Мультисенсорное спутниковое зондирование зимних циклонов со штормовыми и ураганными ветрами в северной части Тихого океана

Л.М. Митник¹, М.Л. Митник¹, И.А. Гурвич¹, А.В. Выкочко¹, Ю.А. Кузлякина¹, И.В. Чёрный², Г.М. Чернявский²

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Россия E-mail: mitnik@poi.dvo.ru ² Научно-технологический центр «Космонит» ОАО «Российские космические системы», Москва, Россия E-mail: icherny@cpi.space.ru

Циклоническая деятельность над северными частями Атлантического и Тихого океанов часто сопровождается резким ухудшением погоды из-за штормовых ветров и высоких волн. Выход циклонов на сушу приводит к серьезным экономическим потерям из-за сильного ветра и осадков. Оценки полей ветра и волнения в отдельных циклонах и суммарного вклада циклонов в потоки тепла и влаги за холодные периоды являются актуальными задачами, для решения которых наиболее пригодны методы спутникового дистанционного зондирования. Представлены результаты детального анализа спутниковых измерений нескольких циклонов над Тихим океаном в холодные сезоны 2009–2011 гг. При обработке данных радиометра AMSR-E со спутника Aqua определены зоны со скоростью ветра, превышающей 20–25 м/с, которые располагались преимущественно в юго-западном секторе циклонов. Обосновано предложение об использовании этих зон для настройки и валидации алгоритмов восстановления ветра.

Ключевые слова: мультисенсорное спутниковое зондирование, внетропические циклоны, скаттерометры, QuikSCAT, микроволновые радиометры, AMSR-E, MTB3A-ГЯ, MODIS, CloudSat, алгоритмы, паросодержание атмосферы, водозапас облаков, приводный ветер.

Введение

Изучение внетропических циклонов (ВТЦ) приобретает всё большую актуальность в связи с решением научных (изменение климата и его прогноз) и важных прикладных задач (морские транспортные операции, снижение ущерба при выходе циклонов на сушу). Среднее количество интенсивных циклонов над северным полушарием зимой (январьмарт), по данным реанализа поля давления на уровне моря NCEP/NCAR за 1958–1999 гг., составляло 234; причем был выявлен тренд снижения их количества на 1–2 циклона в год. Одновременно были выявлены рост их интенсивности, смещение траекторий к северу и более быстрая диссипация. (Gulev et al., 2001). Связь количества и других характеристик циклонов средних широт с изменениями климата изучалась и в последующих работах на основе данных реанализа за более длинный период и моделирования (Gulev et al., 2002; Голицин и др., 2007; Ulbric et al., 2009; Rudeva, Gulev, 2011). В эти же годы была рассмотрена связь количества ВТЦ и их размеров (Рудева, 2008), изучена климатология, эволюция и изменчивость времени жизни и других характеристик ВТЦ (Rudeva, Gulev, 2007), построены композиционная модели ВТЦ в северной Атлантике по данным реанализа за 60 лет (Rudeva, Gulev, 2011). Поля облачности и осадков ВТЦ оценивались как по данным моделирования, так и по спутниковым измерениям (Field et al., 2011). С ВТЦ связаны

большие турбулентные потоки из океана в атмосферу, изменчивость которых исследована в (Zolina, Gulev, 2003).

Необходимость широкого использования спутникового дистанционного зондирования при решении этих задач стала очевидной в последние 10–15 лет в связи с реализацией новых возможностей измерения количественных характеристик океана и атмосферы со спутников. В настоящее время скаттерометы являются наиболее важными спутниковыми приборами, обеспечивающими оценку вектора ветра у поверхности океана (Bourassa et al., 2010). Наибольший прогресс связан с измерениями приводного ветра скаттерометром SeaWinds со спутника QuikSCAT, которые выполнялись в 1999–2009 гг.

