

Статистические характеристики, структура и параметры мезомасштабных циклонов над Охотским морем по данным спутникового микроволнового и оптического зондирования

И.А. Гурвич, М.Л. Митник, Л.М. Митник

*Тихоокеанский океанологический институт им В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43
E-mail: gurvich@poi.dvo.ru*

Впервые проведены статистические исследования мезомасштабного циклогенеза над Охотским морем на основе спутниковых видимых и инфракрасных (ИК) изображений облачности. Проведен комплексный анализ эволюции одного мезоциклона. С видимыми и ИК-изображениями сопоставлены данные спутниковых микроволновых пассивных и активных измерений. По яркостным температурам, измеренным радиометром AMSR-E со спутника Aqua, восстановлены поля паросодержания атмосферы и водозапаса облаков в мезоциклоне и выявлены зоны возможного выпадения осадков. Сопоставлены поля приводного ветра, восстановленные по измерениям скаттерометра SeaWinds со спутника QuikSCAT, с изображениями РЛС с синтезированной апертурой (РСА) со спутника Envisat. Отмечено преимущество изображений РСА в определении положения центра и выявлении мелких деталей структуры фронтальных зон и поля приводного ветра мезоциклона. Выявлена корреляция структурных деталей мезоциклона по данным многосенсорного зондирования с различных спутников.

Ключевые слова: мезомасштабные циклоны, Охотское море, микроволновое и оптическое дистанционное зондирование.

Введение

Мезомасштабные циклонические вихри обычно формируются в холодное время года над морями северных широт на расстоянии примерно 1000-2000 км от основного фронта в сторону полюса [1-3]. На Дальнем Востоке одним из районов активного, но мало исследованного мезомасштабного циклогенеза является Охотское море. Размеры мезоциклонов (МЦ) лежат в диапазоне от 100 до 1000 км, жизненный цикл – от нескольких часов до трех суток. Облачность чаще имеет форму запятой, хотя наблюдаются МЦ и спиральной формы, особенно в максимальной стадии развития. Наиболее интенсивные МЦ называют полярными циклонами [1]. Безоблачный глаз в центре, окруженный облачной стеной, и теплое ядро придают им сходство с тропическими циклонами. Внезапность зарождения МЦ, сопровождающие их осадки и штормовой ветер представляют серьезную угрозу как для судоходства и рыбного промысла (обледенение судов), так и для экономики прибрежной зоны.

Из-за редкой сети стандартных метеорологических наблюдений над морями, быстрого формирования и короткого жизненного цикла МЦ далеко не всегда фиксируются на приземных синоптических картах. Поэтому для их обнаружения и прогнозирования незаменимо спутниковое дистанционное зондирование системы океан-атмосфера. Качественную информацию о зарождении и эволюции МЦ дают изображения облачности в видимом и ИК-диапазонах. Количественная информация о параметрах атмосферы и океана в области МЦ может быть получена путем анализа спутниковых пассивных и активных микроволновых измерений.

Цели работы заключаются в:

- статистическом исследовании мезомасштабного циклогенеза над Охотским морем;
- исследовании структуры и параметров МЦ на основе анализа изображений, полученных усовершенствованной РЛС с синтезированной апертурой (РСА) со спутника Envisat, яркостных

температур $T_{я}$, измеренных усовершенствованным микроволновым сканирующим радиометром AMSR-E со спутника Aqua, и восстановленных по $T_{я}$ полей паросодержания атмосферы V и водозапаса облаков Q .

