

УДК 528.854.4

СПУТНИКОВОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ КАМЧАТКИ И ОКРУЖАЮЩИХ МОРЕЙ

© 2015 Л.М. Митник, М.Л. Митник

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, 690041;
e-mail: mitnik@poi.dvo.ru*

Получение количественной информации о поверхности и атмосфере независимо от облачности и времени суток в сочетании с улучшением характеристик аппаратуры предопределяют высокий приоритет использования спутниковых радиолокационных и микроволновых (МВ) радиометрических методов при изучении Камчатки и окружающих акваторий. Ключевое значение при этом имеют сведения об опасных явлениях в атмосфере, зонах с высокими скоростями ветра, о ледяном покрове, а также о динамических явлениях в океане - течениях, фронтах, вихревых образованиях. В работе рассмотрены результаты количественной обработки и интерпретации измерений, выполненных МВ радиометром AMSR2 со спутника GCOM-W1 и спутниковыми скаттерометрами, а также изображений, полученных радиолокационной станцией с синтезированной апертурой ASAR со спутника Envisat. Подчеркнут высокий потенциал данных, получаемых со спутников нового поколения: Suomi NPP, Global Precipitation Measurement, Sentinel-1A. Они могут быть использованы в научных исследованиях и в оперативной работе.

Ключевые слова: микроволновое зондирование, AMSR2, внетропические циклоны, ASAR, морской лед.

ВВЕДЕНИЕ

Для Камчатки характерны значительные термобарические контрасты и активная циклоническая деятельность на протяжении всего года. Наибольшая повторяемость циклонов отмечается в южных районах полуострова: за год в среднем около 70 циклонов оказывает на них влияние. Наиболее опасными и часто повторяющимися гидрометеорологическими явлениями, связанными с циклонами, являются штормовые ветры, сильные дожди и снегопады, сильное волнение и туманы. По данным Камчатгидромета с 2000 по 2009 гг. число неблагоприятных и опасных природных явлений на полуострове увеличилось с 429 до 553 случаев в год.

Высокая вероятность облачности, связанная с активной циклонической активностью, предопределяет приоритетное использование микроволнового (МВ) диапазона для дистанционного зондирования территории Камчатки и прилегающей к ней акваторий.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И АЛГОРИТМЫ

Опасные и особо опасные атмосферные явления, к которым относятся внетропические и полярные циклоны и холодные вторжения, сопровождающиеся штормовым ветром и осадками, изучались по МВ радиометрическим данным со спутников Aqua (2002-2011 гг.), Global Change Observing Mission - Water 1st - (GCOM-W1 (2012 - по настоящее время), Global Precipitation Measurement (GPM) и Meteor-M № 2 (2014 - по настоящее время) и показаниям скаттерометров на спутниках QuikSCAT, MetOp и OceanSAT-2 (поля ветра приведены на сайте <http://manati.star.nesdis.noaa.gov/>). Ежедневные сведения о перемещении активных атмосферных систем необходимы при проведении геолого-геофизических работ при изучении Камчатки, исследований подводного вулканизма и тектонической активности, морского льда для заблаговременного предупреждения о развитии опасных ситуаций.

При изучении полей волнения и ветра ключевое значение имеет временное разрешение — время между последовательными измерениями

из космоса поверхности океана. По данным (Гурвич, 2013; Рудева, 2008; Rasmussen, Turner, 2003) временное разрешение особенно важно при изучении интенсивных быстро перемещающихся погодных систем, таких как внетропические и полярные циклоны. Запуск в Японии в мае 2012 г. спутника Global Change Observation Mission – Water 1st (GCOM-W1) с усовершенствованным микроволновым сканирующим радиометром Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) на борту существенно расширил возможности изучения полей океана и атмосферы. Характеристики AMSR2 такие же, как и у AMSR-E на спутнике Aqua, но размер антенны увеличен до 2 м, а для снижения влияния радиочастотных помех добавлены два канала на $\nu = 7.3$ ГГц (Imaoka et al., 2010). В 2002-2011 гг. AMSR-E измерял яркостные температуры $T_{я}^{в,г}(\nu)$ на вертикальной (в) и горизонтальной (г) поляризациях на 6 частотах в диапазоне 6.9-89.0 ГГц. По $T_{я}^{в,г}(\nu)$ определялось полное содержание водяного пара в атмосфере V и капельной воды в облаках Q , скорость приводного ветра W и температура поверхности океана t_o . Восстановление W выполнялось по $T_{я}$ на частотах 6.9 и 10.7 ГГц (Mitnik, Mitnik, 2003; Shibata, 2006). Влияние атмосферы корректировалось по $T_{я}(\nu)$ на $\nu = 18.7, 23.6$ и 36.5 ГГц, причем пиксели с мощной облачностью и осадками отфильтровывались, если разность $T_{я}(\nu)$ на $\nu = 36.5$ ГГц $\Delta T_{я}(36) = T_{я}^в(36) - T_{я}^г(36)$ была меньше 40 К.

