

## Динамические характеристики циклонов тропических и умеренных широт по данным спутниковых измерений

А.Ф. Нерушев, А.Э. Бархатов

*Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета  
249038, г. Обнинск, ул. Победы, 4  
E-mail: nerushev@typhoon.obninsk.ru*

Приведены результаты расчетов полей динамических характеристик атмосферы (горизонтальной скорости ветра, коэффициента мезомасштабной турбулентной диффузии, завихренности) в зонах действия тропического циклона Катя (август-сентябрь 2011 г.) и внетропического шторма Ксинтия (февраль 2010 г.) на разных стадиях их развития. Использовались данные многоволнового зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейского геостационарного метеорологического спутника Meteosat-9 с временным разрешением 15 мин. Выявлены особенности указанных характеристик на разных стадиях эволюции циклонов, включая трансформацию тропического циклона во внетропический.

**Ключевые слова:** циклоны тропических и внетропических широт, дистанционное зондирование, геостационарные спутники, динамические характеристики атмосферы.

### Введение

Циклоны тропических и умеренных широт являются существенным элементом общей циркуляции атмосферы, осуществляя интенсивный межширотный обмен массой и энергией. Вместе с тем, они (прежде всего тропические циклоны) принадлежат к опасным атмосферным явлениям, приводя при выходе на сушу к огромным экономическим потерям и человеческим жертвам. Несмотря на длительную историю изучения тропических циклонов (ТЦ), в том числе с применением космических средств дистанционного зондирования, некоторые принципиальные вопросы, касающиеся их зарождения и эволюции, остаются не решенными (Шарков, 2010). Это обусловлено как сложностью и открытостью самой физической системы ТЦ и наличием в ней большого количества обратных связей, так и заметной ограниченностью возможностей как прямых, так и дистанционных методов измерений параметров системы океан-атмосфера.

Поля динамических характеристик атмосферы играют важнейшую роль в процессах образования, эволюции и перемещения ТЦ. Информация о поле ветра в зонах действия ТЦ получается различными методами, при этом наиболее эффективным является дистанционное зондирование атмосферы с космических платформ. Если методы получения спутниковых ветров как для фоновых условий, так и в зонах действия ТЦ развиты достаточно хорошо (Menzel, 2001; Soden et al., 2001), то другие динамические характеристики или совсем не определяются спутниковыми методами (коэффициент мезомасштабной турбулентной диффузии) или определяются по рассчитанному полю ветра, но уже на другом пространственном масштабе (завихренность). Применяемый нами метод, детально описанный в (Нерушев, Крамчанинова, 2011), позволяет определять не только поле вектора скорости ветра ( $V$ ), но также коэффициент мезомасштабной турбулентной диффузии ( $K_d$ ) и завихренность ( $rotV$ ) на одном масштабе движения воздушной массы.

Цель настоящей статьи — на примере тропического циклона Катя (август-сентябрь 2011 г.) и сильного внетропического шторма Ксинтия (февраль 2010 г.) исследовать особенности динамических характеристик атмосферы на разных стадиях эволюции циклонов, включая трансформацию ТЦ во внетропический циклон. При этом использовались данные многоволнового зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейского геостационарного метеорологического спутника Meteosat-9, а для расчета динамических характеристик атмосферы применялся разработанный ранее метод (Нерушев, Крамчанинова, 2011) и новое более гибкое программное обеспечение.

## Краткое описание циклонов и использованных для расчетов данных

Тропический циклон Катя (Katia), сформировавшийся в виде тропической депрессии 29 августа 2011 года у юго-западных берегов островов Кабо-Верде в результате взаимодействия восточной волны с областью пониженного давления, двигался по классической траектории (рис. 1) и достиг 6 сентября в 00:00 UTC 4-й категории урагана по шкале Saffir-Simpson с наименьшим давлением в центре 942 гПа и скоростью приводного ветра 120 узлов ( $\approx 62$  м/с) (<http://www.nhc.noaa.gov/>). 10 сентября в 12:00 UTC он был идентифицирован как внетропический циклон. Однако скорость приводного ветра достигала ураганной силы (60–70 узлов). Приблизившись 12 сентября к северному побережью Великобритании, ураган Катя причинил значительный материальный ущерб и привел к гибели людей (<http://www.nhc.noaa.gov/>).