Данные и методика

Для выявления районов формирования и получения статистических оценок МЦ (размеры, среднее количество за месяц и др.), а также для исследования их эволюции и структуры использовались данные многосенсорного спутникового зондирования. Индикация МЦ осуществлялась по изображениям облачности в видимом и ИК-диапазонах, полученным спектрорадиометром MODIS со спутников Terra и Aqua и радиометром AVHRR со спутников серии NOAA. Полное содержание водяного пара в атмосфере V и капельной влаги в облаках Q восстанавливались по яркостным температурам $T_{я}$, измеренным радиометром AMSR-E со спутника Aqua [4-6]. Спутниковые оценки V сопоставлялись со значениями V по данным прибрежных станций радиозондирования атмосферы. По $T_{я}$ определялось также положение кромки льда. Оценка интенсивности МЦ производилась по полям приводного ветра, восстановленным по данным скаттерометра SeaWinds (спутник QuikSCAT). Тонкая структура поля приводного ветра в отдельных МЦ исследовалась по изображениям, полученным усовершенствованной PCA со спутника Envisat. В качестве вспомогательных материалов использовались синоптические карты Японского метеорологического агентства и Корейской метеорологической администрации, а также карты реанализа температуры подстилающей поверхности Национального центра прогнозирования окружающей среды/Национального центра изучения атмосферы NOAA (NCEP/NCAR)

Далее представлены статистические исследования мезомасштабного циклогенеза, впервые проведенные для Охотского моря.

Условия формирования и статистика

Мезомасштабный циклогенез над дальневосточными морями наиболее активен в холодный период, во время действия зимнего муссона. Увеличение температурных контрастов между материком и океаном, формирование мощного антициклона над азиатским континентом и углубление алеутской депрессии способствует формированию муссонного режима циркуляции, который проявляется в преобладании северо-западных ветров над дальневосточными морями [7]. В тылу глубоких циклонов, развивающихся на полярном фронте, происходит вторжение очень холодной сухой континентальной воздушной массы, соприкосновение которой с относительно теплой морской подстилающей поверхностью резко обостряет взаимодействие атмосферы и океана. Это приводит к интенсивной конвективной деятельности, в результате чего формируются мезомасштабные конвективные гряды и ячейки, а при благоприятных условиях – и мезомасштабные циклоны.

МЦ над дальневосточными морями формируются при тех же синоптических ситуациях, что и в других регионах с выраженным мезомасштабным циклогенезом. Условия их формирования подробно описаны в работе [8]. Мезомасштабный циклогенез в каждый конкретный период зависит от развития синоптических процессов и степени ледовитости Охотского моря. МЦ наблюдаются почти над всей свободной ото льда акваторией моря (хотя наблюдались отдельные случаи формирования очень сухих МЦ и надо льдом). Поэтому можно предположить, что количество зарождающихся в холодный сезон МЦ возрастает с уменьшением площади ледяного покрова. При отсутствии льда МЦ формируются вблизи от побережья, где температурные контрасты в холодный сезон наиболее велики. По мере распространения ледяного покрова районы их формирования отодвигаются от берега вместе с кромкой льда. В свою очередь, МЦ формируются в основном в тылу глубоких циклонов синоптического масштаба, и поэтому их количество в рассматриваемый сезон зависит от характера развития синоптических процессов, что определяет их траектории.

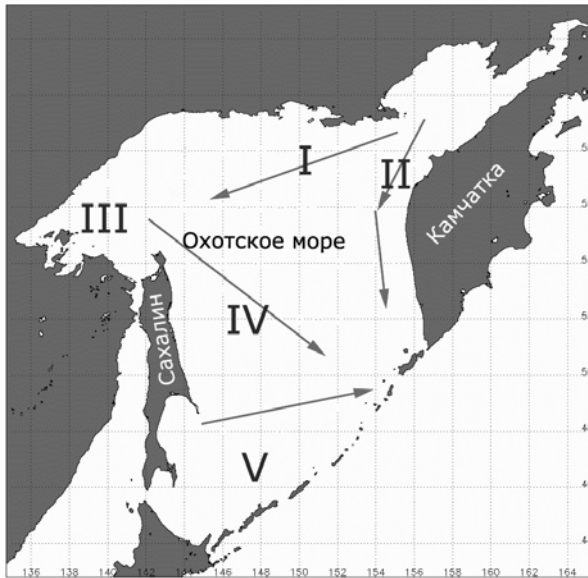


Рис. 1. Районы зарождения и схематические траектории мезоциклонов в Охотском море

Районы зарождения и траектории МЦ в Охотском море схематически показаны на рисунке 1. Траектории МЦ определяются, как правило, направлением воздушного потока в нижней тропосфере. МЦ, сформировавшиеся в северной части моря, малоподвижны. Оказавшись в северо-западном потоке, господствующем над большей частью моря при холодных вторжениях, они смещаются на юго-восток, иногда пересекая Курильские о-ва и выходя в Тихий океан. МЦ, зародившиеся в юго-западной части моря, в основном перемещаются на восток или северо-восток, достигая Камчатки и Курильских о-вов.