В усовершенствованном алгоритме, который применяется при обработке данных AMSR2, фильтрация пикселей с мощной облачностью и осадками выполняется по пороговому значению нового параметра - полного поглощения в атмосфере на частоте 10.7 ГГц $\tau(11)$. По данным (Митник, Митник, 2011; Mitnik, Mitnik, 2010) в алгоритме по значениям $\tau(11)$ рассчитывается вклад излучения атмосферы в яркостную температуру $T_{я}^г(11)$, регистрируемую на спутнике, и выделяется составляющая $\Delta T_{я}(36)$, обусловленная поглощением в атмосфере, а не вариациями ветра. По данным (Zabolotskikh et al., 2013, 2014) разбиение $\Delta T_{я}(36)$ на атмосферную и океаническую составляющие позволяет при поглощении $\tau(11) \leq 0.1$ оценивать W , Q и V и в штормовых условиях.

Динамические явления в океане (вихревые образования, внутренние волны и морской лёд) и мезомасштабная изменчивость приводного ветра исследовались по изображениям, полученным усовершенствованным радаром с синтезированной апертурой ASAR (PCA) со спутника Европейского космического агентства Envisat (2002-2012). По данным (Ji et al., 2013; Lundgren, Lu, 2006) изображения спутниковых PCA нашли применение и при изучении вулканических зон.

Опасные морские погодные системы. Внетропический циклон Сильный ветер, сопровождающий прохождение глубоких циклонов над океаном, представляет серьезную угрозу для судов, прибрежного строительства и добычи нефти на шельфе. Рассмотрим циклон у Камчатки 24 декабря 2012 г., используя данные спутникового МВ зондирования. По данным Японского метеорологического агентства (ЯМА), в 00 Гр. 24 декабря центр циклона находился у юго-восточного побережья Камчатки в точке 53° с.ш., 160° в.д. (рис. 1). Минимальное давление в его центре $P_{ц} = 960$ мб, а максимальная скорость ветра $W_{\text{макс}}$ варьировала от 20 до 30 м/с. Размер циклона по последней замкнутой изобаре в направлении с северо-запада на юго-восток превышал 3000 км, а с юго-запада на северо-восток составлял ≈ 2000 км. В поле облачности выделяется фронт окклюзии, имеющий форму спирали с фокусом в центре циклонической циркуляции (рис. 1а). В холодной воздушной массе видны мезомасштабные конвективные гряды и открытые ячейки. Значения V и Q рассчитывались по данным AMSR2 по алгоритмам (Митник, Митник, 2011; Mitnik, Mitnik, 2003, 2010; Mitnik et al., 2009; Zabolotskikh et al., 2013, 2014). Значения V в циклоне составляли 8-16 кг/м² на фоне $V \leq 4$ кг/м² в окружающей циклон области. Водозапас облаков в конвективных ячейках за холодным фронтом не превышал 0.2 кг/м². На северо-западном участке облачной спирали в центральной части циклона, где облачность более плотная, значения Q возрастают до 0.3-0.35 кг/м². Камчатские метеостанции отмечали 24 декабря слабый и умеренный снег. Жидких осадков не наблюдалось.

При $V \leq 20-25$ кг/м² и $Q \leq 0.3-0.5$ кг/м² погрешность восстановления скорости ветра уменьшается. На рис. 2 показана последовательность полей ветра, найденных по данным скаттерометров OSCAT и ASCAT и МВ радиометра AMSR2. Измерения OSCAT были выполнены на ≈ 1.2 ч раньше AMSR2, а измерения ASCAT - на ≈ 7 ч позже. За промежуток времени 00-12 Гр. циклон был малоподвижным и заполнился на 14 мб.

