Оценки характеристик облачной стены глаза тайфунов по данным скаттерометров ASCAT

М.С. Пермяков, Т.И. Клещёва, Е.Ю. Поталова

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН Владивосток, 690041, Россия E-mails: permyakov@poi.dvo.ru, tit@poi.dvo.ru, gata@poi.dvo.ru

В работе обсуждаются и применяются методы оценок основных характеристик облачной стены глаза тропического циклона (TЦ) по данным скорости ветра скаттерометра ASCAT (спутники MetOp-A и MetOp-B). По предложенным методам получены оценки координат центра TЦ, радиусов максимального ветра и глаза для 33 тайфунов в северо-западной части Тихого океана в период с 2011 по 2015 г. Радиусы максимального ветра в TЦ, полученные двумя способами, варьировали в диапазоне от 14 до 158 км и в среднем составили 55 и 47 км соответственно. Радиусы глаза TЦ, рассчитанные по вихрю скорости ветра ASCAT, изменялись в диапазоне от 5 до 21 км и в среднем составили 12 км. Эти оценки были сравнены с данными бест-треков TЦ Объединённого центра предупреждения тайфунов (JTWC). Показано, что расстояния между центрами тайфунов, оценённые по данным ASCAT двумя методами и JTWC, варьировали от 1 до 82 км и в среднем составили 20 и 17 км соответственно. Радиусы максимального ветра по данным ASCAT и JTWC тесно связаны с коэффициентами корреляции около 0,5 при среднеквадратичной разнице в 21 и 24 км соответственно. Отмечено, что радиусы максимального ветра и глаза TЦ из архива JTWC явно группируются около дискретных значений с интервалами 3–10 км, что обусловлено спецификой используемого метода их оценок.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, тропический циклон, облачная стена, радиус максимального ветра, радиус глаза, ASCAT, JTWC

Одобрена к печати: 12.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-249-258

Введение

Особенностью структуры зрелых тропических циклонов (ТЦ) является кольцо мощных кучевых облаков, так называемая облачная стена, которая окружает практически свободную от облачности внутреннюю область — глаз тайфуна (урагана). Облачная стена и глаз тайфуна образуют внутреннюю активную зону, в которой наблюдаются максимальные ветры и горизонтальные градиенты давления и температуры, ливневые осадки из мощных грозовых облаков (Shea, Gray, 1973). Характеристики этой зоны, такие как координаты центра, максимальный ветер и его радиус, радиус глаза, являются основными для штормовых сводок параметрами тайфунов и для их численного прогноза, в том числе и с использованием региональных мезомасштабных моделей высокого разрешения типа Weather Research and Forecasting (WRF) model (Powers et al., 2017).

Сбором данных по тропическим циклонам по всему Мировому океану и оценками их параметров занимается ряд организаций в рамках международной программы World Weather Watch (https://www.wmo.int/pages/prog/www/). К ним относятся региональные и глобальные метеорологические центры, которые получают количественные характеристики ТЦ в течение их эволюции, хранящиеся в архивах так называемых бест-треков. При этом используется метод Дворака (Dvorak, 1975; Velden et al., 2006), основанный на применении эмпирически установленных связей между интенсивностью тропических циклонов и структурами облачных полей на спутниковых изображениях в видимом и инфракрасном диапазонах. Однако работа с последними имеет определённые недостатки и ограничения, что приводит к существенным погрешностям оценок характеристик ТЦ. Субъективность анализа и классификации облачных узоров, разница между ними и наблюдаемым ветром, зависимость от угла сканирования спутником, ситуации закрытия центральной области ТЦ перистыми облаками

и др. — всё это не позволяет достаточно точно оценивать интенсивность и другие характеристики ТЦ (Velden et al., 2006). Это обусловило активное развитие как самой техники Дворака (см., например, работу (Olander, Velden, 2007)), так и методов, использующих данные дистанционного зондирования по связанным с интенсивностью ТЦ характеристикам (Пермяков, Поталова, 2013; Пермяков и др., 2013; Тархова и др., 2010; Kossin et al., 2007; Permyakov et al., 2015; Wimmers, Velden, 2010).

