

Динамические характеристики атмосферы в зонах действия тропических циклонов по данным многоволнового зондирования с геостационарных спутников

А.Ф. Нерушев¹, Е.К. Крамчанинова²

¹Научно производственное объединение «Тайфун» Росгидромета
249038 Обнинск, Победы, 4

E-mail: nerushev@typhoon.obninsk.ru

²Научно исследовательский центр «Планета» Росгидромета
123242 Москва, Б. Предтеченский пер., 7
E-mail: alexpr11@yandex.ru

На основе данных зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников Meteosat-8 и Meteosat-9 рассчитаны динамические характеристики средней, верхней тропосферы и нижней стратосферы (вектор горизонтальной скорости ветра \bar{V} , коэффициент горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии K_d , и завихренность $\text{rot}V$) в зонах зарождения и развития тропических циклонов Атлантики. Расчеты выполнены по разработанному авторами методу, основанному на использовании в качестве трассеров неоднородностей поля концентрации консервативной примеси (водяной пар и озон) и применении корреляционно-экстремальных алгоритмов. Проанализирована эволюция указанных динамических характеристик в процессе зарождения и развития тропического циклона Bertha (2008). Построены поля динамических характеристик верхней тропосферы для модели композиционного циклона на стадиях тропической депрессии, тропического шторма и урагана.

Ключевые слова: тропические циклоны, дистанционное зондирование, геостационарные спутники, динамические характеристики, верхняя тропосфера, нижняя стратосфера

Введение

Поля динамических характеристик атмосферы играют важнейшую роль в процессах образования, эволюции и перемещения тропических циклонов (ТЦ). Информация о поле ветра в зонах действия ТЦ получается различными методами, при этом наиболее эффективным является дистанционное зондирование атмосферы с космических платформ. Однако, если методы получения спутниковых ветров как для фоновых условий, так и в зонах действия ТЦ развиты достаточно хорошо (см., например, [1] и библиографию в ней), 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). Нами разработан метод, позволяющий по данным пассивного спутникового зондирования одновременно определять не только компонента вектора скорости ветра (\bar{V}), но также коэффициент горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии (K_d) и завихренность ($\text{rot}V$) на одном масштабе движения воздушной массы [2,3]. Метод основан на использовании в качестве трассеров неоднородностей поля концентрации консервативной примеси и применении корреляционно-

экстремальных алгоритмов. На примере обработки данных зондирования атмосферы радиометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников Meteosat-8 и Meteosat-9 в каналах водяного пара с центрами на 6.2 мкм и 7.3 мкм и сравнения результатов с данными независимых наблюдений и теоретическими моделями оценены точности расчета вектора горизонтальной скорости ветра \mathbf{V} и коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии K_d . Показано, что точность расчета \mathbf{V} разработанным методом практически совпадает с точностью широко используемых зарубежных методов. Среднеквадратическое отклонение расчетных значений модуля \mathbf{V} от данных радиозондов для всего видимого диска Земли в слое (250 - 500) гПа составляет приблизительно 8 м/с. Среднеквадратическое отклонение азимута \mathbf{V} находится в пределах 15 – 20 град [3].

Важной и не решенной до настоящего времени проблемой является определение по спутниковым данным поля ветра в стратосфере. В качестве трассера предполагается использовать атмосферных озон, который на высотах меньших 20-25 км можно считать консервативной примесью. Наличие озонового канала (9.7 мкм) в спектрометре SEVIRI позволяет получать информацию о поле общего содержания озона (ОСО) с высоким временным (15 мин) и пространственным (~ 3 км в подспутниковой точке) разрешением. Однако погрешности используемого в EUMETSAT алгоритма определения ОСО превосходят 10%. Авторами [4,5] разработан метод, основанный на использовании нейронных сетей в сочетании с привлечением дополнительной информации о трехмерном поле температуры атмосферы и температуре подстилающей поверхности, получаемой с полярноорбитальных спутников, позволяющий достичь существенно лучшей точности определения содержания озона - около 5%.