Исследования проводились для холодного сезона (октябрь-апрель) за период 2003-2008 гг. Из выявленных по полю облачности мезоциклонов выбирались те, в которых скорость ветра W была не менее 15 м/с. За исследуемый период над морем зародилось

примерно 400 МЦ. В среднем с октября по апрель формировалось 80 МЦ. Наибольшее количество МЦ (97) наблюдалось в холодный сезон 2005-2006 гг., наименьшее (55) – в 2003-2004 гг. Пик мезомасштабного циклогенеза приходился на декабрь – в среднем 26,2 МЦ в месяц. Минимальное количество зарождалось в апреле – в среднем 1,4 МЦ. Ноябрь и февраль по количеству МЦ (10-11) были примерно одинаковы. В октябре зарождалось в два раза больше МЦ, чем в марте: 8,2 и 4,2, соответственно. Наибольшее количество МЦ (52%) имело размер менее 200 км. Эти МЦ из-за небольших размеров и короткого жизненного цикла не представляют серьезной опасности для мореплавания. 39% мезовихрей имело размер 200-400 км, а вихри размером более 400 км составляли всего 9%. В штормовую обстановку в Охотском море в основном вносят вклад МЦ размером более 200 км.

Ниже подробно рассмотрен мезомасштабный циклогенез в северной части Охотского моря 30-31 декабря 2004 г.

Мезоциклоны 30-31 декабря 2004 г.

Примером мезомасштабного циклогенеза в североохотской ложбине служит формирование и эволюция МЦ 30-31 декабря 2004 г. (рис. 2). На видимом и ИК-изображениях, полученных спектрометрией MODIS со спутника Aqua, хорошо видны два облачных вихря в форме запятой. Ниже подробно исследуется западный МЦ, который в процессе эволюции смещался на юго-запад со скоростью 10 км/ч. Размер его за 13 час увеличился примерно от 100 км в 03:05 Гр. (рис. 2а) до 250 км в 16:35 Гр. (рис. 2б). Облачные гряды являются индикатором холодного вторжения в центральной части Охотского моря.

Процесс эволюции МЦ отражен в последовательности полей паросодержания атмосферы (рис. 2г-е), восстановленных из яркостных температур по алгоритму [4-6]. Значения V в МЦ выше фоновых на 3-6 кг/м². В поле V хорошо прослеживается формирование облачной полосы I с циклонической кривизной, которая постепенно уплотнялась по мере увеличения паросодержания. По данным за 03:05 Гр. 30 декабря (рис. 2а) эта полоса в поле облачности почти не проявляется, но в поле паросодержания атмосферы уже хорошо видна: значения V составляют в среднем 5 кг/м² (рис. 2г). В 16:35 Гр. 30 декабря (рис. 2б) полоса I уплотнилась, паросодержание в ней увеличилось на 1-2 кг/м² (рис. 2д). Циклоническая кривизна при этом усилилась. Анализ полей облачности показал, что процесс формирования второго МЦ заметно активизировался, и

проявилась тенденция к объединению двух МЦ. Из совместного анализа полей облачности и водяного пара за 02:10 Гр. 31 декабря (рис. 2в, е) следует, что облачная полоса уплотнилась еще

