси, планктон и плёнки ПАВ, что отражается на радиолокационных изображениях в виде квазипериодических линейных структур, яркость которых ниже или выше фоновой. Выполнена обработка радиолокационных изображений морской поверхности фильтром Габора, показана связь параметров фильтра с характеристиками поверхностных проявлений внутренних волн – длиной волнового пакета и количеством волн в нём, шириной областей повышенной и пониженной яркости на изображении ВВ, длиной гребня лидирующей волны, минимальной и максимальной длиной волны в пакете, фазовой скоростью. Количественная оценка поверхностных проявлений внутренних волн позволяет распознавать внутренние волны с различной геометрией и генезисом, выявлять места их постоянной генерации, а также восстанавливать скорость приводного ветра.

Ключевые слова: Внутренние морские волны, РСА, радиолокационные изображения, Sentinel-1, параметры фильтра Габора.

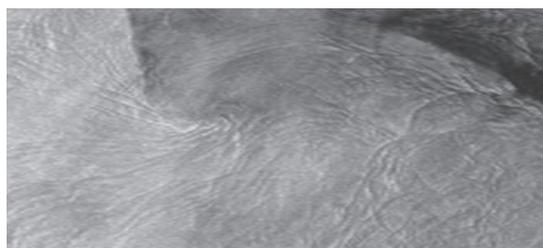
Внутренние волны

Сведения о характеристиках внутренних волн (ВВ) в морях и океанах по данным *in situ* весьма скудны. Они ограничиваются авиационными и судовыми наблюдениями, эффективности которых препятствуют неблагоприятные гидрометеорологические условия и нерегулярность выполняемых измерений. Этому недостатку лишены спутниковые изображения, полученные радиолокационными станциями с синтезированной апертурой (РСА) в микро-

волновом диапазоне электромагнитного спектра. Внутренние волны связаны с горизонтальными градиентами скорости поверхностного течения, и, вызывая модуляции шероховатости морской поверхности, приводят к пространственным вариациям обратного рассеяния радиолокационного сигнала. Радиолокационные сигналы РСА не проникают в глубь водоёмов, однако пространственные вариации его обратного рассеяния обусловлены изменением шероховатости поверхности моря, вызванным



а) в Японском море (ERS-1)



б) в Охотском море (Sentinel)

Рис. 1. Примеры ВВ на радиолокационных изображениях

внутренними волнами. Не только океанические ВВ могут оставлять «поверхностные проявления» на радиолокационном изображении (РЛИ). Атмосферные волны, образующиеся в стратифицированном слое атмосферы, также проявляются в поле шероховатости морской поверхности из-за разной скорости приводного ветра под их гребнями и ложбинами.

«Следы» внутренних морских волн на изображениях РСА можно увидеть при скорости ветра меньше 10 м/с [1]. Это нелинейные волны с когерентной структурой, которые переносят массу, импульс и энергию и могут распространяться на сотни километров [2]. Они могут иметь длину гребня более 200 км, амплитуду до 170 м и фазовую скорость до 2,9 м/с.

Частая причина генерации ВВ — взаимодействие прилива и выступающих элементов подводного рельефа [3]. Соответственно, рельефная донная топография и сильные приливные течения провоцируют более частые появления ВВ [4]. Поэтому повышенной интенсивностью внутренних волн отличаются материковые окраины Мирового океана — переходная зона между глубоководными районами океана и континентальным шельфом, где происходит дезинтеграция и разрушение волн [3]. В частности, такие волны регулярно возникают в Мессинском, Гибралтарском и Мозамбикском проливах, Центральной части Бискайского залива, на Атлантическом побережье Пиренейского полуострова и Массачусетса, в Южно-Китайском, Восточно-Китайском, Желтом и Андаманском морях [1–4].

Иногда область распространения ВВ охватывает значительную часть акватории водоёма.

Так, например, ВВ в акватории Авачинского залива Тихого океана занимают 35 % его площади, т.е. можно говорить о глобальном распространении явления [3].

Морские поверхностные внутренние волны на РЛИ проявляются в виде дугообразных чередующихся светлых и тёмных полос, образующих волновые пакеты — цуги (рис. 1). В Мировом океане ВВ обычно встречаются в виде цугов нелинейных волн-солитонов. Если внутренние волны вызваны приливами, группы пакетов волн в поле ВВ отстоят друг от друга на расстояние, равное групповой скорости ВВ, умноженной на период прилива [5].