Расчеты для нескольких дней 2008 года по определенным таким способом значениям поля ОСО показали, что разработанный нами метод может быть применен для вычисления динамических характеристик не только тропосферы, но и нижней стратосферы. Рассчитанные по полю ОСО векторы скорости ветра лежат в области высот 100-20 гПа (~ 16 -25 км), что приблизительно соответствует высотам максимума вертикального профиля парциального давления озона в широтной области 0-55 град.

В настоящей статье этот метод применен для получения сведений о динамических характеристиках атмосферы в зонах действия тропических циклонов Атлантики на основе данных зондирования атмосферы спектрометром SEVIRI европейских геостационарных метеорологических спутников второго поколения Meteosat-8 и Meteosat-9. Основное внимание уделено полям коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии и завихренности.

Динамические характеристики атмосферы в зоне действия тропического циклона Bertha (3-20 июля 2008 г.)

Тропический циклон Bertha зародился вблизи островов Зеленого мыса. Развивающееся тропическое возмущение (L) 3 июля в 9:00 UTC было зарегистрировано как тропическая депрессия (TD), и в тот же день в 15:00 UTC достигло стадии тропического шторма (TS) со скоростью ветра 65 км/ч. В 9:00 UTC 7 июля был зафиксирован тропический ураган (H) с максимальной скоростью ветра 120 км/ч (<http://www.nhc.noaa.gov/>). Расчеты динамических характеристик атмосферы в зоне ТЦ Bertha были выполнены для 1 - 6 июля, когда он находился в зоне уверенного обзора спутника Meteosat-9. Использовались данные каналов водяного пара (6.2 и 7.3 мкм) и озона (9.7 мкм). Восстановление ОСО было выполнено А.В. Поляковым и Ю.М. Тимофеевым по оригинальной методике [4,5]. Восстановленные значения ОСО любезно предоставлены нам для расчетов динамических характеристик нижней стратосферы.

На рисунке 1 представлены рассчитанные векторы горизонтального ветра в тропосфере и нижней стратосфере в окрестности ТЦ на стадии тропической депрессии и тропического шторма. Ветер рассчитывался в узлах регулярной сетки 1.25° шир. \times 1.25° д. Наличие областей с пропусками обусловлено отсутствием подходящих для расчетов неоднородностей содержания водяного пара и ОСО. Траектория движения ТЦ на спутниковых снимках в видимой области спектра представлена сплошной кривой, точки – положения центра через каждые 3 часа. Звездочкой обозначен центр ТЦ для времени расчета поля ветра. Характерной особенностью приведенных полей скорости горизонтального ветра является присутствие мощного потока со скоростями 9 – 22 м/с, охватывающего среднюю, верхнюю тропосферу и нижнюю стратосферу, направленного на северо-восток от ТЦ. На стадии TD такой особенности не отмечается.

Другая особенность связана с пространственным распределением коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии K_d . На стадии TS в нижней стратосфере впереди тропического циклона наблюдаются зоны повышенной турбулентности с характерными размерами около 1000 км, локализованные вдоль будущей траектории тропического циклона. Значения K_d в этих зонах в 3-5 раз превышают средние значения, характерные для невозмущенных условий. В указанных зонах отмечаются области с высокой завихренностью положительного и отрицательного знака. В качестве иллюстрации сказанного на рисунке 2 приведены результаты расчетов пространственного распределения K_d и rotV для 14:30 UTC 5 июля 2008 г. в нижней стратосфере по восстановленным значениям ОСО. Указанные особенности свидетельствуют, на наш взгляд, о проявлении возмущающего влияния циркуляционных систем тропического циклона в тропосфере на

динамические характеристики нижней стратосферы. При этом локализация особенностей K_d и rotV вдоль будущей траектории ТЦ может рассматриваться как вероятный потенциальный прогностический признак направления его движения.