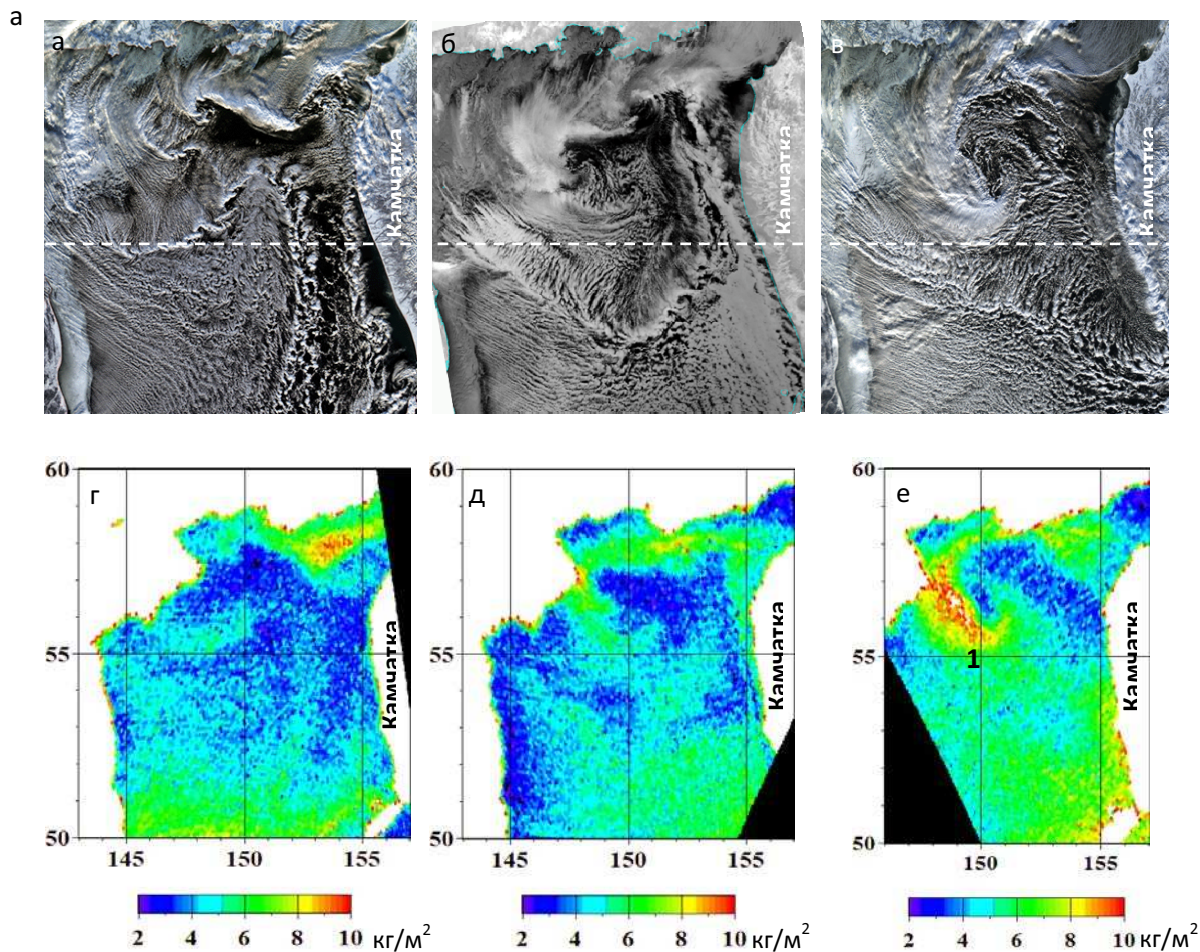


Рис. 2. Эволюция мезоциклона над Охотским морем по данным спутника Aqua 30 декабря в 03:05 Гр. (а) и (г) и в 16:35 Гр. (б) и (д) и 31 декабря 2004 г в 02:10 Гр. (в) и (е); (а) – (в) - поле облачности на изображениях спектрорадиометра MODIS и (г) – (е) - поле паросодержания атмосферы, восстановленное из измерений AMSR-E. Белая пунктирная линия на (а) – (в) проведена по 55°с.ш.