Несмотря на начавшееся заполнение циклона, поля ветра W , найденные по измерениям скаттерометров и радиометра AMSR2, хорошо согласуются. В области, окружающей центр циклона, ветер сильный $W \geq 15$ м/с. Внешние границы этой области очерчиваются последней замкнутой изобарой на карте приземного анализа (рис. 1б). В штормовом кольце вокруг центра шириной от 100 до 400 км значения $W = 25-30$ м/с (рис. 2б). У юго-восточного побережья Камчатки выделяется зона с $W \geq 30$ м/с (рис. 2а-в), что, вероятнее

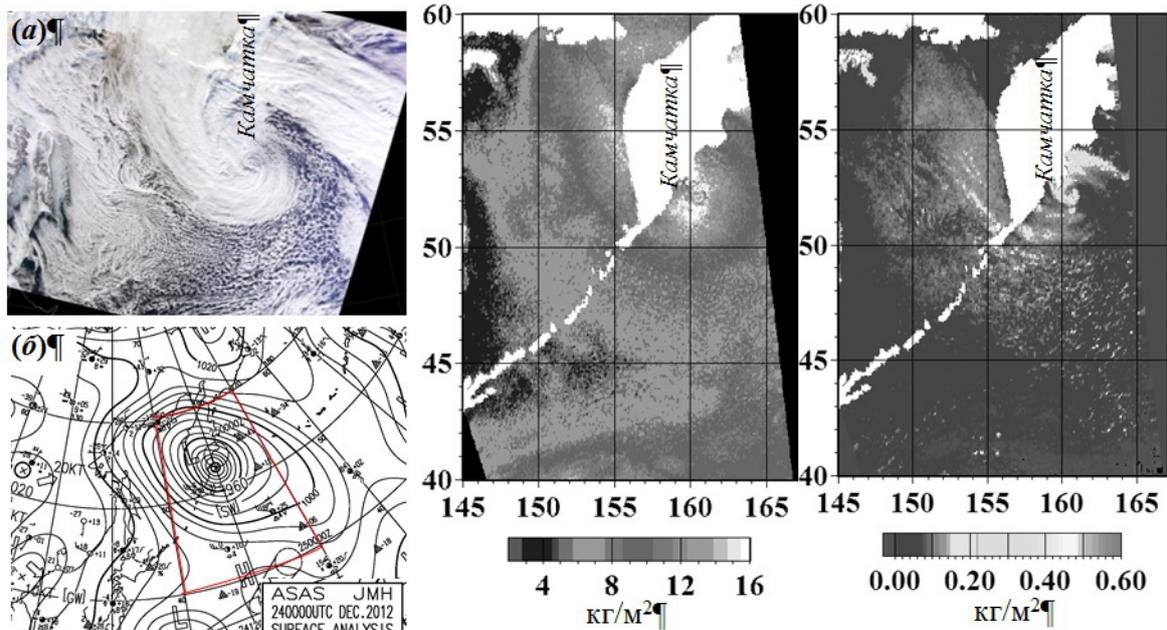


Рис. 1 Циклон 24 декабря 2012 г.: (а) видимое изображение спектро радиометра MODIS (спутник Terra) за 00:55 Гр.; (б) карта приземного анализа ЯМА за 00 Гр.; поля паросодержания атмосферы (в) и водозапаса облаков (г) по данным радиометра AMSR2 (спутник GCOM-W1) за 02:39 Гр. Красный контур на (б) – границы изображения AMSR2.