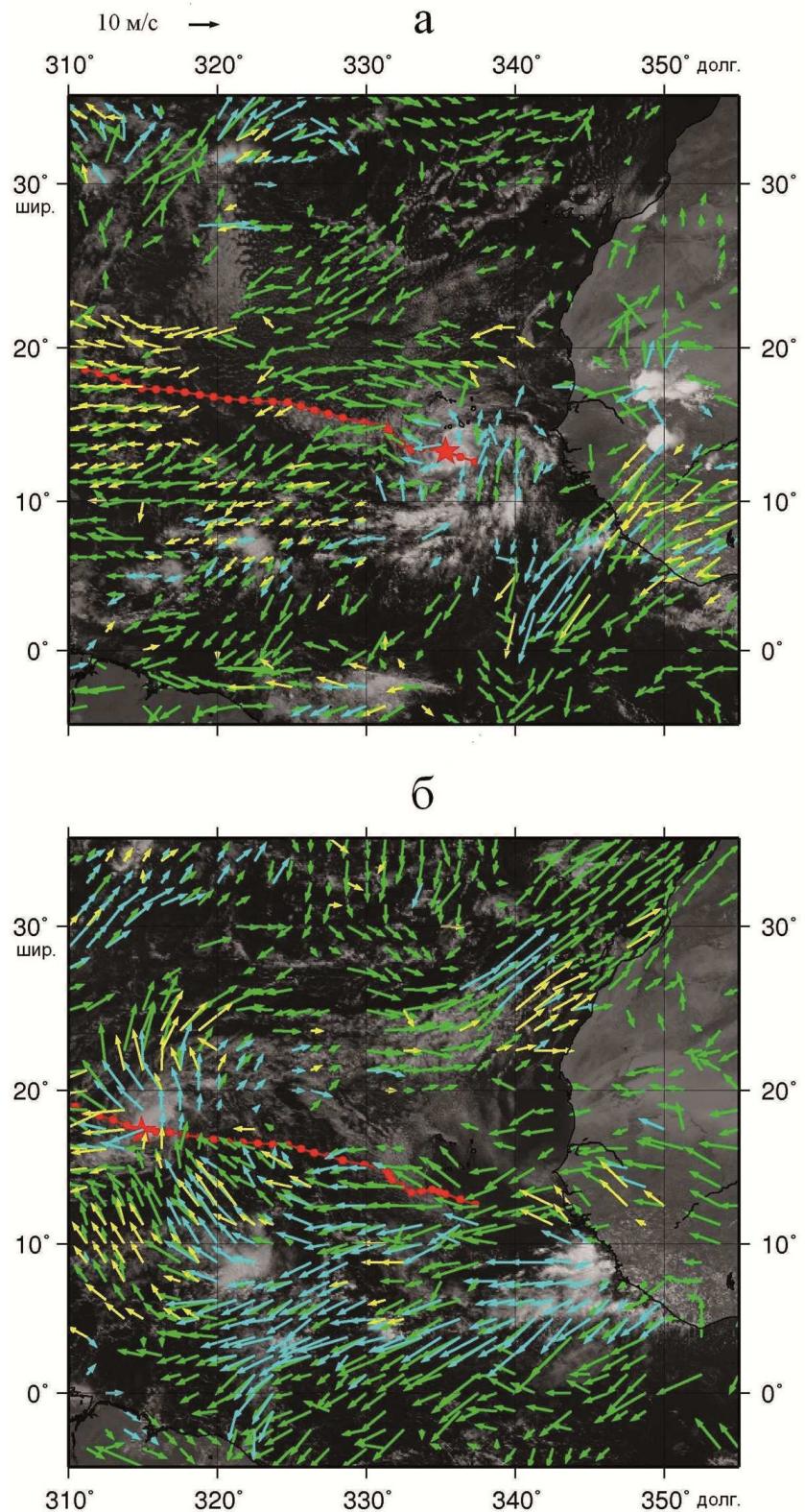


Рис.1. Поля вектора горизонтальной скорости ветра в средней (зеленый), верхней (голубой) тропосфере и нижней стратосфере (желтый) в зоне действия ТЦ Bertha на стадии тропической депрессии 3.07.2008 г. в 12:00 UTC (а) и тропического шторма 6.07.2008 г. в 12:00 UTC (б). Красная кривая – траектория ТЦ, звездочка – положение его центра