Интересной особенностью этого ТЦ явилась большая продолжительность «жизни» — 13 суток (а с учетом внетропической фазы — 16 суток, наибольшая из 20 ТЦ Атлантики сезона 2011 г.), а также наибольшая продолжительность стадии урагана (10 суток) и наибольшая (вместе с ТЦ Orhelia) скорость приводного ветра (120 узлов). С момента зарождения и до 4 сентября, а также с 10 и до 12 сентября ураган Катя находился в зоне обзора спутника Meteosat-9 (см. рис. 1). Информация с радиометра SEVIRI с временным интервалом 15 мин поступала в НПО «Тайфун» из НИЦ «Планета», заносилась в базу данных и использовалась в дальнейшем для расчета динамических характеристик атмосферы в зоне действия урагана.

Внетропический циклон Ксинтия (Xynthia) явился результатом развития системы низкого давления, которая сформировалась к югу от Азорских островов 26 февраля 2010 г. Перемещаясь на северо-восток, шторм 27 февраля прошел над Португалией, северо-западом Испании, Бискайским заливом и подошел к западным районам Франции, достигнув максимального развития 28 февраля в 00:00 UTC с приземным давлением в центре 967 гПа.

Траектория циклона Ксинтия была весьма необычной. В большинстве случаев такие штормы развиваются в Атлантике севернее и затем двигаются в восточном направлении по западной и центральной Европе. Шторм Ксинтия затронул Португалию, Испанию, Швейцарию, Францию, юго-восточную часть Англии, Бельгию, Нидерланды, Люксембург, Германию и Австрию, причинил значительный ущерб по маршруту движения, привел к отключению электрической энергии, наводнению на Атлантическом побережье Франции и гибели более 60 человек. Наибольшие разрушения были во Франции и Западной Германии. Согласно сообщениям Службы погоды Германии (DWD), порывы ветра были максимальны (более 200 км/ч) в его юго-восточном секторе особенно после прохождения холодного фронта (<http://www.dwd.de/>).

Всё время своего существования внетропический циклон Ксинтия находился в зоне обзора спутника Meteosat-9. Информация с радиометра SEVIRI с временным интервалом 15 мин также как и в случае ТЦ Катя поступала в НПО «Тайфун» из НИЦ «Планета».

Расчеты динамических характеристик в зоне действия обоих циклонов проводились на сетках с пространственным шагом 2–5 пикселей (приблизительно 6–15 км в подспутниковой точке) в области с радиусом 10 град от центров циклонов. Такой шаг по пространству был необходим для построения карт соответствующих физических величин. Строились и анализировались карты полей модуля горизонтальной скорости ветра ( $|V|$ ), коэффициента мезомасштабной турбулентной диффузии ( $K_d$ ) и завихренности ( $rotV$ ), векторов скорости горизонтального ветра ( $V$ ). Не проводя детальной привязки рассчитанных полей по высоте (в силу отсутствия у нас данных аэрологического зондирования атмосферы за указанные сроки), отметим, что данные канала 6.2 мкм позволяют получать динамические характеристики в верхней тропосфере (в слое с давлением  $200 \text{ гПа} \leq p \leq 400 \text{ гПа}$ ), а канала 0.8 мкм — на уровне верхней границы облаков, как правила в среднем ( $400 \text{ гПа} < p \leq 700 \text{ гПа}$ ) или нижнем ( $700 \text{ гПа} < p \leq 1000 \text{ гПа}$ ) слоях атмосферы (Нерушев, Крамчанинова, 2011).