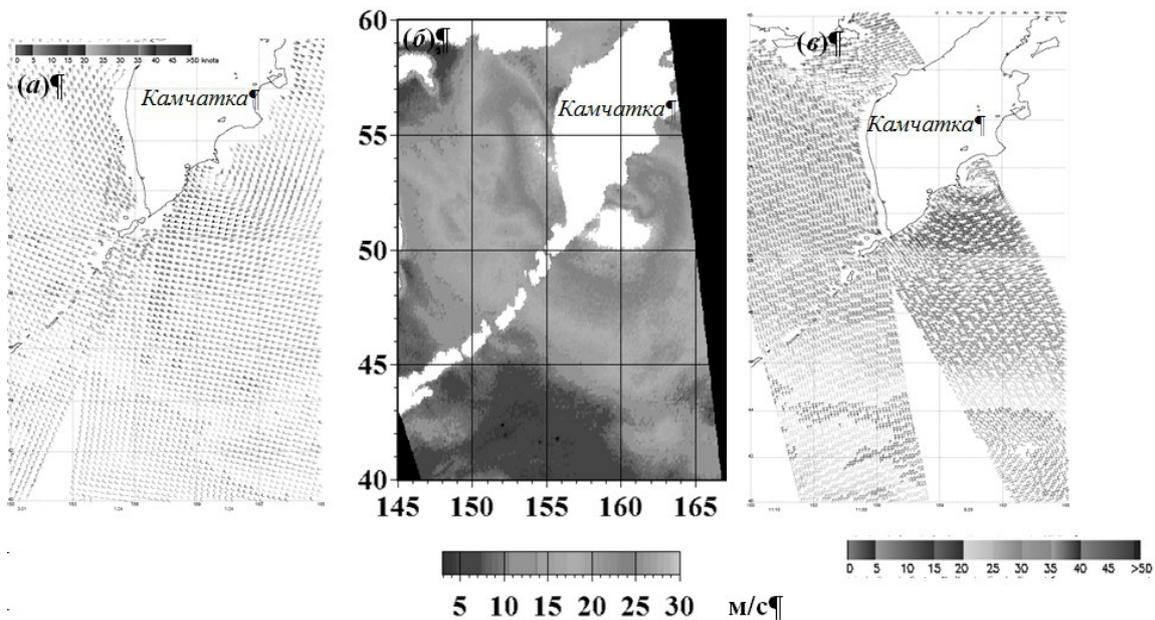


Рис. 2. Поля приводного ветра в циклоне у побережья Камчатки 24 декабря 2012 г. по данным: скаттерометров OSCAT (спутник Oceansat-2) (а) за 01:24 Гр. и (в) ASCAT (спутник MetOp) за 09:29 Гр. и (б) радиометра AMSR2 (спутник GCOM-W1) за 02:39 Гр. Шкала скорости ветра на (а) и (в) – в узлах.

всего, обусловлено орографическими особенностями. Область сильных ветров ($W \geq 15$ м/с) обрамляет узкая (≈ 50 – 80 км) полоса, где $W \approx 10$ – 12 м/с, а горизонтальные градиенты достигают ≈ 7 (м/с)/100 км при переходе к окружающей циклон внешней области, где $W \approx 5$ м/с.

По данным (Гурвич, 2013; Митник и др., 2007, 2013; Mitnik, 2009; Mitnik et al., 2007), анализ интенсивных синоптических и мезомасштабных циклонов над Охотским и Беринговым морями и северной части Тихого океана показал вы-

сокую эффективность использования данных пассивного и активного МВ зондирования для их количественной оценки.

Морские погодные явления и льды на изображениях РСА. Градиенты скорости ветра в области атмосферных фронтов глубоких циклонов не превышают 5–10 (м/с)/100 (рис. 2) по данным скаттерометров и радиометров, разрешение которых > 10 км. Значительно более высокие градиенты следуют из анализа изображений РСА со спутника Envisat, пространственное

разрешение которых в режиме широкой (400 км) полосы обзора 75×75 м. 16 февраля 2009 г. граница **1** между областями с сильным **2** и слабым **3** ветром проходит через южную оконечность м. Лопатка **4** и между о-вами Шумшу **5**, Парамушир **6** и Атласова **7** (рис. 3а), а 17 февраля охватывает с севера Командорские о-ва **8** (рис. 3б). На рис. 3а холодную и теплую воздушные массы разделяет неровная узкая зона **1** шириной ≈2 км, обрамленная более темной (ослабление ветра) полосой с примыкающими к ней светлыми пятнами (усиление ветра). Характерной особенностью зоны **1** на рис. 3б являются яркие по тону волнообразные возмущения шириной до 3–4 км – линии шквала. В Гижигинской губе **9** (рис. 3а) и в заливе Шелихова **9** (рис. 3б) видны чередующиеся светлые и темные полосы, которые по данным (Митник и др., 2007; Радиолокация..., 1990) являются отпечатками мезомасштабных вариаций ветра при валиковой конвекции в пограничном слое атмосферы. Взаимодействие ветра с гористым

рельефом приводит к образованию атмосферных внутренних волн и вихревых цепочек, отпечатки которых в поле приводного ветра часто наблюдаются на РЛ изображениях (Митник, Викторов, 1990; Митник и др., 2007; Mitnik, Hsu, 1998).