Особое внимание было уделено циклонам, в которых скорость ветра достигала 25 м/с (штормовой ветер) и 33 м/с (ураганный ветер) (Jzyk, 2010; Sienkiewicz, 2008). Статистика по наиболее интенсивным циклонам над Атлантическим и Тихим океанами пополнялась ежегодно, начиная с 2001 г. (Von Ahn et al., 2005), а поля ветра использовались для оперативного выпуска предупреждений (Jelenak, Chang, 2008; Bourassa et al., 2010; Chang et al., 2010; 2012). При обработке данных QuikSCAT по методике, обеспечившей пространственное разрешение 12,5 × 12,5 км вместо 25 x 25 км, количество циклонов, в которых была зарегистрирована скорость ветра в 25 и 33 м/с, возросло. Были также выявлены тренды в количестве циклонов, в их интенсивности и смещении траекторий (Jelenak et al., 2012a; b). После обработки данных QuikSCAT за 1999–2009 гг. с использованием новой геофизической модельной функции (ГМФ) Ku-2011 в Remote Sensing System были подготовлены ежедневные, недельные и месячные карты полей ветра (www.remss.com).

При совместном анализе микроволновых активных (скаттерометр) и пассивных (радиометр) измерений погрешности восстанавливаемых полей ветра снижаются, и улучшается временное разрешение. Важным источником сведений о ВТЦ и других морских погодных системах служат видимые и ИК-изображения облачности, а также вертикальные профили радиолокационной отражаемости на частоте 94 ГГц по данным Cloud Profiling Radar (CPR) со спутника CloudSat (Lee et al., 2012; Posselt et al., 2008). Такой подход развивается и в лаборатории спутниковой океанологии ТОИ ДВО РАН.

Пространственное разрешение современных спутниковых радиометров меняется от единицдо нескольких десятков километров при ширине полосы обзора до 1500–2000 км, что обеспечивает проведение глобального мониторинга скорости приводного ветра W, температуры поверхности океана (ТПО), паросодержания атмосферы V и водозапаса обла-ков Q над океаном, определение зон осадков и оценку их интенсивности I, картирование и измерения характеристик ледяного покрова. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в микроволновом диапазоне (частоты 1–300 ГГц) позволяет осуществлять наблюдение поверхности океана практически при любых метеорологических условиях, поскольку поглощение атмосферными газами и облаками, особенно в сантиметровом и дециметровом участке спектра, заметно снижается.

В данной работе характеристики и эволюция внетропических циклонов изучены на основе анализа данных, полученных в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах длин волн. Приведены примеры мультисенсорного анализа циклонов, прохождение которых над северной частью Тихого океана, над Охотским и Беринговым морями сопровождалось сильными ветрами и осадками, что существенно усложняло рыбопромысловые и транспортные операции и добычу нефти с платформ.

Спутники и данные

Количественные характеристики ВТЦ над северной частью Тихого океана были получены в основном по измерениям в микроволновом диапазоне. Измерения яркостных температур уходящего излучения T_я осуществлялись микроволновыми радиометрами AMSR-Е (спутник Aqua, 2002–2011), AMSR2 (спутник GCOM-W1, 2012 – по настоящее время) и МТВЗА-ГЯ (спутник Метеор-М № 1, 2009 – н. в.). Измерения рассеяния от морской поверхности выполнялись скаттерометрами WindSat (спутник QuikSCAT, 2001-2010) и ASCAT (спутники MetOp-A, 2006 – н. в. и MetOp-B, 2009 – н. в.), а рассеяния от облачных и дождевых капель – радаром Cloud Profile Radar (CPR) (спутник CloudSat, 2006 – н. в.). Структура облачности ВТЦ выявлялась по изображениям в видимом и ИК-диапазонах, полученным спектрорадиометром MODIS (спутники Terra, 1999 – н. в. и Aqua, 2002 – н. в.). Карты приземного анализа Японского метеорологического агентства и Национального центра прогнозирования окружающей среды NOAA (NCEP/MPC) за 00, 06, 12 и 18 Гр. служили источником сведений о поле атмосферного давления, о скорости и направлении ветра по судовым и береговым измерениям, о наличии и видах осадков, о траектории циклонов и о прогнозе положения их центров в следующие сроки. Спутниковые данные, продукты на их основе и наземные измерения были получены с различных сайтов в интернете. Для анализа были отобраны глубокие циклоны в холодный период года, характеризуемые более низкими значениями параметров V и Q (а, следовательно, и более низким поглощением в атмосфере), что обеспечивало определение скорости приводного ветра с меньшей погрешностью по сравнению с летними ВТЦ и тропическими циклонами.