Поскольку ВВ зачастую обусловлены приливами, в разные периоды количество ВВ в одной и той же акватории может значительно меняться [4]. Так в районе Керченского пролива Чёрного моря в июле 2017 г. наблюдалось аномально большое количество проявлений внутренних волн по сравнению с предыдущим десятилетним периодом, что авторы [6] объясняют формированием резкого и неглубокого пикноклина в результате быстрого потепления после продолжительной относительно холодной погоды.

Положение источника генерации ВВ авторы [3] определили, используя следующий подход. На снимке Landsat-8 в Авачинском заливе был определен лидирующий гребень ВВ, к касательным дуги которого в нескольких точках проведены нормали (рис. 2). Касательные сошлись в области изобаты 500 м, соответствующей бровке шельфа [3].

Немаловажную роль в образовании ВВ могут играть и атмосферные движения. В Курильской котловине волны перемещаются в самых разнообразных направлениях, образуя сложную вихревую структуру. Анализ спутниковых изображений позволил предположить, что источниками возникновения ВВ на юге Охотского моря являются разномасштабные циклоны и антициклоны. Иногда спиралевидная циркуляция циклона может как бы «затянуть» в себя пакет волн, где он либо разрушится из-за подъёма холодной воды в центре циклона, либо гребни цуга сожмутся в один. Такое взаимодействие заметно на радарном снимке со спутника Sentinel-1В на рис. 3 в публикации [1]. Два циклонических вихря «закручивают» пакеты ВВ в направлении своих центров. Более тёмный цвет одного из вихрей обусловлен скорее всего пониженной шероховатостью морской поверхности из-за низкой температуры ядра циклона.

Вследствие сложной батиметрии, неоднородности течений, нелинейной трансформации внутренних приливов, изменчивости скорости ветра и параметров радара поле ВВ на изображениях РСА обычно сложное и пространственно неоднородное.

Материалы и методы

Для обработки радиолокационных снимков был использован 2D-фильтр Габора, в настоящее время широко используемый для обработки изображений [7–11], который описывается следующей формулой [10]:

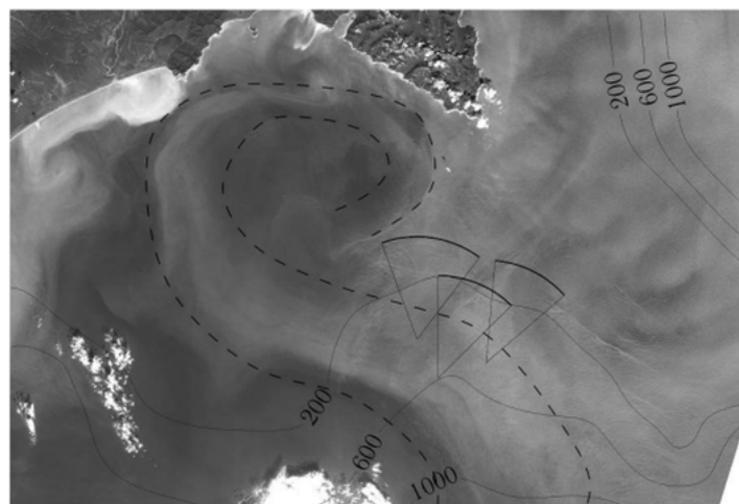


Рис. 2 Определение места генерации ВВ; рисунок из [3]. Снимок Landsat-8 от 22.08.2018. сплошные жирные линии — ВВ, сплошные тонкие линии — предполагаемые места образования ВВ