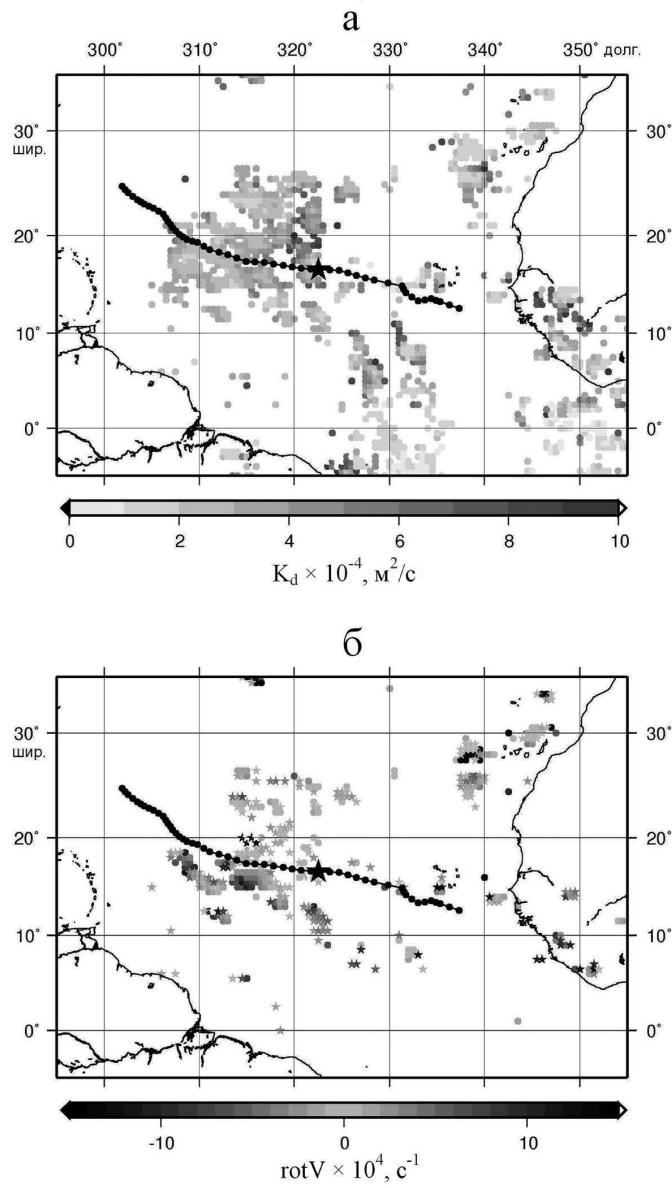


Рис.2. Поля коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии (а) и завихренности (б) в нижней стратосфере на стадии тропического шторма 5.07.2008 г. в 14:30 UTC. Кружок – $\text{rot}V < 0$ (циклоническая циркуляция), звездочка – $\text{rot}V > 0$. Большая звездочка на траектории – положение центра ТЦ

Результаты расчетов K_d в тропосфере и нижней стратосфере позволяют проследить его высотную зависимость. Как известно [2, 3], расчеты по данным радиометра SEVIRI в 6.2 мкм канале водяного пара дают информацию о динамических характеристиках верхней тропосферы (атмосферный слой с давлением 350 ± 150 гПа), по данным канала 7.3 мкм – средней тропосферы (500 ± 150 гПа), по данным ОСО – нижней стратосферы (область высот приблизительно 16-25 км, как указано выше). На рисунке 3 представлены гистограммы распределения по величине K_d , рассчитанные по областям размером 10^0 ш. \times 10^0 д. вокруг тропического циклона на разных стадиях его развития от тропического возмущения (L) до тропического шторма. Характер распределения K_d в средней и верхней тропосфере в целом одинаков и слабо различим для разных стадий развития