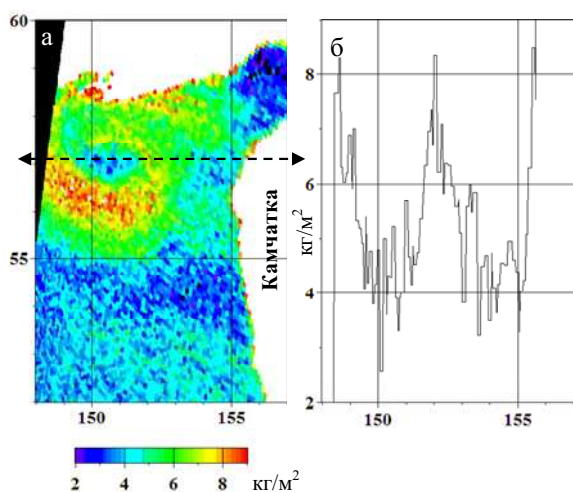


Рис. 3. (а) Поле паросодержания атмосферы V в области мезоциклона, восстановленное из измерений AMSR-E со спутника Aqua в 15:40 Гр. 31 декабря 2004 г. и (б) вариации V вдоль широтного разреза, проходящего через его центр. Положение разреза показано черной пунктирной линией на (а)

больше, а значения V возросли на 2-3 $\text{кг}/\text{м}^2$ относительно предыдущего срока. Полоса втянулась в циркуляцию МЦ (рис. 2е). Сформировался один МЦ размером 350-400 км, который в процессе эволюции принял спиральную форму. Высота верхней границы облаков в спиральных полосах по данным ИК-каналов MODIS составила примерно 2-2.5 км. Высокие градиенты V по данным AMSR-E за 15:40 Гр. 31 декабря на границе между сухим малооблачным центром и облачной спиралью демонстрирует разрез через центр МЦ (рис. 3а). В центре МЦ, где из-за оседания воздух сухой, значения V достигают минимума ($<2.5 \text{ кг}/\text{м}^2$). В наиболее развитой по вертикали конвективной облачности в стене глаза V резко возрастает до значений $> 8 \text{ кг}/\text{м}^2$ (рис. 3б). Водозапас облаков в стене глаза МЦ меняется в пределах 0.07-0.12 $\text{кг}/\text{м}^2$, достигая в максимуме 0.15

кг/м², что свидетельствует о возможности выпадения слабых жидких осадков (рис. 4а). Индикатором наличия кристаллической фазы в облачности МЦ могут служить пониженные значения яркостной температуры на частоте 89.0 ГГц на вертикальной (V) поляризации $T_b(89V) < 230$ К (рис. 4б). Они соответствуют ярким по тону конвективным спиральям на синхронном ИК-изображении MODIS, полученном со спутника Aqua (рис. 4в). В этих зонах возможны твердые осадки. Вероятность осадков косвенно подтверждают и результаты обработки данных скаттерометра QuikSCAT за 18:33 Гр. 31 декабря. Зоны возможного выпадения осадков маркированы в поле приводного ветра черными флагами, которыми помечаются большие ошибки восстановления W . Эти ошибки могут быть обусловлены как зонами осадков, так и влиянием льда.