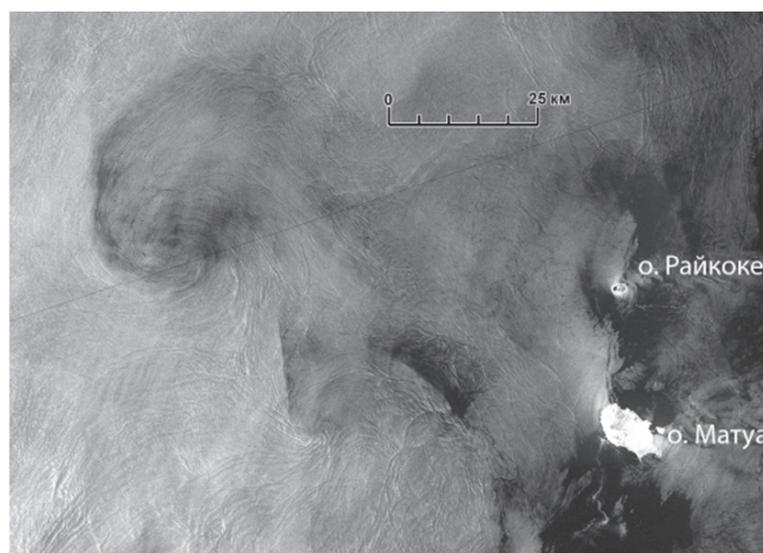


Рис. 3 Взаимодействие циклонических вихрей с ВВ; рисунок из [1]. Sentinel-1В от 29.07.2021.

$$g_{\xi, \eta, \lambda, \theta, \varphi}(x, y) = \exp\left(-\frac{x'^2 + \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \varphi\right),$$

где

$$x' = (x - \xi) \cos \theta - (y - \eta) \sin \theta;$$

$$y' = (x - \xi) \sin \theta - (y - \eta) \cos \theta.$$

Выход фильтра в центре ядра (ξ, η) получается путём свёртки $g_{\xi, \eta, \lambda, \theta, \varphi}(x, y)$ и яркости исходного изображения в окрестностях Ω вокруг (ξ, η) :

$$r_{\xi, \eta, \lambda, \theta, \varphi} = \iint_{\Omega} f(x, y) g_{\xi, \eta, \lambda, \theta, \varphi}(x, y) dx dy,$$

где σ — стандартное отклонение функции Гаусса. В силу быстрого затухания Гауссовой кривой целесообразно выбирать σ порядка одной трети от размера ядра [11].

(ξ, η) — ядро свёртки, значение $(-1, -1)$ означает, что относительная позиция отфильтрованной точки в маске фильтра находится в центре ядра; λ — длина волны; φ — сдвиг фаз; γ — коэффициент сжатия, характеризующий эллиптичность фильтра; $(x - \xi)$ и $(y - \eta)$ задают масштаб шкал по осям; Θ — ориентировка фильтра.

Графически фильтр представляет собой пару эллипсов (рис. 4).

На структурных элементах в ядре, ориентированных по направлению θ , фильтр Габора выдаёт наиболее сильный отклик. Результатом применения фильтра Габора будут выделенные пакеты волн, которые представляют собой области изображения, имеющие один и тот же тип геометрического рисунка.

Связь параметров фильтра Габора с проявлениями ВВ

Для каждого поверхностного проявления внутренних волн могут различаться такие характеристики, как длина волны, длина дуги лидирующего гребня в пакете, направление распространения, количество волн в пакете.

Важнейшими параметрами при выделении контурных паттернов являются σ и λ . Длина волны λ определяется расстоянием между соседними гребнями поверхностных проявлений. Она обусловлена фазовой скоростью внутренних волн, например, длина 300–400 м соответствует фазовой скорости 0,6 м/с [1, 6]. Направление перемещения ВВ можно определить по уменьшению длины гребней волн и расстояния между ними в цугах от лидирующей волны к тыловой.

Параметр λ позволяет детектировать проявления волн различной толщины: чем меньше значение λ , тем более тонкие линии будут де-

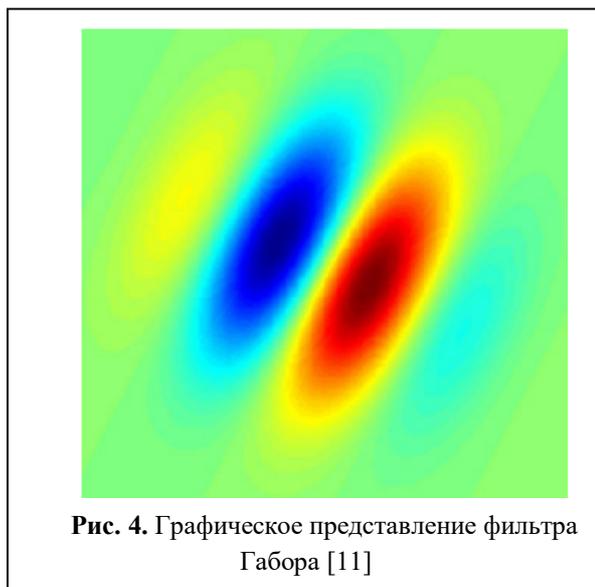


Рис. 4. Графическое представление фильтра Габора [11]

тектированы. Широкие волны фильтр выделяет двумя линиями, поскольку реагирует на них дважды. Параметр λ выбирают в зависимости от пространственного разрешения обрабатываемого РЛИ.