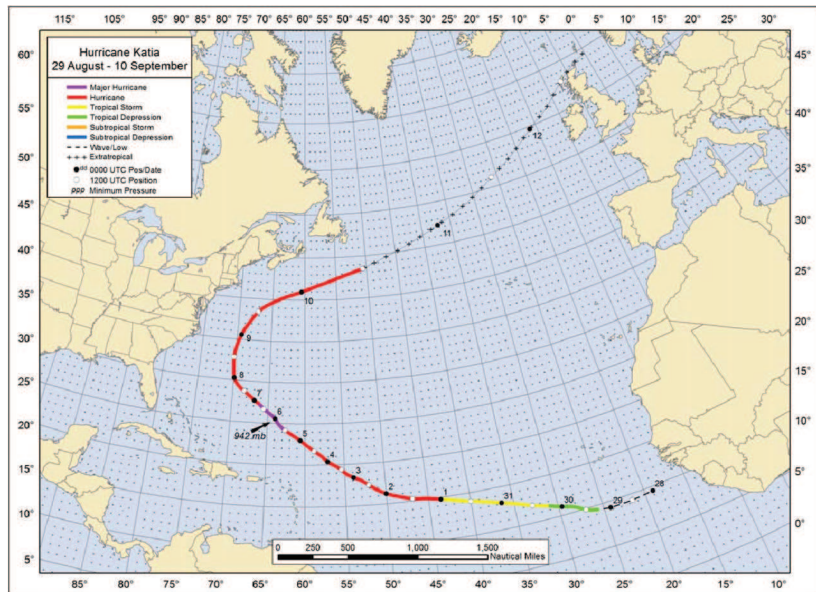


Рис. 1. Траектория движения тропического циклона Катя с указанием стадии развития по данным (<http://www.nhc.noaa.gov/>)