ТЦ. Для нижней стратосферы распределение K_d смещено в сторону меньших значений и в большей степени проявляется различие для разных стадий развития ТЦ. Средние значения коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии $(K_d)_m$, рассчитанные на основе полученных гистограмм для всех стадий развития ТЦ, равны:

$$(K_d)_m = (4.8 \pm 2.9) \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с} - \text{в средней тропосфере},$$

$$(K_d)_m = (5.3 \pm 3.2) \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с} - \text{в верхней тропосфере},$$

$$(K_d)_m = (3.6 \pm 1.8) \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с} - \text{в нижней стратосфере}.$$

Как видно, характер высотной зависимости $(K_d)_m$ соответствует известному представлению о возрастании K_d в тропосфере и убывании в стратосфере [6].

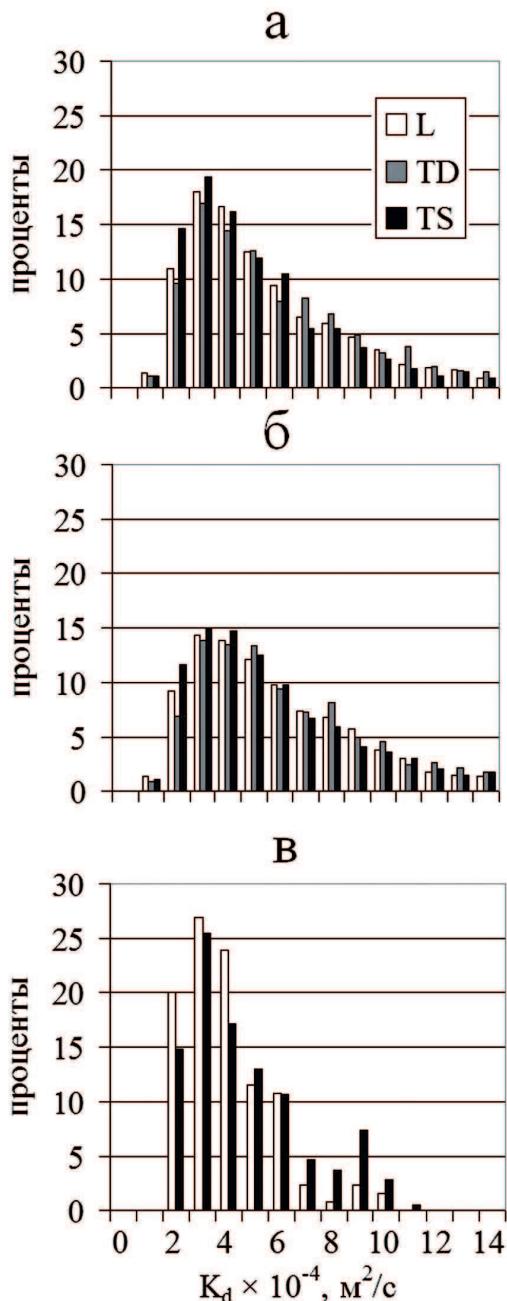


Рис.3. Гистограммы распределения по величине коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии в средней (а), верхней (б) тропосфере и нижней стратосфере (в) в зоне действия ТЦ Bertha на стадии тропического возмущения (L), шторма (TS) и урагана (H)

Динамические характеристики верхней тропосферы для модели композиционного циклона