Стандартное отклонение функции Гаусса σ изменяется в диапазоне от 0 до 1, его значение влияет на чувствительность детектирования контуров. При значении близком к нулю фильтром будут выделены действительные мелкие линии и значительное количество ложных контуров, возникающих, например, из-за цифрового шума изображения.

Изменением соотношения параметров σ и λ можно производить фильтры для нахождения цугов ВВ с различными частотами и размерами. Близким к оптимальному является отношение $\sigma / \lambda = 0,5$ [12].

Изменение параметра Θ приводит к выделению контуров разной направленности.

Параметр γ принимает значения от 0 до 1 и определяет соотношение осей эллипсов. При меньшем значении γ эллипсы более вытянуты. Параметр обладает шумоподавляющим эффектом.

Параметр γ , в основном, определяется длиной лидирующего гребня. Произведение γ , длины волны и количества волн в пакете поз-

воляет оценить площадь акватории, занятую поверхностными проявлениями ВВ.

Фазовый сдвиг синусоидальной части фильтра φ влияет на смещение эллипсов относительно центра, подбирается экспериментально [13].

Значительно ускорить распознавание и классификацию РЛ изображений можно, выполняя сегментацию только выделенных фильтром Габора областей, такой подход обеспечивает устойчивость к спекл-шуму [14].

На рис. 4 и рис. 5 представлены примеры обработки оригинального изображения, представленного на рис. 3, с использованием фильтра Габора. На рисунках слева приведены значения параметров фильтра, использованные при обработке, справа исходный снимок и визуализация его выхода. Как показали исследования, наиболее критичным параметром, влияющим на результаты реализации фильтра, является размер ядра. Рис. 4 и рис. 5 демон-

стрируют к каким изменениям в выходном изображении могут приводить вариации размера ядра при одинаковых значениях остальных параметров.

Ещё один пример обработки снимка приведён на рис. 6. В данном случае были использованы те же, что и для предыдущего изображения, значения размера ядра и фазы, но для получения качественного выделения цугов ВВ остальные параметры были существенно изменены.

Таким образом, рис. 4–6 демонстрируют возможности фильтра Габора при выделении паттернов с различной геометрией ВВ.

Анализ полученных изображений продемонстрировал значительное улучшение распознаваемости паттернов с различной геометрией внутренних волн при оптимально подобранных параметрах Габора, что, в свою очередь, должно привести к повышению точности определения характеристик волновых пакетов.