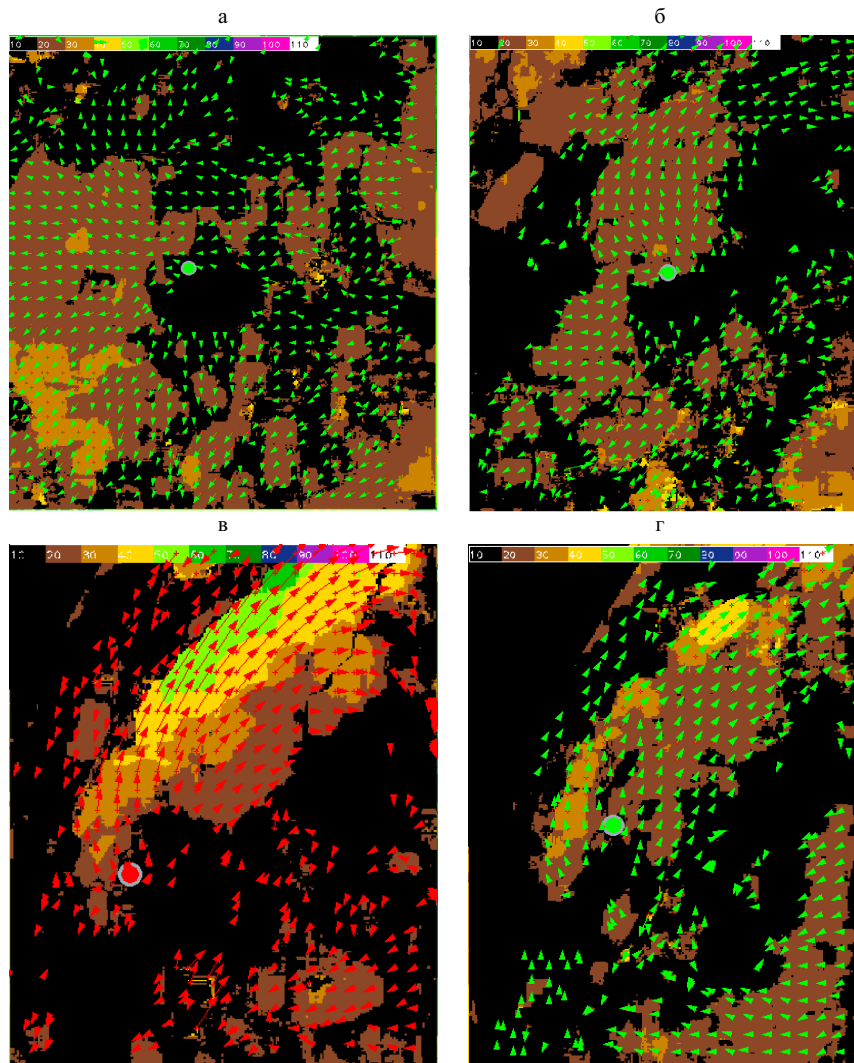


Рис. 2. Карты модуля скорости ветра ( $|V|$ ) в окрестности ТЦ за 12:00 UTC 29 августа (а, стадия тропической депрессии), 31 августа (б, стадия тропического шторма), 2(в) и 3(г) сентября (стадии урагана). Цветовой масштаб скорости ветра в м/с указан в левом верхнем углу каждой карты. Центр ТЦ отмечен кружком

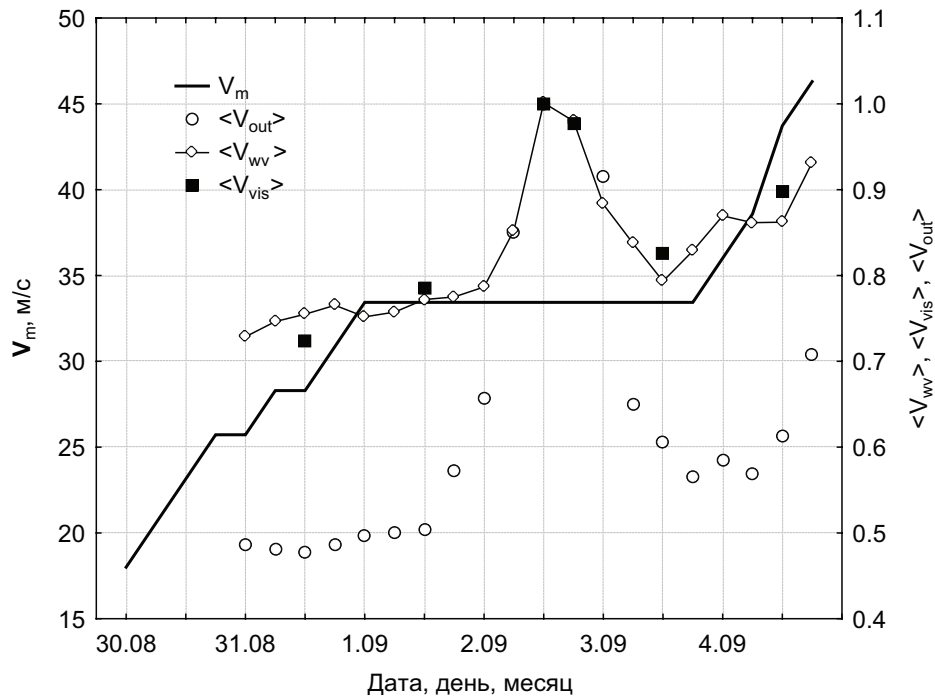


Рис. 3. Временной ход средних нормированных значений модуля скорости ветра в зоне с радиусом 10 град от центра ТЦ по данным каналов 6.2 мкм ( $\langle V_{wv} \rangle$ ), 0.8 мкм ( $\langle V_{vis} \rangle$ ) и в области оттока ( $\langle V_{out} \rangle$ , канал 6.2 мкм).  $V_m$  – максимальная скорость приводного ветра согласно (<http://www.nhc.noaa.gov/>)