На изображениях РСА на фоне взволнованной морской поверхности по отрицательному РЛ контрасту уверенно выделяется морской лед (рис. 3). Сплошной лед покрывает западную часть залива Шелихова **10**, распространяется полосой вдоль п-ва Кони **11** на запад и на юг вдоль западного побережья Камчатки. Отчетливо прорисовывается структура прикромочной ледовой зоны: вытянутые по ветру полосы льда, ледяные поля различных размеров. Сплошной лед покрывает Пенжинскую губу **12** (рис. 3б). Под действием штормового ветра лед отошел от побережья Гижигинской губы **9**. На фоне открытой воды видны дрейфующие в юго-западном направлении ледяные поля. Лед сформировался и у восточного побережья Камчатки (рис. 3а).

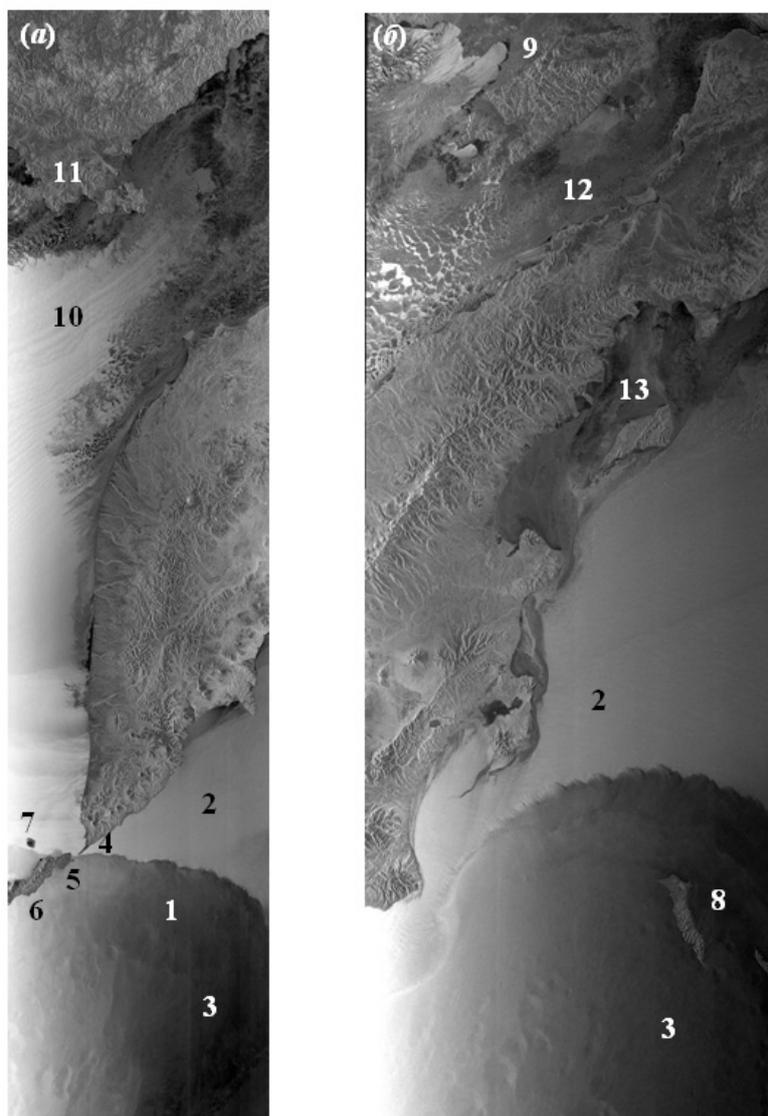


Рис. 3. Камчатка и окружающие акватории на изображениях РСА со спутника Envisat, полученные (а) 16 февраля в 11:08 Гр. и (б) 17 февраля в 10:38 Гр. 2009. ч.

Подо льдом Карагинский зал. 13. Далее на юг полоса льда, примыкающая к берегу, сужается. К югу от п-ва Камчатский по темному тону выделяются две полосы ледяного сала, которое гасит мезомасштабное волнение.