Для построения композиционной картины пространственного распределения K_d и rotV в зоне действия ТЦ использовались данные зондирования спектрометром SEVIRI семи ТЦ Атлантики сезонов 2006-2009 гг., попавших в зону обзора спутника Meteosat-9. Расчеты выполнялись для областей, размерами 15^0 ш. \times 15^0 д. и 30^0 ш. \times 30^0 д. вокруг центра ТЦ по данным канала 6.2 мкм. На рисунке 4 представлена пространственная структура K_d и rotV в верхней тропосфере для каждой стадии развития ТЦ (TD, TS и H) в системе координат, связанной с направлением движения ТЦ (размер расчетной области 15^0 ш. \times 15^0 д.). Центр ТЦ помещен в точку (0,0), направление движения – на север. В соответствии с принятыми в метеорологии обозначениями положительная завихренность ($\text{rotV} > 0$) означает циклоническую циркуляцию (против часовой стрелки), отрицательная завихренность – антициклоническую циркуляцию.

Поскольку времена жизни каждой стадии ТЦ различны, количество случаев, по которым получена указанная картина, заметно отличаются. Наиболее обеспечена данными стадия TS (18 случаев), наименее – TD и H (по 6 случаев). Характерной особенностью поля rotV , в наибольшей степени выраженной для TD и TS, является наличие областей с положительной и отрицательной завихренностью по обе стороны от направления движения ТЦ. Для всех стадий ТЦ характерно присутствие зон повышенной турбулентности в области с радиусом приблизительно 4^0 вокруг центра ТЦ, со значениями K_d , в 1.5 - 3 раза превышающими его значение на периферии. Для стадий TS и H эти зоны расположены преимущественно в левой полуплоскости относительно направления движения ТЦ (более отчетливо это видно на пространственной структуре K_d для области размером 30^0 ш. \times 30^0 д.). Наличие таких зон связано, по-видимому, как с турбулентностью в облачных образованиях, так и с влиянием струйных течений, как элементов мезомасштабной структуры ТЦ.

Гистограммы распределения по величине K_d и rotV для модели композиционного ТЦ для каждой стадии его развития, полученные по области 15^0 ш. \times 15^0 д. с числом расчетных точек 441, представлены на рисунке 5. Отмечается заметно большая величина максимума распределения K_d для стадии TS по сравнению с TD и H и смещение его вправо. Средние значения K_d для всех стадий развития ТЦ близки по величине и равны $(9.4 \pm 3.8) \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ для TD, $(9.6 \pm 2.5) \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ для TS и $(9.2 \pm 4.0) \times 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$ для H. Для области размером 30^0 ш. \times 30^0 д. средние величины K_d приблизительно на 20% меньше, что связано с вкладом невозмущенных фоновых значений K_d .