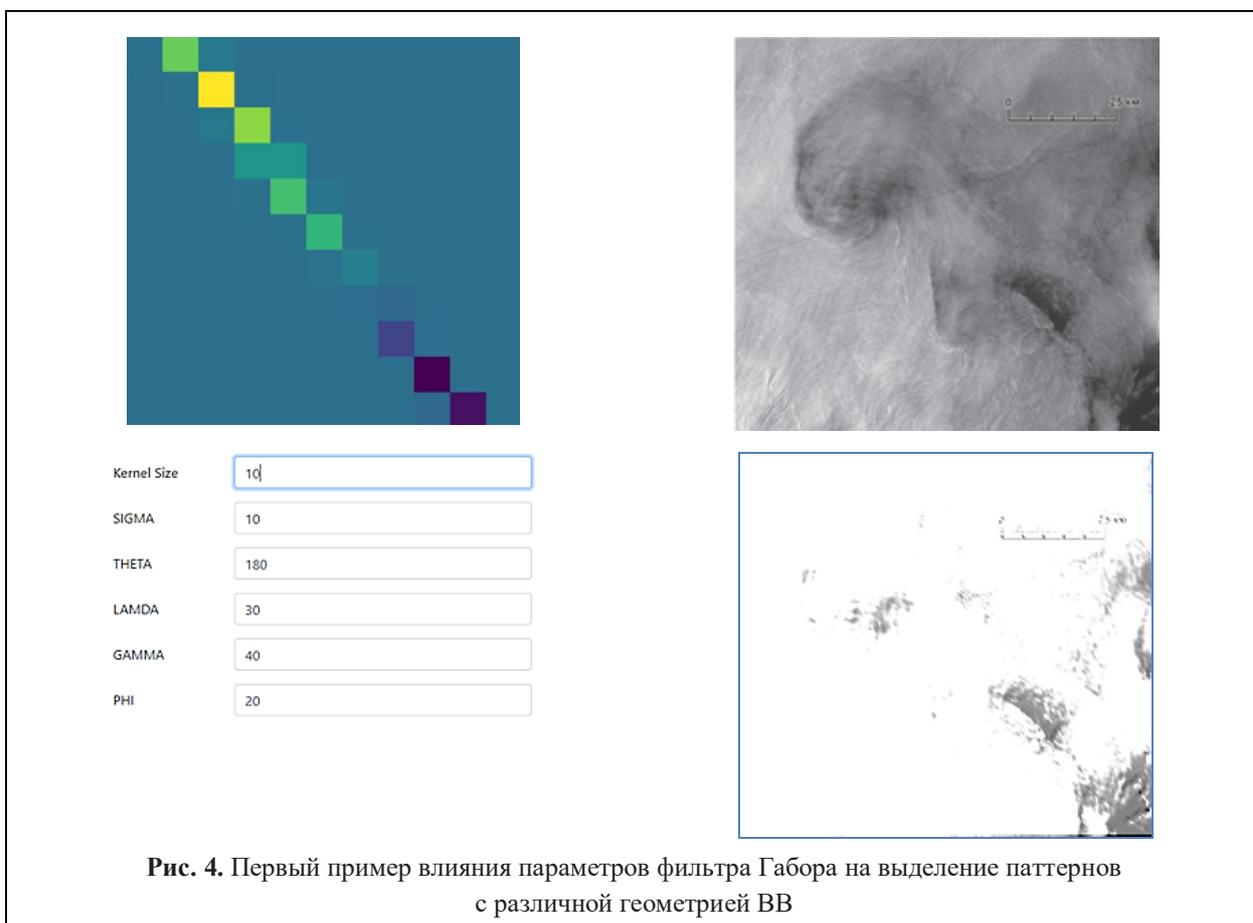


Рис. 4. Первый пример влияния параметров фильтра Габора на выделение паттернов с различной геометрией ВВ

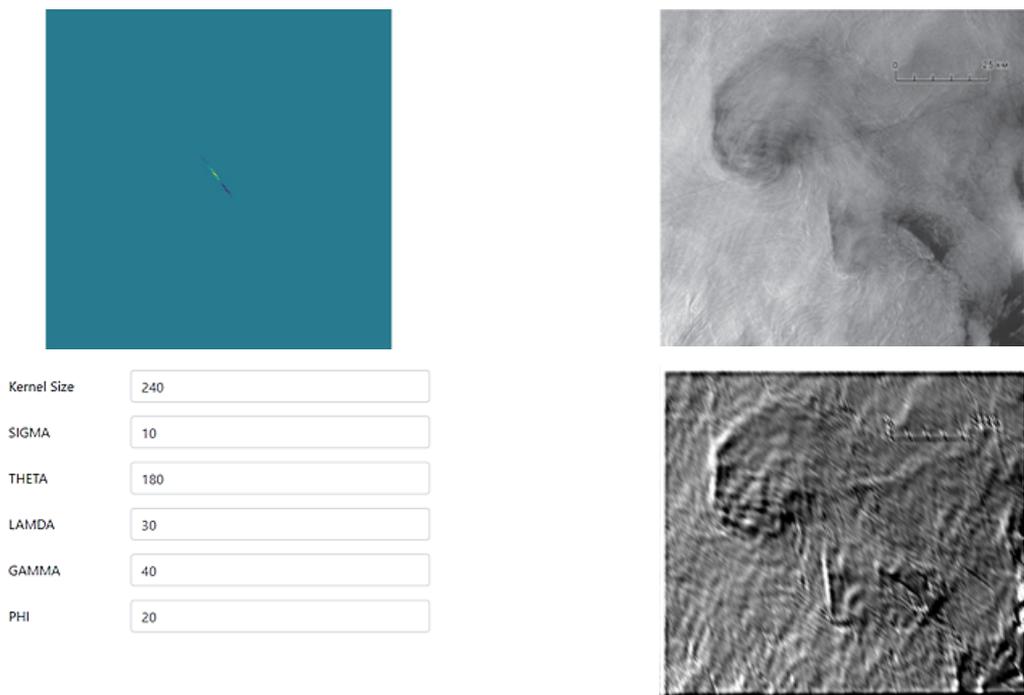


Рис. 5. Второй пример влияния параметров фильтра Габора на выделение паттернов с различной геометрией ВВ