Алгоритмы

Поля паросодержания атмосферы V, водозапаса облаков Q, скорости приводного ветра в области ВТЦ восстанавливались по яркостным температурам с использованием оригинальных алгоритмов. При разработке алгоритмов для оценки интегральных параметров атмосферы использовалась алгебраизированное представление уравнения переноса излучения в системе океан-атмосфера (Башаринов и др., 1974). Коэффициенты в соотношениях, приведенных в (Mitnik, Mitnik, 2003; Митник, Митник, 2006; Mitnik et al., 2009), были скорректированы в соответствии с более точным описанием поглощения в водяном паре (Turner et al., 2009), спектра диэлектрической проницаемости пресной и соленой воды и изменчивости коэффициентов излучения океана при ветре (Liu et al., 2011; Meissner, Wentz, 2012). В усовершенствованном алгоритме скорость ветра определялась по приращению яркостной температуры океана при ветре $T_{sox}(10\Gamma, W)$ на частоте 10,65 ГГц на горизонтальной (Г) поляризации относительно спокойной поверхности $T_{sox}(10\Gamma, W = 0)$. Для этого

по восстановленным значениям поглощения в облаках и паросодержания атмосферы рассчитывался вклад излучения атмосферы в яркостную температуру системы океан-атмосфера $T_{_{\rm яок}}(10\Gamma)$, регистрируемую спутниковым радиометром (Митник, Митник, 2011; Mitnik, Mitnik, 2010). Алгоритмы успешно применялись для оценки полей *V*, *Q* и *W* в морских погодных системах (Mitnik et al., 2008; Гурвич и др., 2009; Bobylev et al., 2011). Работа над совершенствованием алгоритмов продолжается (Zabolotskikh et al., 2013). Основной проблемой остаётся уточнение микроволновых характеристик морской поверхности при ветрах W > 20 м/с, что, в частности, обусловлено сложностью получения надёжных экспериментальных данных в широком диапазоне частот зондирования и при различных углах визирования.

Внетропические циклоны над Тихим океаном

<u>Циклон над Беринговым морем 19 ноября 2009 г.</u> Циклон возник в районе о-вов Рюкю 16 ноября в 12 Гр. на волне полярного фронта и перемещался под струйным течением на северо-восток, в район Берингова моря. Скорость его перемещения составляла 70–80 км/ час. Циклон интенсивно углублялся: за сутки с 17 на 18 ноября давление в его центре P_{μ} понизилось на 14 мб, а за сутки 18–19 ноября – на 36 мб. В Берингово море циклон вышел в 12 Гр. 19 ноября в стадии максимального развития. По данным ЯМА $P_{\mu} = 954$ мб, и зона штормовых ветров с W = 15-28 м/с распространялась на 1300–1500 км от центра. Циклон вызвал опасные и особо опасные явления погоды на Камчатке, в Беринговом море и над Алеутскими о-вами.

По данным скаттерометра спутника QuikSCAT за 19 ноября в 07:29 и 17:14 Гр. (*рис. 1*) скорость ветра в циклоне достигала 25–30 м/с. В зону влияния циклона попали Камчатка и часть Алеутских о-вов: 19–20 ноября на Камчатке отмечались снегопады при штормовом ветре. Высота волн в Беринговом море достигала 9–10 м.



Рис. 1. Поле приводного ветра в циклоне над Беринговым морем по данным скаттерометра Windsat со спутника QuikSCAT за 19 ноября 2009 г. в 07:29 Гр. (а) и в 17:14 Гр. (б)

Такие же высокие скорости зарегистрированы в 01:25 и 14:55 Гр. радиометром AMSR-E. Так, в зоне фронта окклюзии в южном секторе циклона ветер в 01:25 Гр. усиливался до 27 м/с (*puc. 2a*), а по данным за 14:55 Гр. ветры до 25 м/с отмечались в зоне фронта окклюзии как к югу, так и к северу от центра циклона (*puc. 26*).