С октября 2006 г. на спутнике MetOp-A, а затем с сентября 2012 г. на спутнике MetOp-B Европейским космическим агентством введены в эксплуатацию и продолжают функционировать по сей день скаттерометры Advanced Scatterometer (ASCAT), которые обеспечивают данными по скорости и направлению ветра над океанами с приемлемой точностью (Verhoef et al., 2012). Цель настоящей работы — представить методы вычислений характеристик облачной стены глаза ТЦ (координат центра, радиусов максимального ветра и глаза ТЦ) по данным скаттерометров ASCAT и сравнить полученные по ним оценки с данными архивов Объединённого центра предупреждения тайфунов (США), которые содержат наиболее полный набор данных по ТЦ.

Данные

Сведения о тропических циклонах были взяты из архива Объединённого центра предупреждения тайфунов (JTWC) (http://www.metoc.navy.mil/jtwc/jtwc.html). Бест-треки агентства JTWC содержат информацию как минимум о десяти параметрах ТЦ на стадиях от тропического возмущения до заполнения в стандартное синоптическое время с 6-часовым интервалом. В работе использовались данные по трём параметрам: положению центра ТЦ ($C_{JTWC} = (\lambda, \phi)$), радиусу максимального ветра (RMW_{JTWC}) и радиусу глаза тайфуна ($REYE_{JTWC}$, по данным о диаметре глаза). Выбирались тропические циклоны в северо-западной части Тихого океана за период с 2011 по 2015 г., достигшие интенсивности тайфуна (скорость ветра ≥ 33 м/с) и супертайфуна (скорость ветра ≥ 67 м/с).

Для этих ТЦ подбирались ежедневные данные второго уровня о приводном ветре с пространственным разрешением 12,5 км, полученные по результатам сканирования морской поверхности скаттерометрами ASCAT со спутников MetOp-A и MetOp-B (Verhoef et al., 2012). Массивы с данными были получены через свободный ftp-доступ на сайте NASA Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (https://podaac.jpl.nasa.gov/). Скорость ветра ASCAT даётся в диапазоне 0-50 м/с; погрешности оценок компонент скорости ветра составляют порядка 2 м/с при ветрах ниже 25 м/с и постепенно увеличиваются с возрастанием скорости ветра (Verhoef et al., 2012).

Выборка данных ASCAT проводилась в полосе сканирования, покрывающей центральную область ТЦ, в квадрате размером 41×41 точек ($512,5 \times 512,5$ км), центр которого находился на минимальном расстоянии от центра тайфуна по данным бест-треков JTWC, координаты которого на время данных ASCAT определялись с помощью сплайновой интерполяции. Время сканирования в выбранном квадрате составляет чуть более одной минуты. В качестве примера на *рис. 1* (см. с. 251) представлено изображение в видимом диапазоне тайфуна Dolphin (№ 1507), полученное с японского спутника MTSAT-2 16 мая 2015 г. в 00:32 UTC и доступное на сайте NRL Tropical Cyclone Page (https://www.nrlmry.navy.mil/TC.html). Здесь же показаны полоса сканирования скаттерометра ASCAT/MetOp-A и квадрат с выбранными на время снимка данными. Всего было собрано 110 массивов данных о приводном ветре для 33 тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана за рассматриваемый период.

Методы оценок характеристик облачной стены глаза тайфуна

Для оценки характеристик облачной стены глаза тайфуна компоненты ветра ASCAT сначала пересчитывались в прямоугольную систему координат (x, y) с началом в центре выделенного квадрата и направлением оси ординат вдоль полосы сканирования.