По данным (Дешифрирование..., 1991; Радиолокация..., 1990; Митник и др., 2007; Microwave..., 1990; Mitnik, Kalmykov, 1992; Onstott, Shuchman, 2004), РЛ характеристики льда очень изменчивы и зависят от типа, условий формирования и эволюции льда, заснеженности, температуры воздуха и пр., что иллюстрируют изображения Камчатки и окружающих морей (рис. 4). Различные участки ледяного покрова выглядят как светлее, так и темнее морской поверхности, яркость которой определяется скоростью и направлением ветра. Темная зона у юго-западного побережья Темная область у юго-западного побережья Камчатки отмечает положение центральной области циклона, где скорость ветра мала. К северу скорость ветра растет, и в поле яркости РСА появляются слабоконтрастные полосы. Модуляция яркости обусловлена валиковой конвекцией, индикато-

ром которой на спутниковых видимых и ИК-изображениях (не показаны) служат облачные улицы. Высокий уровень яркости большей части льда вдоль побережья обусловлен рассеянием от шероховатой поверхности блинчатого льда. Низкая яркость льда в верхней части изображения связана, скорее всего, с наличием ледяного сала — начальной стадии образования льда (рис. 4а). Темные полосы и пятна ледяного сала примыкают к сплошному ледяному покрову в Пенжинской губе у северо-западного побережья Камчатки (рис. 4б). Спиральные полосы и вихри небольшого размера, различимые в прикромочной ледовой зоне, являются индикаторами сложной поверхностной циркуляции.

Вихревые образования, возникающие при взаимодействиях ветра с береговым рельефом и морских течений с топографией дна, регулярно наблюдаются на изображениях РСА восточного побережья Камчатки. При $W < 5-6$ м/с они визуализируются в виде узких темных полос, создаваемых мономолекулярными биогенными пленками (сликами), которые, как и ледяное