Рис. 2. Поле приводного ветра в циклоне над Беринговым морем, восстановленное по измерениям радиометра AMSR-E со спутника Aqua за 19 ноября 2009 г. в 01:25Гр. (а) и в 14:55 Гр. (б)

Поля паросодержания атмосферы и водозапаса облаков (*puc. 3a*, *б*) позволяют определить вероятные зоны выпадения осадков и оценить их интенсивность. В 01:25 Гр. наиболее интенсивные осадки наблюдались в зонах теплого и холодного фронтов, в области окклюдирования и на восточном участке фронта окклюзии. В этих областях водозапас облаков превышал 1,0 кг/м², а паросодержания атмосферы возрастало до 50 кг/м². Приведенные оценки следует рассматривать как приближенные из-за влияния осадков на T_{g} на частотах 23,8 и 36,5 ГГц, которые используются для восстановления V и Q в алгоритме (Митник, Митник, 2006; Mitnik et al., 2009). Оценки скорости ветра в этих областях также сопряжены с большими погрешностями. (Эти области выделены белым цветом на *puc. 3*). В 14:55 Гр. циклон достиг максимальной стадии развития и полностью окклюдировался. Водяной пар и капельная влага распределились более равномерно по облачной спирали циклона, а их максимальные значения уменьшились почти в два раза (*puc. 36, г*) и не препятствовали восстановлению ветра.



Рис. 3. Поля паросодержания атмосферы (а, в) и водозапаса облаков (б, г) в циклоне над Беринговым морем, восстановленные по измерениям радиометра AMSR-E со спутника Aqua 19 ноября 2009 г. в 01:25 Гр. (а, б) и в 14:55 Гр. (в, г)

Циклон над Охотским морем 20–21 декабря 2010 г. 20 декабря в 03 гр. к югу о. Сахалин подошел циклон с давлением в центре 1004 гПа. Этот циклон образовался 19 декабря над континентом (координаты центра 44°с. ш., 123° в. д.) и смещался на северо-восток. Скорость его перемещения возрастала от 30 до 50 км/час. Этот циклон принес на Сахалин заметное потепление: температура на севере повысилась на 4°С, начался снег. На юге шел мокрый снег при температуре 0 до -5° С. К вечеру 20 декабря циклон сместился на север Сахалина, где наблюдались снегопады и метели при температуре ночью от –9 до -1° С, а днем от –4 до -10° С. Южные районы находились в тыловой части циклона. Временами шел снег, на западном побережье – с метелью. Минимальное давление в центре циклона в 06 Гр. 21 декабря составило 990 гПа. К середине 21 декабря циклон сместился к Магадану, давление понизилось на 6 гПа. На Сахалин снова распространился отрог сибирского антициклона.

Микроволновые измерения со спутника Aqua были выполнены в 02:30 Гр. 21 декабря. Поля приводного ветра, паросодержания атмосферы и водозапаса облаков, найденные

по алгоритмам (Митник, Митник, 2006; 2011), приведены на *рис. 4.* Циклон оказывает воздействие на всё море. Его спиральная структура выражена в полях всех параметров. В центральной области 1 ветры слабые, а воздушная масса характеризуется паросодержанием V = 7-9 кг/м². Центр циклона располагается на 53° с. ш., 148,5° в. д.; значения водозапаса здесь близки к нулю. В более влажном воздухе (область 2), где V = 11-13 кг/м², скорость ветра также выше и составляет 13-16 м/с. Самые сильные ветры (W = 23-27 м/с) дуют в полосе 3, пересекающей Сахалин. При таких ветрах сплоченность ледяного покрова и структура прикромочной ледовой зоны меняются, скорость дрейфа льда возрастает, что может оказывать серьёзное влияние на нефтяные платформы. Образующийся в открытом море ледяной покров обозначен цифрой 5.



Рис. 4. Циклон над Охотским морем 21 декабря 2010 г. в 02:30 Гр.: поля приводного ветра W (a), паросодержания атмосферы V (б) и водозапаса облаков Q (в), восстановленные по данным радиометра AMSR-E со спутника Aqua: 1 – зона холодного сухого воздуха, где W = 3–5 м/с и V = 8–10 кг/м²; 2 – более теплая и влажная воздушная масса, где W = 13–16 м/с и V = 11–13 кг/м²; 3 – область наиболее сильных ветров, где W = 23–27 м/с, 4 – область слабых ветров; 5 – морской лед

<u>Циклон над Тихим океаном 12 февраля 2010 г.</u> Февраль 2010 г. характеризовался активной циклонической деятельностью на полярном фронте в северной части Тихого океана. При перемещении на северо-восток в алеутскую депрессию и к западному побережью Северной Америки циклоны интенсивно углублялись, и ветер в некоторых из них достигал ураганной силы. Рассмотрим результаты спутникового зондирования одного из таких