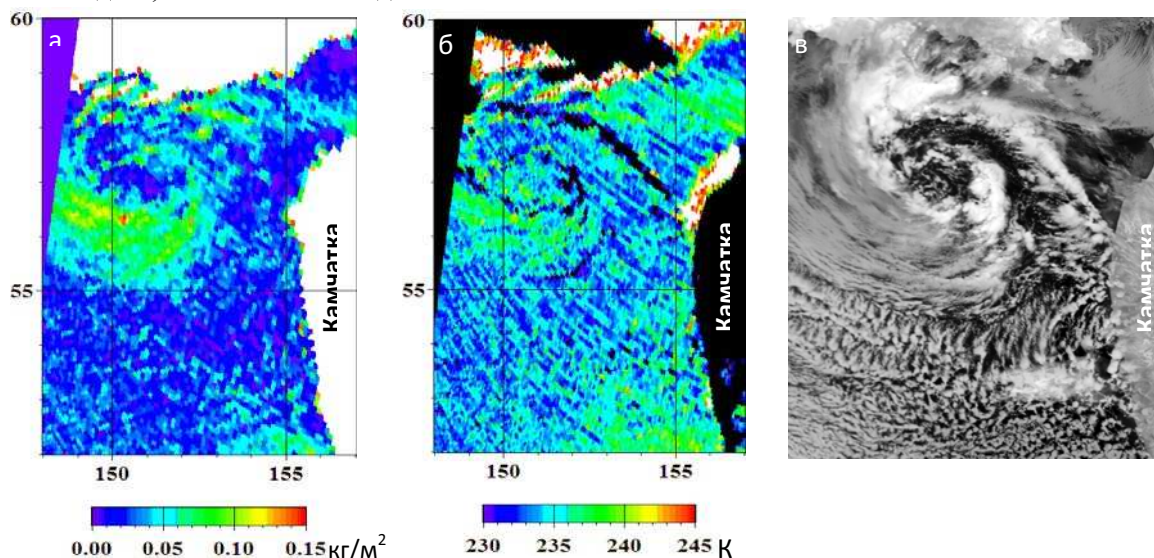


Рис. 4. Зрелый мезоциклон по данным, полученным со спутника Aqua 31 декабря 2004 г. в 15:40 Гр.: (а) водозапас облаков, восстановленный из измерений AMSR-E, поле яркостной температуры на частоте 89,0 ГГц на вертикальной поляризации и ИК-изображение облачности

Отпечатки атмосферных процессов на морской поверхности демонстрирует поле приводного ветра, восстановленное по данным скаттерометра за 09:14 Гр. (рис. 5а) и PCA (Envisat) за 11:34 Гр. (рис. 5б) 30 декабря. Несмотря на разницу во времени в 3 часа, поле приводного ветра по данным скаттерометра согласуется с вариациями яркости на изображении PCA. Наиболее ярким по тону областям соответствует скорость ветра 15-20 м/с. В поле ветра отчетливо отпечатывается эволюция МЦ: зона сильных ветров, имевшая форму запятой (рис. 5а, в), сменяется на спиральную (рис. 5г).

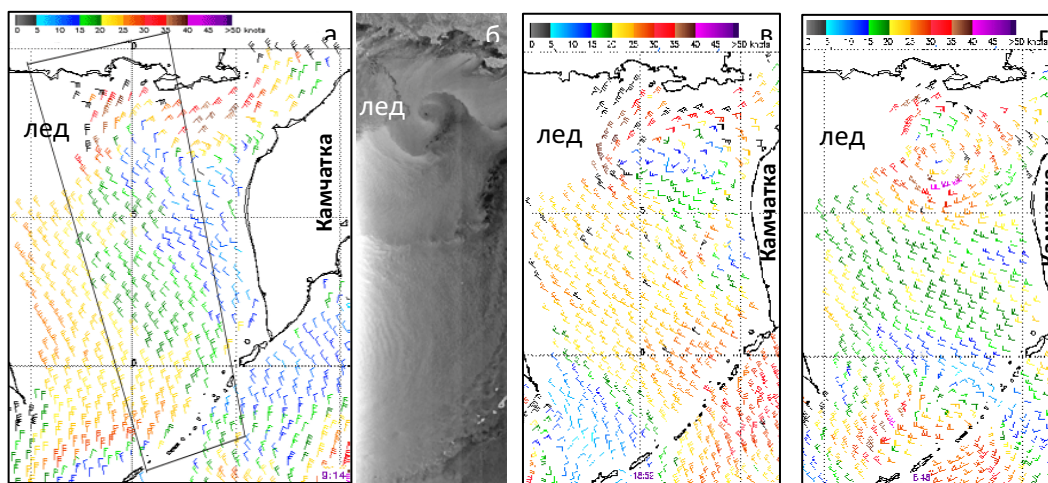


Рис. 5. Поля приводного ветра над Охотским морем, полученные из измерений скаттерометра SeaWinds со спутника QuikSCAT (а) в 09:14 Гр. и (в) в 18:52 Гр. 30 декабря, (г) в 06:48 Гр. 31 декабря; изображение PCA (б), полученное со спутника Envisat в 11:34 Гр. 30 декабря. Шкала скорости ветра на (а), (в) и (г) – в узлах. Черные линии на (а) показывают границы полосы обзора изображения PCA