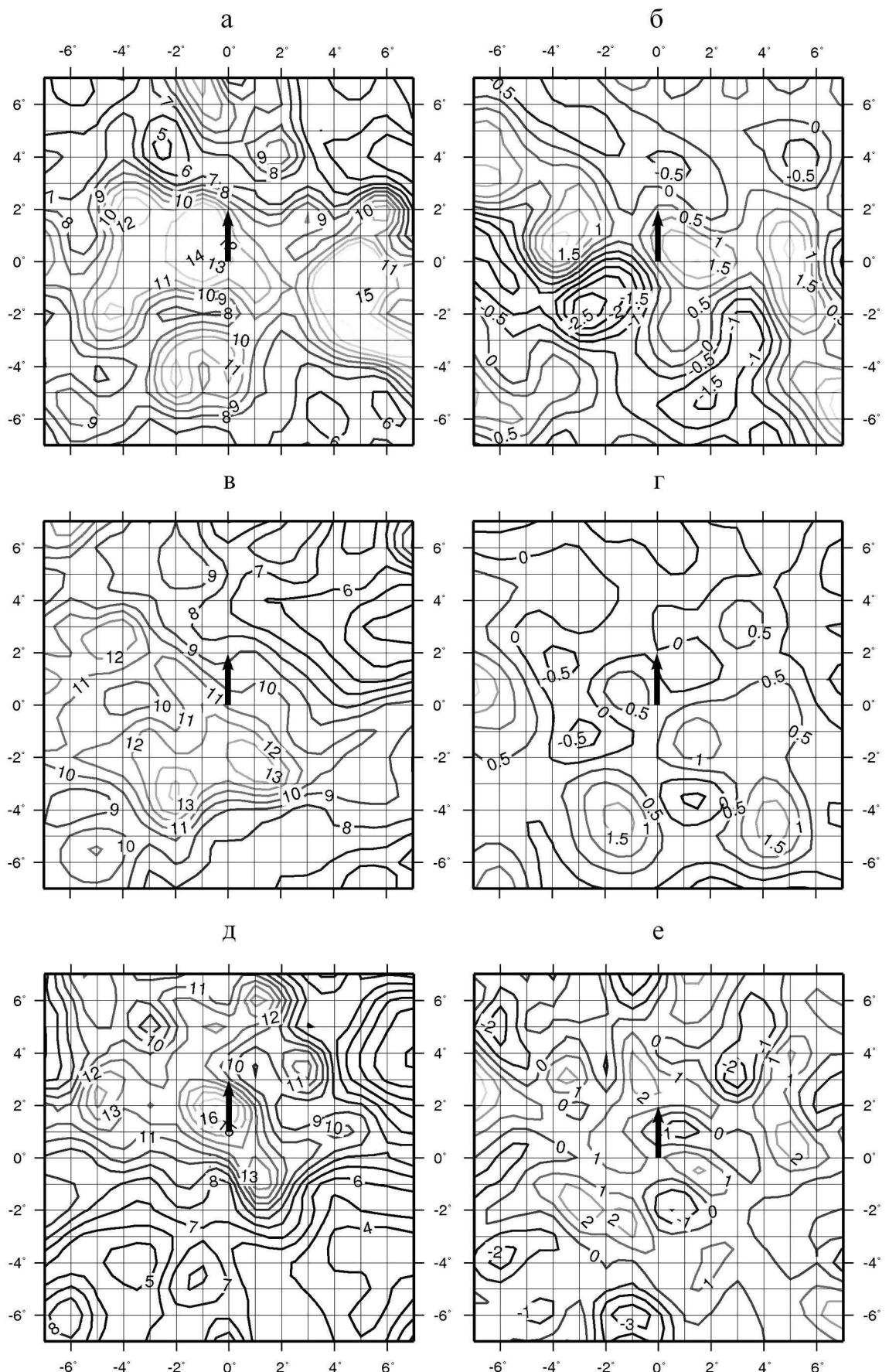


Рис.4. Пространственное распределение коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии (*а, в, д*, изолинии $K_d \times 10^{-4}$ в $\text{м}^2/\text{с}$) и завихренности (*б, г, е*, изолинии $\text{rot}V \times 10^4$ в с^{-1}) для модели композиционного тропического циклона Атлантики на стадии тропической депрессии (*а, б*), тропического шторма (*в, г*) и урагана (*д, е*). Стрелка указывает направление движения ТЦ

Для распределения rotV также характерны большие величины на стадии TS и некоторое смещение максимума в сторону положительных значений. Средние по всей области значения rotV для всех стадий ТЦ малы по величине ($(0.2 - 0.3) \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$), но положительны, что свидетельствует о преобладании циклонической циркуляции в рассматриваемой области. Заметим, что пространственное распределение мезомасштабной завихренности в зоне действия ТЦ весьма сложно и, как следует из рисунка 4, в отдельных областях значения $|\text{rotV}|$ могут более чем на порядок превосходить указанные средние величины.