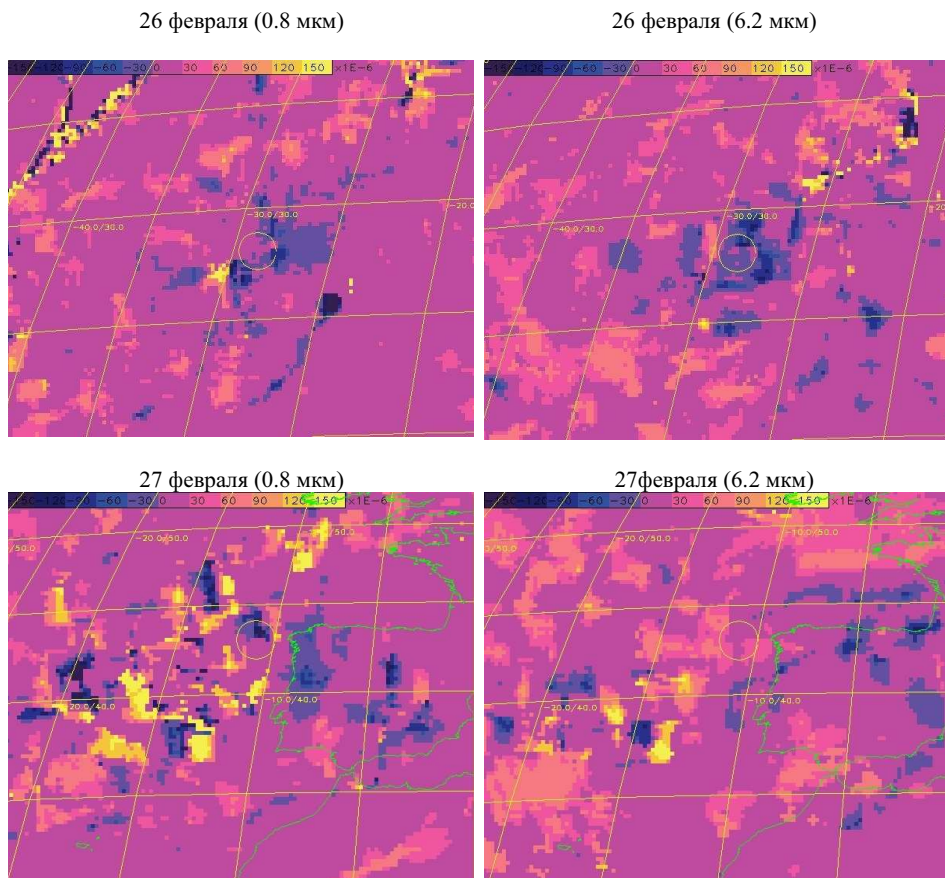


Рис. 4. Карты поля завихренности ( $rotV$ ) для внетропического циклона Ксинтия по данным каналов 6.2 мкм и 0.8 мкм за 26 и 27 февраля. Цветовой масштаб завихренности в единицах  $\times 10^6$  с-1 указан в левом верхнем углу каждой карты. Центр циклона отмечен окружностью

## Результаты расчетов динамических характеристик и обсуждение

Анализ результатов расчета полей скорости горизонтального ветра  $V$  в верхней тропосфере (канал 6.2 мкм) в зоне с радиусом  $\approx 10$  град от центра ТЦ Катя показал, что по мере интенсификации ТЦ формировалась одна мощная область оттока в северном, северо-восточном направлении. При этом ее параметры (площадь и средняя скорость ветра) за время нахождения ТЦ в зоне обзора спутника менялись не монотонно. На рис. 2 представлены карты модуля скорости ветра ( $|V|$ ) в окрестности ТЦ за 12:00 UTC 29 августа (стадия тропической депрессии), 31 августа (стадия тропического шторма), 2 и 3 сентября (стадии урагана) с нанесенными векторами горизонтальной скорости ветра. Отчетливо прослеживается эволюция поля ветра и область оттока в верхней тропосфере, экстремальные параметры которой отмечаются 2 сентября.

Следует отметить, что области оттока в северном и южном направлениях в верхней тропосфере (канал 6.2 мкм) прослеживаются уже на стадии тропической депрессии, затем по мере интенсификации ТЦ остается одна мощная область оттока. По данным канала в видимом диапазоне длин волн (канал 0.8 мкм) область оттока в северном, северо-восточном направлении появляется только на стадии урагана 2 сентября, а на стадиях тропической депрессии и тропического шторма отмечается мощный приток с северо-востока и юга.