Рис. 5. Циклон над северной частью Тихого океана 12 февраля 2010 г в 23:05 Гр. :
а) видимое изображение, полученное спектрорадиометром MODIS со спутника Aqua;
б) разность яркостных температур на вертикальной и горизонтальной поляризациях на частоте 36,5 ГГц по измерениям радиометра AMSR-E со спутника Aqua;
в) профиль радиолокационной отражаемости на частоте 94 ГГц вдоль траектории спутника CloudSat, показанной на (а) и (б) стрелкой, направленной с юга на север. Цифры вдоль стрелки на (а) показывают расстояние в километрах

циклонов, центр которого в 00 Гр. 13 февраля находился в точке с координатами 45° с. ш., 147° з. д. Давление в центре циклона составляло 952 мб (карта приземного анализа NCEP/MPC за 00 Гр. 13 февраля). На видимом изображении, полученном спектрорадиометром MODIS в 23:05 Гр. 12 февраля (*puc. 5a*), хорошо отображается структура циклона: расширяющаяся к северу спираль плотной облачности во влажной воздушной массе, примыкающая к ней с запада сухая и холодная воздушная масса с открытыми конвективными ячейками, малооблачная центральная зона. Отмеченные особенности структуры циклона прослеживаются и в поле разности яркостных температур ΔT_{s} (36) = T_{s} (36B) – T_{s} (36Г) на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях по данным радиометра AMSR-E со спутника Aqua в 23:05 Гр. (*рис. 5б*). Значения $\Delta T_g(36)$ максимальны (70–80 К) в ситуациях, когда поляризованное излучение океана мало поглощается атмосферой (при низких значениях паросодержания атмосферы и отсутствии водяных облаков) и/или не снижено из-за сильного ветра (область 1). С ростом поглощения в атмосфере (с ростом *Q* и *V*) и скорости ветра *W* поляризационная разность уменьшается до 10-20 К и ниже, как в пределах облачной спирали (*рис. 56*).

Прямая линия на *рис. 5а, б* отмечает подспутниковую траекторию ориентированного в надир радиолокатора CPR, установленного на спутнике CloudSat и работающего на частоте 94 ГГц. Вертикальное сечение радиолокационной отражаемости (РЛО) показывает внутреннюю структуру облачности и осадков (*рис. 5e*), что представляет большой интерес при изучении атмосферных фронтов и циклонов особенно в сочетании с измерениями, выполняемыми другими спутниками группы A-train и при их моделировании (Lee et al., 2012; Posselt et al., 2008). Следует подчеркнуть, что поскольку РЛО пропорциональна диаметру рассеивающих частиц в шестой степени, то трансформация данных CPR в значения водозапаса облаков и интенсивности дождя возможна только при наличии дополнительной информации.

При движении с юга на север между 400 и 600 км на *рис. 5в* видны особенности облачности холодного фронта. Верхняя граница облаков расположена здесь на высоте 5,5–6,0 км. Максимальная РЛО отмечается на высотах от примерно 1 до 4 км, где она варьирует от 5 до 15 дБ. Западная периферия центральной зоны циклона (между 1350 и 1420 км), где количество облаков мало, а поляризационная разность велика (*рис. 5a, б*), четко выделяется на фоне облачности с высотой верхней границы равной \approx 6 км, окружающей ее с юга и севера. Наиболее мощная облачность с осадками наблюдается к северу от центра циклона. Здесь нижняя граница РЛО начинается у поверхности океана, а верхняя постепенно повышается от 6 до 8 км. Максимальная отражаемость (больше 15 дБ) наблюдается между 1450 и 1650 км. К северу от 1750 км содержание капель и вертикальная протяженность облаков уменьшаются. Нижняя граница облаков к 2150 км повышается до 6 км.