Рис. 1. Изображение в видимом диапазоне тайфуна Dolphin, полученное со спутника MTSAT-2 16 мая 2015 г. в 00:32 UTC. Чёрными точками показаны точки данных в полосе сканирования скаттерометра ASCAT/MetOp-A, красным квадратом — выбранные на время снимка данные ASCAT



Рис. 2. Поля модуля (*a*) и вихря (*c*) скорости ветра ASCAT/MetOp-A, их матрицы эталонов при максимальной корреляции (*б*, *д*) и радиальные распределения (*в*, *e*) 16 мая 2015 г. в 00:32 UTC в тайфуне Dolphin. Чёрные точки на иллюстрациях (*в*) и (*e*) — значения скорости ветра ASCAT и его вихря на радиусах точек данных относительно найденного центра ТЦ; красные линии — их сглаженные радиальные распределения

Затем по полю скорости ветра в прямоугольной системе (*puc. 2a*) оценивались координаты центра тайфуна и радиус его максимального ветра с помощью корреляционного метода (Прэтт, 1982), часто используемого для анализа форм и положения отдельных структур на цифровых изображениях. В нашем случае требовалось оценить геометрические характеристики размытого овала в области максимального ветра, а именно координаты центра овала $C_{\text{ASCAT1}} = (x_{c1}, y_{c1})$ и его радиус RMW_{ASCAT1} . Метод заключается в поиске в простран-стве трёх параметров $(x_{c1}, y_{c1}, RMW_{\text{ASCAT1}})$ максимума корреляции матрицы ветра ASCAT с матрицей эталона. Последняя рассчитывается на той же сетке по параметрам эталонного кольцевого распределения ветра. В таком эталоне радиальное распределение ветра задаётся гауссианом фиксированной ширины (в настоящей работе она принята равной 7 км) с максимумом на некотором радиусе, который и требуется определить. В этой процедуре сама величина максимума скорости ветра в эталоне не имеет значения для расчёта корреляции и задавалась равной единице. Для нахождения максимума корреляции использовалась простая процедура регулярного поиска, которая даёт оценки радиуса максимального ветра RMW_{ASCAT1} и координаты центра $C_{ASCAT1} = (x_{c1}, y_{c1})$. На *рис. 26* показана матрица эталона, соответствующего полю ветра на *рис. 2a* (см. с.251), при максимальной корреляции между ними (для повышения точности метода в расчётах вместо скорости ветра использовался её квадрат).

Используемый в настоящей работе корреляционный метод быстро сходится, устойчив к асимметрии поля ветра и к начальным приближениям $C_{ASCAT1} = (x_{c1}, y_{c1})$ и RMW_{ASCAT1} . В качестве начальных приближений в различных тайфунах использовались грубые визуальные оценки положения минимума скорости ветра ASCAT и радиуса максимального ветра по полям, подобным *puc. 2a.* Кроме этого, надо отметить, что скорость ветра ASCAT свыше 25 м/с гораздо ниже реальной (Verhoef et al., 2012). Несмотря на это, в целом поля ветра скаттерометров сохраняют крупномасштабные структуры и их формы и отражают качественные особенности поля ветра в области ядра тайфуна. В данном случае это область максимальных ветров (овал или кольцо на *puc. 2a*). Поэтому для оценок геометрических характеристик по данным ASCAT нам представляется более уместным применять именно корреляционный метод, а не другие, использующие аппроксимацию данных (типа метода наименьших квадратов).

Получив оценки координат центра тайфуна, можно легко рассчитать расстояния (радиусы) между ним и всеми точками данных в выбранном квадрате и построить график радиального распределения скорости ветра (*puc. 2в*). Положение максимума на сглаженном радиальном (относительно найденного центра $C_{\rm ASCAT1}$) распределении скорости ветра даёт вторую оценку радиуса максимального ветра $RMW_{\rm ASCAT2}$ (см. *puc. 2в*). Однако в ряде случаев радиальное распределение не имело чётко выраженного максимума, как на *puc. 2в*, что обусловило нереально большие/малые величины $RMW_{\rm ASCAT2}$, которые были отбракованы. При этом корреляционный метод давал более реалистичные значения.