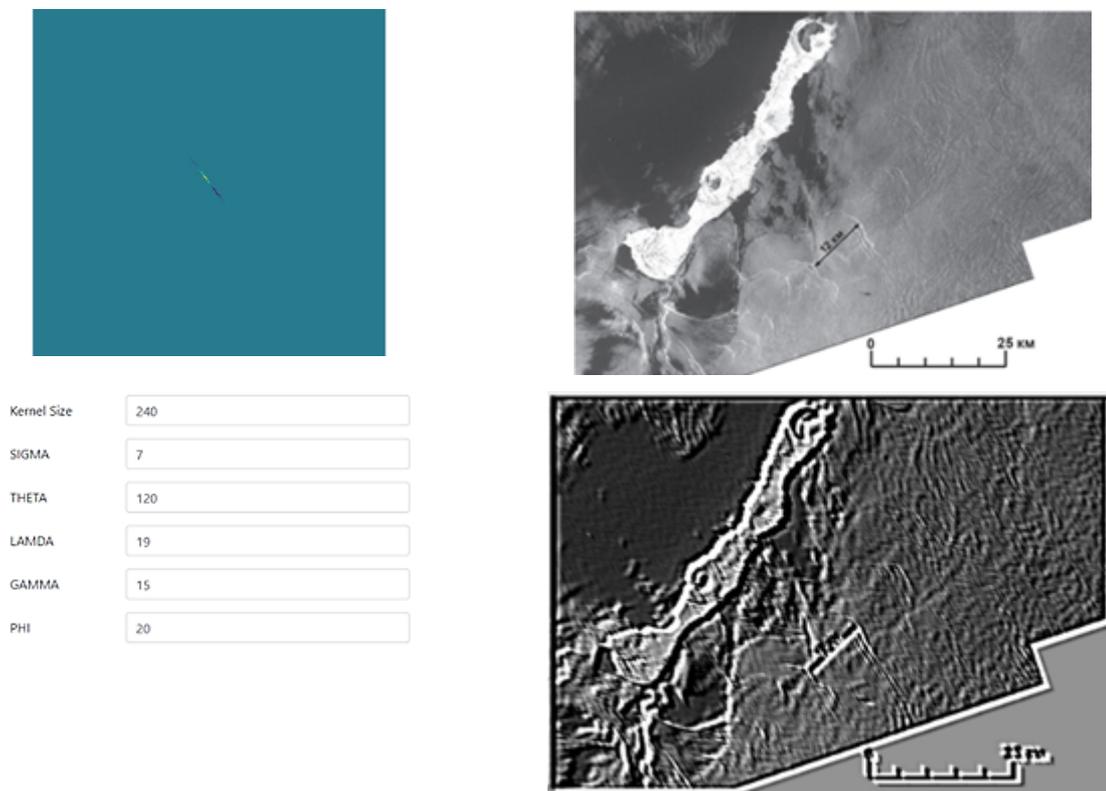


Рис. 6. Третий пример влияния параметров фильтра Габора на выделение паттернов с различной геометрией ВВ

Заключение

Выявленные с помощью обработки фильтром Габора особенности поля поверхностных проявлений гравитационных внутренних волн дают основания для более углублённого изучения волновых и вихревых процессов. Информация, которую можно извлекать с помощью количественной оценки поверхностных проявлений ВВ, позволит определять места их генерации и направление смещения, восстанавливать различные параметры солитонов и волновых пакетов, профили плотности и термическую структуру вод.

Выполненный анализ снимков, обработанных с использованием фильтров Габора, продемонстрировал его возможности в задачах распознавания проявлений внутренних волн на морской поверхности и перспективность его применение в процессе исследования ВВ по РЛ изображениям акваторий.