На рис. 3 показан временной ход средних нормированных значений модуля скорости ветра в зоне с радиусом  $\approx 10$  град от центра ТЦ по данным каналов 6.2 мкм ( $\langle V_{\text{wv}} \rangle$ ) и 0.8 мкм ( $\langle V_{\text{vis}} \rangle$ ) и в области оттока ( $\langle V_{\text{out}} \rangle$ , канал 6.2 мкм). Максимальные значения, на которые проводилась нормировка средних по площади величин модуля скорости ветра, равны соответственно  $\langle V_{\text{wv}} \rangle_m = 16.4$  м/с,  $\langle V_{\text{vis}} \rangle = 15.1$  м/с,  $\langle V_{\text{out}} \rangle_m = 27.4$  м/с. Здесь же для сравнения по данным (<http://www.nhc.noaa.gov/>) нанесены значения максимальной скорости приводного ветра ( $V_m$ ), характеризующей интенсивность ТЦ. Видно, что зависимость  $\langle V_{\text{wv}} \rangle$ ,  $\langle V_{\text{vis}} \rangle$  и  $\langle V_{\text{out}} \rangle$  от времени имеет четко выраженный немонотонный характер, достигая максимальных значений 2 сентября в 12:00 UTC. Этот локальный максимум приходится на время, когда интенсивность ТЦ, достигшего стадии урагана, не изменялась в течение 66 час (см. рис. 3). Через 30 час после появления указанных локальных максимумов началась стремительная интенсификация ТЦ до стадии суперурагана ( $V_m \geq 50$  м/с). Это еще раз подчеркивает отмеченную еще в работе (Риль, 1984) важность динамических характеристик в верхней тропосфере для процессов тропического циклогенеза. К сожалению, по данным зондирования, начиная с 00:00 UTC 5 сентября, не представляется возможным проводить расчеты поля ветра, поскольку ТЦ находился на краю зоны видимости Земли с геостационарного спутника. Отметим, что выявленный немонотонный характер временной зависимости  $\langle V_{\text{wv}} \rangle$ ,  $\langle V_{\text{vis}} \rangle$  и  $\langle V_{\text{out}} \rangle$  и возможная их связь с интенсификацией ТЦ требуют проверки на других ТЦ. К сожалению, мы не располагаем в настоящее время подходящими данными для такой проверки, но надеемся, что в ближайшее время такая возможность представится.

На стадии внетропического циклона, начиная с 12:00 UTC 10 сентября, когда интенсивность циклона согласно (<http://www.nhc.noaa.gov/>) была еще достаточно высока ( $30 \text{ м/с} \leq V_m \leq 38 \text{ м/с}$ )  $\langle V_{\text{wv}} \rangle$  более чем в 2 раза превосходила  $\langle V_{\text{wv}} \rangle$  в урагане, достигая 40 м/с. При этом максимальная скорость ветра в этой области ( $V_{\text{wv}})_m$  превышала значение 70 м/с, что также заметно выше ( $V_{\text{wv}})_m$  в этой области на стадии урагана.

Аналогичные скорости ветра по данным расчетов наблюдались и в сильном внетропическом шторме Ксинтия 27 февраля 2010 г., когда циклон практически достиг максимальной интенсивности (давление в центре  $p \approx 969$  гПа). Согласно расчетам скорость ветра в верхней тропосфере в центральной части циклона, над северо-западом Пиренейского полуострова, Бискайским заливом и северо-западом Франции достигала значений 70 м/с (252 км/ч) и выше. В то же время на более низких атмосферных уровнях (канал 0.8 мкм) скорость ветра практически над всеми указанными территориями находилась в пределах 35–49 м/с (126–176 км/ч).

Такой ситуации не наблюдается 26 февраля, когда циклон еще не достиг зрелой стадии ( $p \approx 994$  гПа). Таким образом можно заключить, что на стадии максимального развития скорость ветра во внетропических циклонах возрастала с высотой. Подтверждением этому могут служить данные метеослужбы Франции (<http://france.meteofrance.com/france/actu/>), указывающие на то, что максимальные скорости ветра были зарегистрированы в ночь с 27 на 28 февраля 2010 г. на высотных метеостанциях: 238 км/ч – на высоте 2877 м и 209 км/ч – на высоте 1415 м, в то время как на равнинных метеостанциях скорость ветра не превышала 160 км/ч.