Поле вихря скорости ветра (*puc. 2г*), который в настоящей работе рассчитывался методом центральных разностей на пятиточечном шаблоне, позволяет оценить ещё один важный параметр — радиус глаза тайфуна. Известно, что конвективная облачность в стене глаза ТЦ возникает при восходящих движениях воздуха, а в свободном от облачности глазе наблюдаются нисходящие движения (Shea, Gray, 1973). При этом направление вертикальных движений в толще атмосферы определяется знаком вихря скорости ветра в соответствии с теорией экмановского пограничного слоя атмосферы, в котором вертикальная скорость связана с завихренностью ветра (экмановской накачкой). Координаты центра тайфуна $C_{\rm ASCAT2}$ (*puc. 2d*), полученные описанным выше корреляционным методом по полям вихря, позволяют построить график его радиального распределения, на котором радиус изменения знака вихря можно использовать в качестве оценки радиуса глаза тайфуна $REYE_{\rm ASCAT}$ (*puc. 2e*). Значение $REYE_{\rm ASCAT}$ определяется радиусом пересечения линии оси абсцисс (радиусов) функцией линейной регрессии, построенной по нескольким (5–10) точкам в области смены знака вихря. При этом значения $REYE_{\rm ASCAT}$ могут быть меньше пространственного разрешения данных ASCAT. Для каждой из полученных характеристик на время данных ASCAT были определены соответствующие оценки из архивов агентства JTWC, при этом для координат центра ТЦ, как указано выше, — с помощью сплайновой интерполяции, а для радиусов — с помощью линейной интерполяции между ближайшими стандартными сроками. Для сравнения координат центра ТЦ C_{JTWC} и $C_{\text{ASCAT1,2}}$ последние пересчитывались в географические $C_{\text{ASCAT1}} = (\lambda_1, \phi_1)$ и $C_{\text{ASCAT2}} = (\lambda_2, \phi_2)$. В качестве меры расхождения между оценками радиусов (максимального ветра, глаза) по ветру ASCAT и из архива JTWC использовалось среднее квадратичное отклоне-

ние, рассчитываемое для двух массивов (*f* и *r*) по формуле $rmsd = \left[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left[(f_n - \overline{f}) - (r_n - \overline{r})\right]^2\right]^{1/2}$.

Оценки характеристик облачной стены глаза тайфуна по данным ASCAT и сравнение их с данными JTWC

На *рис. 3* показаны оценки положения центра тайфуна Dolphin, радиусов максимального ветра (*RMW*_{ASCAT1} и *RMW*_{ASCAT2}) и глаза (*REYE*_{ASCAT}), полученные описанными выше методами по данным ASCAT/MetOp-A за 16 мая 2015 г. в 00:32 UTC. Здесь же представлены соответствующие характеристики ТЦ по данным архивов JTWC, полученные на время данных ASCAT. Вычисленные оценки согласуются со структурами облачной стены глаза тайфуна на изображении в видимом диапазоне со спутника MTSAT-2. Например, по скорости ветра и его вихрю были получены координаты центра ТЦ $C_{ASCAT1} = (142,25^{\circ} \text{ в.д.}, 15,27^{\circ} \text{ с. ш.})$ и $C_{ASCAT2} = (142,32^{\circ} \text{ в.д.}, 15,32^{\circ} \text{ с. ш.})$ соответственно, т.е. расстояние между ними составило 10,3 км. Как видно на *рис. 3*, обе оценки попали в область глаза тайфуна. Для сравнения, $C_{JTWC} = (142,22^{\circ} \text{ в.д.}, 15,27^{\circ} \text{ с. ш.})$, т.е. расстояние между C_{ASCAT1} (C_{ASCAT2}) и C_{JTWC} составило 2,8 и 12,8 км соответственно. Такие расхождения в оценках положения центра циклона по данным ветра ASCAT и агентства JTWC значительно ниже средних значений, полученных по всем выбранным массивам (N = 110) для 33 тайфунов. Как видно из *maблицы*, расстояния между центрами тайфунов ($C_{ASCAT1} - C_{JTWC}$) и ($C_{ASCAT2} - C_{JTWC}$) варьировали от 1 до 82 км и в среднем составили 20 и 17 км соответственно. Надо отметить, что средние ошибки положения центров тропических циклонов в бест-треках JTWC составляют 55 км, достигая в некоторых случаях значений более 100 км (Martin, Gray, 1993).