Литература

1. Дубина В.А., Бусыгина А.Д., Азмухаметова Л.М. Особенности поля гравитационных внутренних волн в Центральном-Курильском районе // Научно-практические вопросы регулирования рыболовства: Материалы Национальной научно-технической конференции, Владивосток, 27–28 октября 2022 года. Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет. 2022. С. 77–82.
2. Guo C., Vlasenko V., Stashchuk N. et al. Evidence of short internal waves trailing strong internal solitary waves in the northern South China Sea from synthetic aperture radar observations // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 124. Pp. 542–550. DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.001.
3. Свергун Е.И., Зимин А.В. Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе - сентябре 2018 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 3(213). С. 300–312. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-3-300-312.
4. Зубкова Е.В., Козлов И.Е. Характеристики поля короткопериодных внутренних волн в Чукотском море по данным спутниковых РСА-наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 4. С. 221–230. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-221-230.
5. Навроцкий В.В., Ляпидевский В.Ю., Павлова Е.П., Храпченков Ф.Ф. Внутренние волны и перемешивание в шельфовой зоне моря // *Известия ТИНРО*. 2010. Т. 162. С. 324–337.
6. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-309-315.
7. Armi L., Fekri-Ershad S. Texture image analysis and texture classification methods // *J. International Online Journal of Image Processing and Pattern Recognition*. 2019. Vol. 2, No.1. Pp. 1–29.
8. Munawar H. S., et al. A gabor filter-based protocol for automated image-based building detection. // *J. Buildings*, 2021. Vol 11, No 7. Pp. 1–15. doi.org/10.3390/buildings11070302.
9. Opoku Oppon S. et al. Medicinal Plant Identification using Gabor Filters and Deep Learning Techniques: A Paper Review / *Journal of Computer Science*. 2021. Vol 17, No 12. Pp. 1210-1221.
10. Fedoseeva N.V., Simakina T.E. The Gabor filter application in satellite analysis of “invisible” orographic waves // *Conf. Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. Modern Problems of Atmospheric Physics, Climatology and Environmental Monitoring. J. "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences"*. 2022. Pp. 149–156.
11. Лазько Ф.Ф. Применение фильтров Габора для сегментации изображений с помощью методов машинного обучения // *Наука сегодня: вызовы и перспективы: Материалы международной научно-практической конференции, Вологда, 23 сентября 2020 года*. Вологда: Маркер, 2020. С. 57–62.
12. Назаров Р.А., Войнаровский А.Е. Применение фильтра Габора и методов фотограмметрии для картографирования трещин // *Современные исследования в науках о Земле: ретроспектива, актуальные тренды и перспективы внедрения: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Астрахань, 27–28 мая 2022 года / Сост. Е.А. Колчин. Астрахань: ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет». 2022. С. 41–48.*
13. Магазов С.С. Восстановление изображения на дефектных пикселях КМОП и ПЗС матриц // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2019. № 3. С. 25–40. DOI: 10.14357/20718632190303.
14. Shang R. et al. A Fast Algorithm for SAR Image Segmentation Based on Key Pixels // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. Vol. 10, Iss. 12. Pp. 1–17. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2743338

Поступила 2 августа 2024 г.

English

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE INTERNAL WAVES ON THE SEA SURFACE IN SATELLITE RADAR IMAGES AND GABOR FILTER PARAMETERS

Natalya Vladimirovna Fedoseeva — PhD., associate professor, Russian State Hydrometeorological university (RSHMU).

E-mail: fednat@mail.ru

Tatyana Evgenievna Simakina — PhD., associate professor, Russian State Hydrometeorological university (RSHMU).

E-mail: tatiana.simakina@gmail.com

Valeria Alexandrovna Shcherbakova — student, Russian State Hydrometeorological university (RSHMU).

E-mail: sherbakova72@mail.ru

Address: 192007, Russian Federation, Saint-Petersburg, Voronezhskaya st., 79.