Анализ расчетов для разных моментов времени, отличающихся на несколько часов, позволил выявить заметную инерцию поля ветра. На достаточно большой площади ветер в верхней тропосфере внетропических циклонов меняется не значительно как по величине, так и по направлению. Это обстоятельство может быть использовано для целей наукастинга – сверхкраткосрочного прогноза поля скорости ветра на основе данных спутниковых измерений.

Важное значение для диагноза и прогноза эволюции циклона имеет поле завихренности. На рис. 4 представлены рассчитанные поля завихренности для циклона Ксинтия по данным каналов 6.2 мкм и 0.8 мкм за 26 и 27 февраля. На стадии максимального развития циклона (27 февраля) можно видеть заметные отличия в полях завихренности на разных атмосферных уровнях. Если в верхней тропосфере в центре циклона и в области с радиусом  $\sim 3$  град отмечается нулевая или слабая антициклоническая завихренность, то в среднем и нижнем слоях в центре циклона наблюдается циклоническая завихренность, а на расстояниях  $\sim 3$  град в западном и юго-западном направлениях наблюдаются области с повышенной антициклонической завихренностью ( $\text{rot}V \leq 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ).

Заметные изменения в процессе эволюции циклона Ксинтия претерпевает поле  $K_d$ . На ранней стадии развития циклона поля  $K_d$  в верхней тропосфере и на уровне верхней границы облаков различаются слабо, при этом в большей части области значения  $K_d$  не превосходят величины  $3 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}$ . На стадии максимального развития различия весьма заметны. На более низких уровнях в зоне облаков (канал 0.8 мкм) значения  $K_d$  существенно выше, чем в верхней тропосфере.

## Заключение

Построение карт динамических характеристик атмосферы в зонах действия циклонов тропических и умеренных широт на основе данных многоволнового дистанционного зондирования с европейского геостационарного метеорологического спутника Meteosat-9 и применения разработанных авторами метода и программных средств позволило выявить ряд особенностей этих характеристик. Главными из них являются: а) четко выраженный немонотонный характер временной зависимости средних значений модуля скорости ветра в верхней тропосфере в зоне с радиусом 10 град от центра ТЦ и в области оттока с максимумом за 30 часов до резкой интенсификации ТЦ; б) заметная инерция поля горизонтальной скорости ветра в верхней тропосфере во внетропическом циклоне на временных масштабах в несколько (до 10) часов, что может быть использовано для целей сверхкраткосрочного прогноза скорости ветра на основе данных спутниковых измерений.

## Литература

1. *Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К.* Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // Исследование Земли из космоса. 2011. № 1. С. 3-13.

2. *Риль Г.* Климат и погода в тропиках: Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 605 с.
3. *Шарков Е.А.* Спутниковые исследования тропического циклогенеза: особенности и достижения современного этапа // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 29-48.
4. *Menzel W.P.* Cloud tracking with satellite imagery: From the pioneering work of Ted Fujita to the present // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2001. Vol. 82. P. 33–47.
5. *Soden B.J., Velden C.S., Tuleya R.E.* The impact of satellite winds on experimental GFDL hurricane model forecasts // Mon. Wea. Rev. 2001. Vol. 129. P. 835-852.

## **Dynamic Characteristics of Cyclones of Tropical and Moderate Latitudes Inferred from the Satellite Data**

**A.F. Nerushev, A.E. Barkhatov**

*Research and Production Association “Typhoon”  
4 Pobedy Street, 249038, Obninsk, Kaluga Region, Russia  
E-mail: nerushev@typhoon.obninsk.ru*

Presented are the calculation results of the fields of the atmospheric dynamic characteristics (horizontal wind speed, coefficient of mesoscale turbulent diffusion, vorticity) in the zones of action of tropical cyclone Katia (August-September 2011) and extra-tropical cyclone Xynthia (February 2010) determined at different stages of their development. For the calculations the data of multi-wave atmospheric sounding by the radiometer SEVIRI of the European geostationary satellite Meteosat-9 with the temporal resolution of 15 min were used. The peculiarities of the above-mentioned characteristics at different stages of cyclone development (including the transformation of the tropical cyclone into the extra-tropical one) were revealed.

**Key words:** cyclones of tropical and extra-tropical latitudes, remote sensing, geostationary satellites, dynamic characteristics of the atmosphere.