Рис. 3. Характеристики облачной стены тайфуна Dolphin 16 мая 2015 г. в 00:32 UTC по данным ASCAT/MetOp-A и JTWC на части изображения в видимом диапазоне со спутника MTSAT-2: положения центра ТЦ и радиусы максимального ветра в ТЦ (*a*), радиусы глаза ТЦ (*б*)

	Расстояние между центрами ТЦ, км		Радиус максимального ветра, км			Радиус глаза, км	
	$C_{\rm ASCAT1} - C_{\rm JTWC}$	$C_{\rm ASCAT2} - C_{\rm JTWC}$	RMW _{ASCAT1}	RMW _{ASCAT2}	<i>RMW</i> _{JTWC}	REYE _{ASCAT}	<i>REYE</i> _{JTWC}
	N = 110		N = 110	N = 98	N = 110	N = 42	
Мин.	1	3	23	14	13	5	5
Макс.	74	82	158	157	83	21	33
Средн.	20	17	55	47	32	12	15
СКО	16	13	25	28	14	5	5

Статистические характеристики расстояний между центрами ТЦ, радиусов максимального ветра и радиусов глаза ТЦ по данным ASCAT и JTWC. *N* — количество оценок

Как видно на *рис. За*, радиус максимального ветра в тайфуне Dolphin, полученный по данным ветра ASCAT корреляционным методом $(RMW_{ASCAT1} = 44 \text{ км})$, заметно больше оценённого по радиальному распределению скорости ветра относительно найденного центра C_{ASCAT1} ($RMW_{ASCAT2} = 35 \text{ км}$). В свою очередь, обе эти оценки больше радиуса максимального ветра из архивов JTWC ($RMW_{JTWC} = 31 \text{ км}$). Такая же закономерность проявляется для всех выбранных за период 2011–2015 гг. тайфунов (см. *таблицу*). Например, в то время как значения RMW_{ASCAT1} изменялись от 23 до 158 км и в среднем составили 55 км, величины RMW_{ASCAT2} варьировали от 14 до 157 км и в среднем составили 47 км (см. *таблицу*). Коэффициент корреляции между ними достигает 0,98, а средняя квадратичная разница составляет всего 6,1 км, что говорит о достаточно высокой согласованности двух методов оценок. Радиусы максимального ветра в ТЦ по данным агентства JTWC существенно меньше оценок по данным ветра ASCAT и находятся в диапазоне от 13 до 83 км, в средняя квадратичная разница составя 32 км (см. *таблицу*). Между оценками RMW_{ASCAT1} (RMW_{ASCAT2}) и RMW_{JTWC} отмечена тесная связь с коэффициентами корреляции, равными 0,54 (0,53). При этом средняя квадратичная разница между оценками весьма существенна и достигает 21 км (24 км). Отметим на *рис. 4а* и *б*, где показаны диаграммы рассяяния величин RMW_{ASCAT1} , RMW_{ASCAT2} и RMW_{JTWC} , явное группирование последних около дискретных значений, следующих с интервалами примерно от 3 до 10 км, что является явным проявлением недостатков методики оценок JTWC (Velden et al., 2006).

Ещё одной важной характеристикой тайфунов является радиус его глаза, под которым, как правило, понимается свободная от облачности центральная область ТЦ с незначительными барическими градиентами и, соответственно, низкими скоростями ветра (0–5 м/с).



Рис. 4. Диаграммы рассеяния оценок радиусов максимального ветра (*a*, *б*) и радиусов глаза (*в*) по данным ASCAT и JTWC