Abstract: Radar satellite images are a valuable source of information about the thermal structure of waters and the dynamics of oceanic and atmospheric processes such as internal waves (IW) particularly in areas used for fishing. Internal wave generation is due to stream-velocity horizontal gradients, which modulate the sea surface roughness and result in the redistribution of suspended sediment, plankton and surfactant (surface-active agent) films and that is reflected in radar images as quasi-periodic linear structures with brightness below or above the background. The transition areas between the deep-water ocean areas and continental shelf, where the interaction of the tide and underwater appendages take place, are distinct in increased intensity of internal waves. Varying wind speed in atmospheric cyclonic motions and radar parameters add to complexity and spatial inhomogeneity of IW field in radar images. Digital processing of radar images of the sea surface was done using Gabor filter in the process. There was analyzed relationship between the filter parameters and IW surface development properties such as wave-train dimension and waves' number in it, crest width and the interval between crests, crest length of the guiding wave, minimum and maximum wavelength in the train-wave, phase velocity. The paper provides examples of the impact of Gabor filter parameters on the outlining patterns with different IW geometry. Each example contains filter parameters' values, the filter geometric image, the initial snapshot and visualization result of its processing. Using Gabor filter for processing radar wave images enables to detect internal waves of various geometry and origin, to identify the areas of their generation, as well as to reconstruct the incoming wind velocity. Thus, that makes this method high-potential in IW research.

Keywords: Internal sea waves, SAR, radar images, Sentinel-1, Gabor filter parameters.

References

1. *Dubina V.A., Busygina A.D., Azmukhametova L.M.* Features of the field of gravity internal waves in the central Kuril region. Conf. Scientific and practical issues of fisheries regulation. Far Eastern State Technical Fisheries University, Russia, Vladivostok. 2022. Pp. 77–82.
2. *Guo C., Vlasenko V., Stashchuk N.* [et al.] Evidence of short internal waves trailing strong internal solitary waves in the northern South China Sea from synthetic aperture radar observations. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 124. Pp. 542–550. DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.001
3. *Svergun E.I., Zimin A.V.* Characteristics of short-period internal waves in the Avacha bay based on the in situ and satellite observations in august-september, 2018. *Physical Oceanography*. 2020. Vol. 27, No. 3. Pp. 278–289. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-3-300-312
4. *Zubkova E.V., Kozlov I.E.* Characteristics of short-period internal waves in the Chukchi sea based on spaceborne SAR observations. *Cosmic Research*. 2020. Vol. 17, No 4. Pp. 221–230. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-221-230
5. *Navrotsky V.V., Lyapidevsky V.Yu., Pavlova E.P., Khrapchenkov F.F.* Internal waves and mixing in the shelf zone. *Russian Journal of Marine Biology*. 2010. Vol. 162. Pp. 324–337.
6. *Lavrova O.Yu.* Internal waves observed in satellite images of the northeastern Black sea in July 2017. *Cosmic Research*. 2018. Vol. 15, No. 1. Pp. 309–315. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-309-315
7. *Armi L., Fekri-Ershad S.* Texture image analysis and texture classification methods. *J. International Online*

Journal of Image Processing and Pattern Recognition. 2019. Vol. 2, No.1. Pp. 1–29.

8. *Munawar H.S.*, et al. A gabor filter-based protocol for automated image-based building detection. *J. Buildings*. 2021. Vol. 11, No 7. Pp. 1–15. DOI: 10.3390/buildings11070302

9. *Opoku Oppon S.* et al. Medicinal Plant Identification using Gabor Filters and Deep Learning Techniques: A Paper Review. *Journal of Computer Science*. 2021. Vol. 17, No 12. Pp. 1210–1221.

10. *Fedoseeva N.V.*, *Simakina T.E.* The Gabor filter application in satellite analysis of “invisible” orographic waves. *Conf. Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. Modern Problems of Atmospheric Physics, Climatology and Environmental Monitoring. J. "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences"*. 2022. Pp. 149–156.

11. *Laz'koo F.F.* Application of Gabor filters for image segmentation using machine learning techniques. *Conf. Science today: challenges and prospects. Vologda: Marker, 2020. Pp. 57–62.*

12. *Nazarov R.A.*, *Wojnarowski A.E.* Application of the Gabor filter and photogrammetry techniques for crack mapping. *Conf. Resent Research in Earth Sciences: Retrospective, Current Trends and Implementation Prospects – Astrakhan: Astrakhan State University. 2022. Pp. 41–48.*

13. *Magazov S.S.* Image restoration on defective pixels of CMOS and CCD matrices. *Information technology and computer systems*. 2019. No. 3. Pp. 25-40. DOI: 10.14357/20718632190303

14. *Shang R.* et al. A Fast Algorithm for SAR Image Segmentation Based on Key Pixels. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. Vol. 10, Iss. 12. Pp. 1–17. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2743338