Рис. 6. Циклон над северной частью Тихого океана 12 февраля 2010 г. в 23:05 Гр.: а) паросодержание атмосферы; б) водозапас облаков; в) скорость ветра

Поля интегральных параметров – содержания водяного пара в толще атмосферы и капелек воды в облаках – показаны на *puc. 6a, б.* В зоне холодного фронта и фронта окклюзии воздух влажный с $V \ge 20-30$ кг/м². В центральной части холодного фронта располагается облачность, водозапас которой в основном $\approx 0,4-0,6$ кг м², однако в узкой полосе Q > 1 кг/м². Там определенно выпадают осадки. В холодном сухом воздухе, также вовлеченном в циклоническую циркуляцию, V = 13-15 кг/м², а водозапас облачности не превышает 0,2-0,3 кг/м²: на *puc. 66* просматриваются только отдельные ячейки. В центральной зоне циклона значения $V \approx 15$ кг/м², а водозапас близок к нулю. Максимальный ветер – до 30-33 м/с наблюдается в штормовом кольце вокруг центральной зоны, где $W \le 10$ м/с. В общирной зоне вокруг штормового кольца W = 15-20 м/с. Поле ветра по данным AMSR-Е находится в хорошем согласии с полем ветра, восстановленным практически синхронно скаттерометром на спутнике Индии OceanSat-2 (http:// podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OS2_OSCAT_LEVEL_2B_OWV_COMP_12_V2).



Рис. 7. Циклон над северной частью Тихого океана 12 февраля 2010 г. Яркостные температуры на частотах (слева направо) 23,8; 31,5; 36,5; 42,0 и 48,0 ГГц на вертикальной (верхний ряд) и горизонтальной (нижний ряд) поляризациях, измеренные радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника Метеор-М № 1 в 20:34 Гр.

Существенного прогресса в изучении ВТЦ над океаном можно ожидать при анализе данных многоканального сканирующего радиометра МТВЗА-ГЯ на спутниках серии Метеор-М, что, в частности, обусловлено использованием в радиометре частотных каналов, обеспечивающих восстановление как вертикальных профилей температуры и влажности воздуха (зондировщик), так и интегральных параметров атмосферы *V* и *Q* и скорости приводного ветра (сканер), а также наличием новых частот, таких как 42,0 и 48,0 ГГц (Барсуков и др., 2009; Cherny et al., 2010). Спутник Метеор-М № 1 был запущен в сентябре 2009 г. Измерения на частотах сканера от 10 до 48 ГГц продолжаются и в 2013 г. На *рис. 7* приведены

поля яркостных температур внетропического циклона, выполненные МТВЗА-ГЯ 12 февраля 2011 г. в 20:34 Гр. за 2,5 часа до измерений AMSR-Е. Сравнение полей T_{g} МТВЗА-ГЯ на 5 частотах на В- и Г-поляризациях (*puc.* 7) с полями паросодержания атмосферы и водозапаса облаков, восстановленными по данным радиометра AMSR-Е (*puc.* 6), выявляет существенные различия. Различия обусловлены улучшением пространственного разрешения с ростом частоты от 23,8 ГГц до 48 ГГц и увеличением размера антенны (0,61 см на спутнике Метеор-М № 1 и 1,6 м на спутнике Aqua), а также повышенным поглощением в водяном паре в окрестности линии поглощения 22,23 ГГц и ростом с частотой поглощения в капельных облаках.

Заключение

Потенциал мультисенсорного спутникового зондирования системы атмосфераокеан продемонстрирован на примере исследования структуры и параметров нескольких внетропических циклонов над Тихим океаном. Количество внетропических циклонов, сопровождающихся штормовым ветром и осадками, велико (Chang et al., 2009; 2012), и детальное изучение их структуры, параметров и эволюции представляет собой актуальную задачу, важную как для улучшения их моделирования и прогноза, так и для обеспечения безопасности работ в море и в прибрежных районах. Измерения в видимом и ИК-диапазонах дают представление о структуре и температуре (высоте) верхней границы облаков, в то время как по данным пассивного и активного микроволнового зондирования определяются параметры подстилающей поверхности (ветер и ТПО), интегральные параметры атмосферы (V u Q) и прорисовывается строение облачности по вертикали. Таким образом, данные различных датчиков, осуществляющих зондирование Земли в пассивном и активном режимах с разных спутников, позволяют в совокупности восстанавливать трехмерную структуру морских погодных систем.

Изучение характеристик ВТЦ по спутниковым данным позволяет предложить оптимальный подход для определения зависимости коэффициентов излучения морской поверхности от скорости ветра. В глубоких ВТЦ, регулярно наблюдаемых из космоса над океаном в холодные периоды, регистрируются обширные области с высокими скоростями ветра и малым поглощением в атмосфере. Такое сочетание условий является идеальным для количественного исследования радиационно-ветровой зависимости. При этом используются значения яркостной температуры океана, найденные из измерений яркостной температуры системы океан-атмосфера на частоте 10,65 ГГц на Г-поляризации AMSR-Е по методике (Митник, Митник, 2011; Mitnik, Mitnik, 2010), и близкие по времени поля ветра, восстановленные из калиброванных измерений скаттерометра. После запуска в мае 2012 г. спутника GCOM-W1 с радиометром AMSR2 на борту база данных микроволновых пассивных и активных измерений BTЦ стала быстро пополняться.