Мы предположили, что радиус глаза ТЦ можно определить как расстояние смены знака вихря ветра ASCAT на его радиальном распределении относительно центра $C_{\rm ASCAT2}$ (см. *рис. 2e*). Всего таким способом было получено 42 оценки *REYE*_{ASCAT} (для 23 тайфунов), которые лежали в диапазоне от 5 до 21 км и в среднем составили 12 км (см. *таблицу*). Радиусы глаза ТЦ из архива JTWC на время данных ASCAT были больше наших оценок (rmsd = 6 км) и варьировали в пределах от 5 до 33 км, *REYE* лтwc = 15 км (см. *таблицу*). Например, для тайфуна Dolphin $REYE_{JTWC} = 23$ км, что на 10 км больше нашей оценки $REYE_{ASCAT} = 13$ км (см. *рис. 36*). Коэффициент корреляции между величинами $REYE_{ASCAT}$ и $REYE_{JTWC}$, полученными для 23 тайфунов, статистически не значим и равен 0,23. Это может быть следствием погрешности оценок диаметра глаза агентством JTWC по спутниковым изображениям, на что указывает их группировка около значений 14 и 20 км на диаграмме рассеяния оценок REYE_{ASCAT} и REYE_{JTWC} (puc. 4в). Оценки по вихрю приводного ветра также недостаточно надёжны, поскольку из-за погрешностей ветра ASCAT и низкого пространственного разрешения поля вихря могут содержать ещё более значительные погрешности — до ~100 % значений самого поля. Однако они могут быть использованы в качестве ориентировочных, особенно в случае закрытия центральной области ТЦ щитом перистых облаков, что делает её совершенно невидимой для радиометров и на изображениях в видимом диапазоне. В такой ситуации агентство JTWC присваивает нулевое значение радиусу глаза, как, например, для тайфуна Hagupit (№ 1422), изображение которого в видимом диапазоне со спутника MTSAT-2 за 5 декабря 2014 г. в 01:32 UTC представлено на *рис. 5*. По нашим же оценкам, по вихрю ветра ASCAT на время 01:26 UTC, т.е. за 6 мин до снимка, радиус глаза равен 9 км, что немногим меньше приблизительной оценки радиуса затемнённой области в центре тайфуна на рис. 5, который составил около 12–13 км. На время 00:00 UTC 5 декабря агентство JTWC не смогло определить радиус глаза тайфуна, в то время как в ближайшие сроки (18:00 UTC 4 декабря и 6:00 UTC 5 декабря) его оценка составила 9,5 км, что, надо отметить, очень близко к нашему значению *REYE*_{ASCAT}.



Рис. 5. Изображение в видимом диапазоне тайфуна Hagupit, полученное со спутника MTSAT-2 5 декабря 2014 г. в 01:32 UTC

Заключение

В работе обсуждаются и применяются методы оценок характеристик области стены глаза тайфунов (положения центра, радиуса максимального ветра и радиуса глаза) по полю приводного ветра скаттерометра ASCAT. Показано, что корреляционный метод достаточно прост и эффективен для оценки геометрических характеристик в области стены глаза тайфуна в условиях больших погрешностей данных ASCAT, их низкого пространственного разрешения и существенного занижения скаттерометрических скоростей при штормовых и ураганных ветрах. Второй метод использует радиальные распределения скорости ветра (для оценки радиуса максимального ветра) и его вихря (для оценки радиуса глаза ТЦ) и даёт близкие к полученным первым методом значения, что говорит о достаточно высокой согласованности двух методов оценок.

Радиусы глаза ТЦ и радиусы максимального ветра, полученные для 33 ТЦ в северо-западной части Тихого океана за период 2011–2015 гг., в среднем составили 12 и 50 км соответственно. Сравнение этих оценок с аналогичными оценками по данным бест-треков агентства JTWC показало, что расстояния между центрами тайфунов по JTWC и рассчитанными двумя методами по данным ASCAT составили в среднем 17 и 20 км. Радиусы максимального ветра по данным ASCAT, также вычисленные двумя методами, имеют согласованные с JTWC величины с коэффициентами корреляции около 0,5 при среднеквадратичной разнице в оценках 21 и 24 км. Отмечено, что в отличие от характеристик ТЦ, полученных использованными методами, радиусы максимального ветра и глаза из архива JTWC явно группируются около дискретных значений, что обусловлено спецификой используемой агентством методики оценок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-80011).