Вариации яркости изображения РСА обусловлены вариациями скорости и направления ветра. Изображение РСА (рис. 5б) позволяет уверенно выделить зоны усиления и ослабления ветра, линии сдвига ветра вдоль внутренних границ облачных спиралей, а также точно определить положение центра (глаза) МЦ, который идентифицируется как темная область, соответствующая слабым ветрам. Хорошо видна мезомасштабная изменчивость ветра в областях организованной конвекции – в облачных грядах, ячейках и вихревых цепочках. Из сопоставления рис. 5б и 2б, следует высокая корреляция полей приводного ветра и облачности. Это означает, что конвекция охватывает всю толщу пограничного слоя атмосферы. Помимо ветра, на изображении РСА отображается структура ледяного покрова и прикромочной ледовой зоны.

Мезомасштабная изменчивость ветра отчетливо видна на фрагменте изображения РСА с разрешением 300 м (рис. 6а). Центр МЦ и зона слабых ветров к востоку от него отображаются очень темным тоном. Глаз окружает кольцо сильных ветров **1** – стена глаза диаметром примерно 80 км, имеющая яркий тон. Волновая структура границ сдвига ветра **2** и **3** и отдельные вихри вихревой цепочки **4** (рис. 6б, в) видны более отчетливо, чем на изображениях облачности, имеющих разрешение 250 и 1000 м соответственно (рис. 2а, б). В поле шероховатости морской поверхности (в поле волнения) хорошо прорисовывается структура отдельных вихрей цепочки **4**: светлая по тону область сильного ветра в форме запятой охватывает темный глаз в центре, аналогично распределению ветра в МЦ (рис. 6б). Размер вихрей в цепочке равен в среднем 12 км, расстояние от центра до центра 15-17 км. Длина волны волновых структур границы **2** (рис. 6в) варьирует от 6 до 9 км.

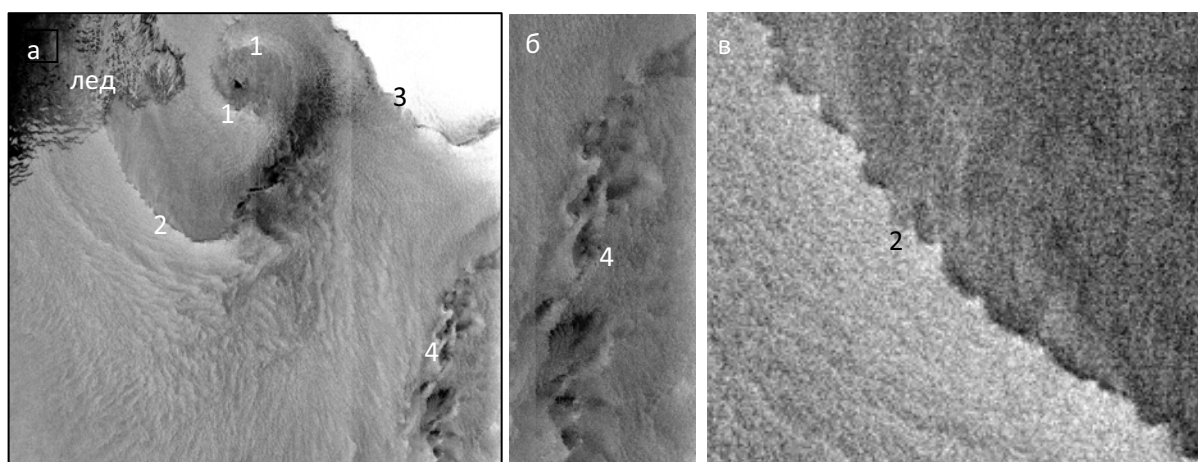


Рис. 6. Отпечатки мезомасштабной изменчивости приводного ветра на изображении РСА со спутника Envisat за 11:34 Гр. 30 декабря: (а) изображение РСА с пространственным разрешением 300 м; (б) фрагмент изображения, охватывающий вихревую цепочку; (в) фрагмент изображения, показывающий волны на фронтальном разделе