Авторы благодарят Японское аэрокосмическое исследовательское агентство JAXA за предоставление данных радиометра AMSR-Е со спутника Aqua и M.K. Пичугина за помощь в обработке данных Cloudsat. Работа выполнена при частичной поддержке Целевой комплексной программы ДВО РАН «Спутниковый мониторинг Дальнего Востока для проведения фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН» и грантов РФФИ 11-05-12047-офи-м-2011 и 13-05-12093-офи-м.

Литература

- 1. Барсуков И.А., Болдырев В.В., Ильгасов П.А. и др. СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ спутника «Метеор-М» № 1 / Тр. Всероссийской науч.-техн. конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». М.: Физматлит. 2009. С. 99–107.
- 2. *Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974, 187 с.
- 3. Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю. Функции распределения вероятности циклонов и антициклонов в период 1952–2000 гг.: инструмент для определения изменений глобального климата // Докл. АН. 2007. Т. 413. № 2. С. 254–256.
- 4. *Гурвич И.А., Митник М.Л., Митник Л.М.* Мезомасштабные вихри над Охотским морем: исследование структуры и параметров по данным спутникового микроволнового и оптического зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 111–117.
- 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. *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.
- Рудева И.А. О связи количества внетропических циклонов с их размерами // Изв. РАН. ФАО. 2008. Т. 44. № 3. С. 1–7.
- Bobylev L. P., Zabolotskikh E.V., Mitnik L.M. et al. Arctic polar low detection and monitoring using atmospheric water vapor retrievals from satellite passive microwave data // IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. No. 9. P. 3302–3310.
- Bourassa M.A., Bonekamp H., Chang P. et al. Remotely sensed winds and wind stresses for marine forecasting and ocean modeling // Proc. OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society Conf. 2010. V. 2. Venice, Italy, eds. J. Hall, D.E. Harrison, D. Stammer, ESA Publication WPP-306.
- Chang P.S., Jelenak Z., Sienkiewicz J.M. et al. Operational use and impact of satellite remotely sensed ocean surface vector winds in the marine warning and forecasting environment // Oceanography. 2009. V. 22. No. 2. P. 194–207. doi:10.5670/oceanog.2009.49.
- 11. *Chang P.S., Bourassa M., Jelenak Z.* Satellite ocean surface vector winds application overview: Research and operations // Proc. IGARSS 2012. Munich, Germany, 22–27 July 2012.
- 12. Cherny I.V., Mitnik L.M., Mitnik M.L., Uspensky A.B., Streltsov A.M. On-orbit calibration of the "Meteor-M" Microwave Imager/Sounder // Proc. IGARSS 2010. P. 558–561.