Литература

- 1. *Пермяков М. С., Поталова Е. Ю.* Мезомасштабная структура тропических циклонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 72–80.
- 2. *Пермяков М. С., Поталова Е. Ю., Клещёва Т. И.* Мезомасштабная структура тропических циклонов в поле приводного ветра // Метеорология и гидрология. 2013. № 11. С. 22–29.
- 3. Прэтт У. Цифровая обработка изображения / пер. с англ. М.: Мир, 1982. 480 с.
- 4. *Тархова Т. И., Пермяков М. С., Поталова Е. Ю., Семыкин В. И.* О связи аномалий приповерхностного ветра с градиентами температуры поверхности океана по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 45–52.
- 5. *Dvorak V.F.* Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery // Monthly Weather Review. 1975. V. 103. P. 420–430.
- 6. *Kossin J. P., Knaff J. A., Berger H. I., Herndon D. C., Cram T. A., Velden C. S., Murnane R. J., Hawkins J. D.* Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance // Weather Forecasting. 2007. V. 22. P. 89–101.
- 7. *Martin J. D., Gray W. M.* Tropical cyclone observation and forecasting with and without aircraft reconnaissance // Weather Forecasting. 1993. V. 8. P. 519–532.
- 8. *Olander T. L., Velden C. S.* The advanced Dvorak technique: continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery // Weather Forecasting. 2007. V. 22. P. 287–298.
- 9. *Permyakov M. S., Potalova E. Yu., Shevtsov B. M., Cherneva N. V., Holzworth R. H.* Thunderstorm activity and the structure of tropical cyclones // Atmospheric and Oceanic Optics. 2015. V. 28. P. 585–590.
- Powers J. G., Klemp J. B., Skamarock W. C., Davis C. A., Dudhia J., Gill D. O., Coen J. L., Gochis D. J., Ahmadov R., Peckham S. E., Grell G. A., Michalakes J., Trahan S., Benjamin S. G., Alexander C. R., Dimego G. J., Wang W., Schwartz C. S., Romine G. S., Liu Z., Snyder C., Chen F., Barlage M. J., Yu W., Duda M. G. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions // BAMS. 2017. V. 98. No. 8. P. 1717–1737.
- 11. Shea D.J., Gray W.M. The hurricane inner core region // J. Atmospheric Sciences. 1973. Vol. 30. P. 1544–1464.

- Velden C., Harper B., Wells F., Beven J. L., Zehr R., Olander T., Mayfield M., Guard C., Lander M., Edson R., Avila L., Burton A., Turk M., Kikuchi A., Christian A., Caroff P., McCrone P. The Dvorak Tropical Cyclone Intensity Estimation Technique: A Satellite-Based Method that Has Endured for over 30 Years // BAMS. 2006. V. 87. No. 9. P. 1195–1210.
- 13. *Verhoef A., Portabella M., Stoffelen A.* High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. P. 2481–2487. DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175001.
- 14. *Wimmers A. J.*, *Velden C. S.* Objectively Determining the Rotational Center of Tropical Cyclones in Passive Microwave Satellite Imagery // J. Applied Meteorology and Climatology. 2010. V. 49. P. 2013–2034.

Estimates of the characteristics of cloud wall of the typhoon eye according to ASCAT scatterometers data

M. S. Permyakov, T. I. Kleshcheva, E. Yu. Potalova

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia E-mails: permyakov@poi.dvo.ru, tit@poi.dvo.ru, gata@poi.dvo.ru

Methods to estimate the main characteristics of the cloudy wall of the tropical cyclone (TC) eye based on the wind speed data of the scatterometer ASCAT (MetOp-A and MetOp-B satellites) are discussed and applied in this work. Based on the proposed methods, the estimates of the coordinates of the TC centers, the maximum wind and eye radii were obtained for 33 typhoons in the northwestern part of the Pacific Ocean in the period from 2011 to 2015. The maximum wind radii in the TC, obtained by two methods, ranged from 14 to 158 km and averaged 55 and 47 km, respectively. The TC eye radii, calculated from the ASCAT wind speed vorticity, varied in the range from 5 to 21 km and averaged 12 km. These estimates were compared with the TC best track data of the Joint Typhoon Warning Center (JTWC). It is shown that the distances between the typhoons centers, estimated by the ASCAT data with the help of two methods and the JTWC data, varied from 1 to 82 km and averaged 20 and 17 km, respectively. The maximum wind radii from ASCAT and JTWC are closely related with the correlation coefficients of about 0.5 and with a root-mean-square difference of 21 and 24 km, respectively. It is noted that the maximum winds and eyes radii from the JTWC archive clearly grouped around discrete values with intervals of 3–10 km, which is caused by the specification of the method of their evaluation.