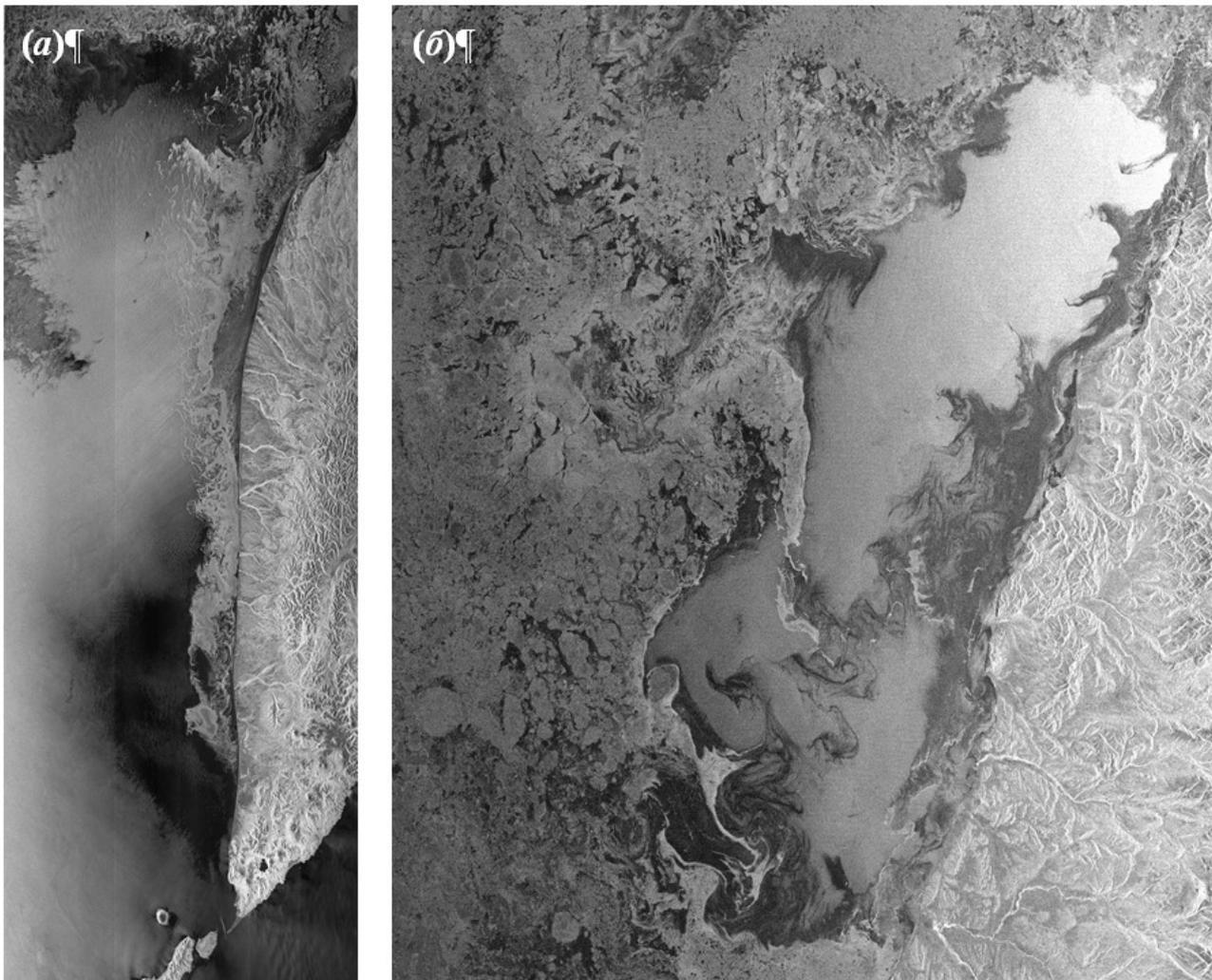


Рис. 4. Изображения Камчатки и окружающих акваторий, полученные РСА со спутника Envisat (а) в 11:18 Гр. 10 марта и (б) в 23:55 Гр. 28 марта 2009 г.

сало, гасят мелкомасштабное волнение. При $W > 5$ м/с вихри и другие динамические явления (течения, фронты, внутренние волны) также обнаруживаются, если переменные течения, сопровождающие эти явления, вызывают заметные изменения шероховатости морской поверхности в результате взаимодействия с ветровыми волнами.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

По данным (Гурвич, 2013; Митник и др., 2013; Gurvich et al., 2012; Mitnik et al., 2007; Mitnik, 2009; Onstott, Schuchman, 2004), результаты дистанционного зондирования в видимом, инфракрасном и МВ диапазонах являются востребованным источником количественной информации при изучении, анализе эволюции и структуры и мониторинге интенсивных внетропических и полярных циклонов. Ключевое значение при этом имеют микроволновые радиометрические и радиолокационные измерения с новых спутников: Suomi NPP, GCOM-W1, DMSP-F19, GPM, Метеор-М № 2 и Sentinel-1A, обеспечивающие восстановление параметров атмосферы и

океана независимо от облачности и времени суток. Измерения с нескольких спутников и широкая полоса обзора улучшают временное разрешение данных. Пространственное разрешение МВ радиометров меняется от 3-5 до 30-60 км. В то же время важные для многих приложений особенности распределения приводного ветра, ледяного покрова и рельефа суши размером от десятков метров до 1 км проявляются на изображениях РСА.

Представляется весьма актуальной разработка методик и руководств по обработке и использованию измерений с нового поколения спутников для решения актуальных задач, связанных не только с обеспечением безопасного проведения экспедиционных работ на Камчатке, но и с изучением вулканической активности и деформации поверхности.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 13-05-12093 и ДВО РАН 15-1-1-009 о. Авторы благодарят JAXA за предоставление данных радиометра AMSR2 со спутника GCOM-W1 и ESA за предоставление изображений PCA ASAR со спутника Envisat, а также А.В. Баранюк за помощь в подготовке рисунков.

Список литературы

Гурвич И.А. Интенсивные мезомасштабные циклоны над дальневосточными морями в холодное полугодие по данным спутникового зондирования. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Владивосток, 2013. 23 с.
Дешифрирование морского льда дальневосточ-

ных морей по данным радиолокационного зондирования. Методическое пособие / Митник Л.М., Десятова Г.И., Ковбасюк В.В. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 56 с.

Митник Л.М., Митник М.Л. Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исследование Земли из космоса. 2011. № 6. С. 34-44.

Митник Л.М., Митник М.Л., Гурвич И.А. и др. Мультисенсорное спутниковое зондирование зимних циклонов со штормовыми и ураганскими ветрами в северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 161-174.

Митник Л.М., Митник М.Л., Дубина В.А. Дистанционное радиофизическое зондирование системы океан-атмосфера // Дальневосточные моря России. В 4 кн. Гл. ред. В.А. Акуличев. Кн. 4. Физические методы исследования. М.: Наука, 2007. С. 449-537.

Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Митника Л.М., Викторова С.В. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 200 с.

Рудева И.А. О связи количества внетропических циклонов с их размерами // Известия РАН. ФАО. 2008. Т. 44. № 3. С.1-7.

Gurvich I.A., Mitnik L.M., Mitnik M.L., Pichugin M.K. Multisensor satellite study of mesoscale cyclones over the Northern Pacific // Proc. 92nd AMS Annual Meeting, 18th Conf. Satellite Meteorology. New Orleans, LA, 22-26 Jan, 2012. <https://ams.confex.com/ams/92Annual/webprogram/Paper195196.html>

Itaoka K., Kachi M., Fujii H. et al. Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change // Proc. IEEE. 2010. V. 98. № 5. P. 717-734.