- Field P.R., Bodas-Salcedo A., Brooks M.E. Using model analysis and satellite data to assess cloud and precipitation in midlatitude cyclones // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2011. V. 137. P. 1501–1515.
- 14. *Gulev S.K., Zolina O., Grigoriev S.* Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data // Climate Dynamics. 2001. V. 17. P. 795–809.
- Jelenak Z., Chang P.S. NOAA operational satellite ocean surface vector winds QuikSCAT follow-on mission: User impact study report, 2008. 90 pp. Available online at: http://manati. orbit.nesdis.noaa.gov/SVW_nextgen/QFO_user_impact_study_final.pdf.
- 16. *Jelenak Z., Chang P.S, Sienkiewicz J.M.* Wind field distribution within hurricane force extratropical cyclones over North Pacific and Atlantic using QuikSCAT scatterometer measurements. https:// 2012a, ams.confex.com/ams/92Annual/webprogram/Paper202829.html.
- Jelenak Z., Patoux J., Chang P., Sienkiewicz J. Hurricane force extratropical cyclones trends from ECMWF and Ocean Prediction Center Analysis // International IOWVST Meeting. 2012b, Utrecht, Netherlands.
- 18. *Jzyk P*. QuikSCAT analysis of hurricane force extratropical cyclones in the Pacific Ocean // Senior Honors Projects. 2010. Paper 177. http://digitalcommons.uri.edu/srhonorsprog/177
- 19. *Lee T.F., Bankert R.L., Mitrescu C.* Meteorological education and A-train profilers // Bull. American Meteorological Society. 2012. V. 93. No. 5. P. 687–696.
- 20. *Liu Q.H., Weng F.Z., English S.J.* An improved fast microwave water emissivity model // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2011. V. 49. No. 4. P. 1238–1250.
- 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. No. 8065, doi: 10.1029/2002RS002659.
- 22. *Mitnik L.M., Mitnik M.L.* AMSR-E advanced wind speed retrieval algorithm and its application to marine weather systems // Proc. IGARSS 2010. P. 3224–3227.
- 23. *Mitnik L.M., Mitnik M.L., Gurvich I.A.* Severe weather study in middle and high oceanic latitudes using Aqua AMSR-E // Proc. IGARSS 2008. V. 5. P. 330–333.
- 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. No. 1. P. 156–165.
- Meissner T., Wentz F.J. The emissivity of the ocean surface between 6 90 GHz over a large range of wind speeds and Earth incidence angle // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 8. P. 3004–3026.
- 26. *Posselt D., Stephens G.L., Miller M.* CloudSat: Adding a new dimension to a classical view of extratropical cyclones // Bull. American Meteorol. Soc. 2008. V. 89. No. 5. P. 599–609.
- 27. *Rudeva I., Gulev S.K.* Climatology of cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle // Monthly Weather Review. 2007. V. 135. P. 2568–2587.
- 28. *Sienkiewicz J.M., Ahmad K., McFadden G.M. et al.* Hurricane force extratropical cyclones // Scatterometer and Climate Meeting. Arlington, VA Aug 19–21. 2009.
- 29. *Ulbrich U., Leckebusch G.C., Pinto J.* Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review // Theoretical and Applied Climatology. 2009. V. 96. No. 1–2. P. 117–131.

- Von Ahn J., Sienkiewicz J., McFadden G. Voluntary observing ship program // Mar. Wea. Log. 2005. V. 49. No. 1. http://www.vos.noaa.gov/MWL/april_05/cyclones.shtml.
- 31. *Zabolotskikh E.V, Mitnik L.M., Shapron B.* New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // Gephys. Res. Letters. 2013. V. 40. Issue 13. P. 3347–3489.
- 32. *Zolina O., Gulev S.K.* Synoptic variability of ocean-atmosphere turbulent fluxes associated with atmospheric cyclones // J. Climate. 2003. V. 16. P. 2717–2734.

Multisensor satellite sensing of winter cyclones with storm and hurricane winds in Northern Pacific Ocean

L.M. Mitnik¹, M.L. Mitnik¹, I.A. Gurvich¹, A.V. Vykochko¹, Yu.A. Kuzlyakina¹, I.V. Cherny², G.M. Chernyavsky²

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia E-mails: mitnik@poi.dvo.ru ² Scientific-Technological Center «Kosmonit» JSC «Russian Space Systems» Moscow, Russia E-mail: icherny@cpi.space.ru

Passing of cyclones over the Northern Atlantic and Northern Pacific oceans is frequently accompanied by sudden changes for deterioration of weather conditions due to storm winds and high waves. Landfalling cyclones cause gross economic losses due to strong winds and heavy precipitation. Estimates of wind and sea surface roughness fields in particular cyclones and total contribution of the cyclones to heat and water vapor fluxes during cold seasons are topical issues. Satellite remote sensing data are the most suitable for their solving. Results of comprehensive analysis of satellite measurements carried out over several cyclones in the Pacific Ocean during cold seasons 2009–2011 are given. High wind zones with wind speed exceeding 20–25 m/s were determined by processing Aqua AMSR-E data. They were located mainly in southwest sector of cyclones. Proposal was demonstrated to use these zones for tuning and validation of wind speed retrieval algorithms.

Keywords: multisensory satellite sensing, extratropical cyclones, scatterometers, QuikSCAT, microwave radiometers, AMSR-E, MTVZA-GYa, MODIS, CloudSat, algorithms, total atmospheric water vapor content, total cloud liquid water content, sea surface wind.