Keywords: remote sensing, tropical cyclone, cloud wall, radius of maximum wind, radius of eye, ASCAT, JTWC

Accepted: 12.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-249-258

References

- 1. Permyakov M. S., Potalova E. Yu., Mezomasshtabnaya struktura tropicheskikh tsiklonov (Mesoscale structure of tropical cyclones), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 72–80.
- 2. Permyakov M. S., Potalova E. Yu., Kleshcheva T. I., Mezomasshtabnaya struktura tropicheskikh tsiklonov v pole privodnogo vetra (Mesoscale structure of tropical cyclones in the surface wind field), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, No. 11, pp. 22–29.
- 3. Pratt W., Tsifrovaya obrabotka izobrazheniya (Digital image processing), Moscow: Mir, 1982, 480 p.
- 4. Tarkhova T. I., Permyakov M. S., Potalova E. Yu., Semykin V. I., O svyazi anomalii pripoverkhnostnogo vetra s gradientami temperatury poverkhnosti okeana po dannym distantsionnogo zondirovaniya (About the coupling of surface wind anomalies and sea surface temperature gradients according to remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 45–52.
- 5. Dvorak V. F., Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery, *Monthly Weather Review*, 1975, Vol. 103, pp. 420–430.

- 6. Kossin J. P., Knaff J. A., Berger H. I., Herndon D. C., Cram T. A., Velden C. S., Murnane R. J., Hawkins J. D., Estimating hurricane wind structure in the absence of aircraft reconnaissance, *Weather Forecasting*, 2007, Vol. 22, pp. 89–101.
- 7. Martin J. D., Gray W. M., Tropical cyclone observation and forecasting with and without aircraft reconnaissance, *Weather Forecasting*, 1993, Vol. 8, pp. 519–532.
- 8. Olander T. L., Velden C. S., The advanced Dvorak technique: continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery, *Weather Forecasting*, 2007, Vol. 22, pp. 287–298.
- 9. Permyakov M. S., Potalova E. Yu., Shevtsov B. M., Cherneva N. V., Holzworth R. H., Thunderstorm activity and the structure of tropical cyclones, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, Vol. 28, pp. 585–590.
- Powers J. G., Klemp J. B., Skamarock W. C., Davis C. A., Dudhia J., Gill D. O., Coen J. L., Gochis D. J., Ahmadov R., Peckham S. E., Grell G. A., Michalakes J., Trahan S., Benjamin S. G., Alexander C. R., Dimego G. J., Wang W., Schwartz C. S., Romine G. S., Liu Z., Snyder C., Chen F., Barlage M. J., Yu W., Duda M. G., The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions, *BAMS*, 2017, Vol. 98, No. 8, pp. 1717–1737.
- 11. Shea D.J., Gray W.M., The hurricane inner core region, J. Atmospheric Sciences, 1973, Vol. 30, pp. 1544-1464.
- Velden C., Harper B., Wells F., Beven J. L., Zehr R., Olander T., Mayfield M., Guard C., Lander M., Edson R., Avila L., Burton A., Turk M., Kikuchi A., Christian A., Caroff P., McCrone P., The Dvorak Tropical Cyclone Intensity Estimation Technique: A Satellite-Based Method that Has Endured for over 30 Years, *BAMS*, 2006, Vol. 87, No. 9, pp. 1195–1210.
- 13. Verhoef A., Portabella M., Stoffelen A., High-resolution ASCAT scatterometer winds near the coast, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, pp. 2481–2487, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2175001.
- 14. Wimmers A.J., Velden C.S., Objectively Determining the Rotational Center of Tropical Cyclones in Passive Microwave Satellite Imagery, *Applied Meteorology and Climatology*, 2010, Vol. 49, pp. 2013–2034.