Ji L., Lu Z., Dzurisin D., Senyukov S. Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 256. P. 87-95.

Lundgren P., Lu Z. Inflation of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // Geophys. Research Letters. 2006. V. 33. № 6. L06301, doi:10.1029/2005GL025181.

Microwave Remote Sensing of Sea Ice / Carsey F.D. (Editor). 1992. Geophysical monograph 68. 462 p.

Mitnik L.M. Mesoscale atmospheric vortices in the Okhotsk and Bering Seas: Results of satellite multisensor study. In: Influence of Climate Change on the Changing Arctic and Sub-Arctic Conditions / J.C.J. Nihoul, A.G. Kostianoy (editors), Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2009. P. 37-56.

- Mitnik L.M., Dubina V.A.* Satellite SAR sensing of the Okhotsk Sea: geographical and seasonal features // Proc. Living Planet Symposium, Bergen, Norway, 28 June- 2 July 2010. ESA Publication SP-686. 6 p.
- Mitnik L., Hsu M.-K.* Atmospheric and oceanic vortex streets: Observations by satellite radars // J. Adv. Marine Science Technology Society. 1998. V. 4. № 2. P. 241-248.
- Mitnik L.M., Kalmykov A.I.* Structure and dynamics of the Sea of Okhotsk marginal ice zone from «Ocean» satellite radar sensing data // Journal of Geophysical Research. 1992. V. 97. № C5. P. 7429-7445.
- Mitnik M.L., Mitnik M.L.* Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II AMSR data: comparison of errors of global and regional algorithms // Radio Science. 2003. V. 38. № 4, doi: 10.1029/2002RS002659.
- Mitnik M.L., Mitnik M.L.* AMSR-E advanced wind speed retrieval algorithm and its application to marine weather systems // Proc. IGARSS 2010. 2010 Hawaii, USA. P. 3224-3227.
- Mitnik M., Mitnik L., Gurvich I.* Using Envisat ASAR for the study of winter mesoscale cyclones in the Asian Marginal Seas // ENVISAT Symp. 2007. Montreux, Switzerland. ESA Publication SP-636.
- Mitnik L.M., Mitnik M.L., Zabolotskikh E.V.* Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E // J. Remote Sensing Society of Japan. 2009. V. 29. № 1. P. 156-165.
- Onstott R.G., Shuchman R.A.* SAR measurements of ice / Synthetic Aperture Radar Marine Users Manual / Eds. C.R. Jackson, J.R. Apel. 2004. Chapter 3. P. 81-116.
- Rasmussen E., Turner J. (Eds).* Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions, Cambridge University Press, 2003. 612 p.
- Shibata A.A.* Wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: Wind speed inside hurricanes // J. Oceanography. 2006. V. 62. № 3. P. 351-359.
- Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B.* New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // Geophys. Res. Letters. 2013. V. 40. Is. 13. P. 3347-3350.
- Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M., Chapron B.* GCOM-W1 AMSR2 and MetOp-AASCAT wind speeds for the extratropical cyclones over the North Atlantic // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 147. P. 89-98. doi:10.1016/j.rse.2014.02.016.

SATELLITE MICROWAVE SOUNDING OF KAMCHATKA AND THE SURROUNDING SEAS

L.M. Mitnik, M.L. Mitnik

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, 43 Baltiyskaya St., 690041 Vladivostok, Russia

Acquisition of quantitative data on the surface and atmosphere regardless the clouds and light conditions along with improved equipment characteristics shows the high priority of satellite radar-locating and microwave radiometric methods for investigation of Kamchatka and the adjacent waters. Data on hazardous phenomenon in the atmosphere, zones of strong winds, ice covers, and such oceanic phenomenon as currents, fronts, and vortex formations, are crucial for investigations. The paper describes the results from quantitative processing and interpretation of estimations obtained using microwave radiometre AMSR2 from GCOM-W1 as well as satellite scatterometers with synthetic aperture ASAR from Emvisat. The paper emphasizes high importance of data from next-generation satellites Suomi NPP, Global Precipitation Measurement, Sentinel-1A. This data may be used for both scientific investigation and fieldworks.

Keywords: microwave sounding, AMSR2, extratropical cyclone, ASAR, sea ice.