Выводы

Охотское море является районом активного мезомасштабного циклогенеза. В холодный сезон здесь в среднем зарождается 80 мезоциклонов размером от 100 до 600 км, причем преобладают вихри размером 100-200 км. Максимальное количество МЦ приходится на декабрь. С увеличением размера до 200 км и более возрастает вероятность опасных явлений погоды над морем (штормовой ветер, волнение, обледенение судов). Скорость ветра в интенсивных МЦ превышает 20 м/с, что представляет опасность для судов и нефтяных платформ. Комплексное использование спутниковых измерений позволяет не только получить информацию о формировании и эволюции МЦ (видимый и ИК-диапазоны), но и оценить их интенсивность, а также параметры атмосферы и океана в зоне их влияния (активное и пассивное зондирование в микроволновом диапазоне).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 06-05-96076-р_восток_a и 08-05-99109-р_офи. Данные микроволнового зондирования получены ТОИ из Японского аэрокосмического исследовательского агентства (JAXA) в рамках Commissioned Research Agreement for the Global Change Observation Mission (проект No. 111).

Литература

1. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press, 2003. 612 pp.
2. *Kolstad E.W.* A new climatology of favorable conditions for reverse-shear polar lows // *Tellus*. 2006. V. 58A. № 3. P. 344–354.
3. *Harold J.M., Bigg G.R., Turner J.* Mesocyclone activity over the northeast Atlantic. Part 2: An investigation of the causal mechanisms // *J. Climatology*. 1999. V. 19. № 12. P. 1283–1299.
4. *Mitnik L.M., 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. 8065, doi: 10.1029/2002RS002659.
5. *Митник М.Л., Митник Л.М.* Восстановление паросодержания атмосферы и водозапаса облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II // *Исследование Земли из космоса*, 2006. № 4. С. 34-41.
6. *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, vol. 29, No. 1, pp. 156-165.
7. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть II, вып. 5. Дальний Восток. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 176 с.
8. *Гурвич И.А., Митник Л.М., Митник М.Л.* Мезомасштабный циклогенез над дальневосточными морями: исследование на основе микроволновых радиометрических и радиолокационных измерений // *Исследование Земли из космоса*, 2008. № 5. С. 58-73.

Statistical characteristics, structure and parameters of mesoscale cyclones over the Okhotsk Sea from satellite microwave and optical data

I.A. Gurvich, L.M. Mitnik, M.L. Mitnik

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS
690041, Vladivostok, Baltiyskaya Street
E-mail: gurvich@poi.dvo.ru*

At the first time, statistical research of mesoscale cyclogenesis over the Okhotsk Sea is carried out. It was based on analysis of the satellite visible and infrared images acquired by Terra and Aqua MODIS in 2003-2008. The comprehensive analysis of evolution and structure of a mesocyclone observed over the Okhotsk Sea on 30-31 December 2004 was performed. Visible and infrared satellite images were compared with Aqua AMSR-E passive microwave measurements, as well as with the fields of total water vapor content and total cloud liquid water content retrieved from AMSR-E data. Zones of probable precipitation were revealed from the reduced: they manifested themselves as the zones with the reduced brightness temperatures at 89.0 GHz with vertical polarization. Mesoscale features of the sea surface wind were considered by comparing of QuikSCAT-derived wind field with brightness variations of Envisat ASAR image. Advantages of the usage of satellite SAR images in location of the mesocyclones center and revealing of the fine details of their structure are emphasized.

Keywords: mesoscale cyclones, the Okhotsk Sea, satellite data, microwave and optical bands.