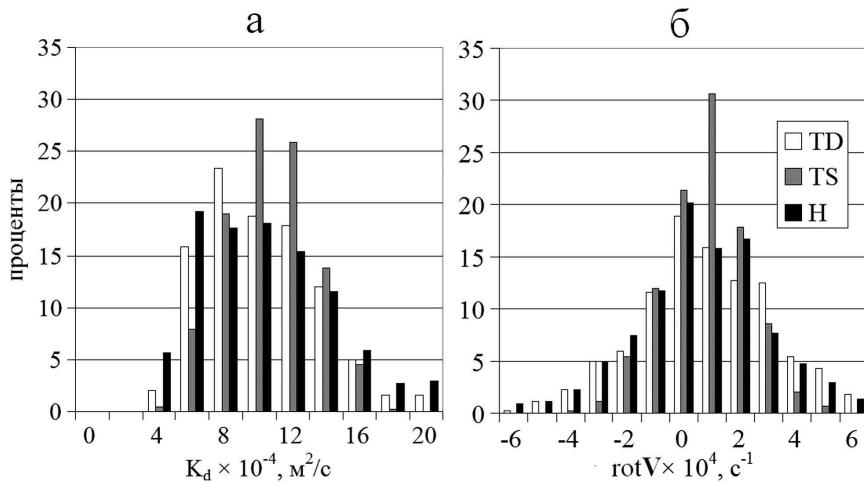


Рис.5. Гистограммы распределения по величине коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии (а) и завихренности (б) для модели композиционного тропического циклона Атлантики на стадии тропической депрессии (TD), тропического шторма (TS) и урагана (H)

Заключение

Сформулируем в заключении основные результаты работы.

1. Рассчитаны и проанализированы поля динамических характеристик средней, верхней тропосферы и нижней стратосферы в процессе эволюции тропического циклона Атлантики Bertha (2008). При этом впервые выполнены расчеты полей динамических характеристик нижней стратосферы по восстановленным на основе спутниковых данных значениям общего содержания озона.
2. Выявлены особенности пространственного распределения коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии и мезомасштабной завихренности в нижней стратосфере относительно траектории движения тропического циклона.
3. На основе обработки данных зондирования спектрометром SEVIRI семи ТЦ Атлантики сезонов 2006-2009 годов построено и проанализировано пространственное распределение коэффициента горизонтальной мезомасштабной турбулентной диффузии и мезомасштабной завихренности в верхней тропосфере для модели композиционного циклона. Выявлены зоны повышенной турбулентности и высоких значений завихренности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (код проекта 08-05-00885)

Литература

1. *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, No. 1. p.33-47.
2. *Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К., Соловьев В.И.* Определение характеристик атмосферных движений по данным многоволнового зондирования из космоса // Известия РАН, ФАО. 2007. Т. 3. № 4. С. 442-450.
3. *Нерушев А.Ф., Крамчанинова Е.К.* Метод определения характеристик атмосферных движений по данным измерений метеорологических геостационарных спутников // Исследование Земли из космоса. 2010 (в печати).
4. *Поляков А.В., Тимофеев Ю.М.* Определение общего содержания озона с геостационарных спутников // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 6. С. 804-811.
5. *Поляков А.В., Ю.М. Тимофеев* Усовершенствованная методика определения общего содержания озона с помощью аппаратуры SEVIRI на геостационарных спутниках METEOSAT // Исследования Земли из Космоса. 2010 (в печати).
6. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеоиздат. 1991. 509 с.

Atmospheric Dynamic Characteristics in the Zones of Tropical Cyclone Action Determined on the Basis of Multiwave Sounding Data Obtained from Geostationary Satellites

A.F. Nerushev¹, E.K. Kramchaninova²

¹*Research and Production Association “Typhoon”, Roshydromet
4 Pobedy Street, Obninsk, Kaluga Region, 249038, Russia
E-mail: nerushev@typhoon.obninsk.ru*

²*Scientific Research Center “Planeta”, Roshydromet
7 Bolshoy Predtechensky Street, Moscow, 123242, Russia
E-mail: alexpr11@yandex.ru*

Based on the atmospheric remote sounding data obtained by the radiometer SEVIRI of the European geostationary meteorological satellites Meteosat-8 and Meteosat-9 calculated were the dynamic characteristics of the middle and upper troposphere and the lower stratosphere (the horizontal wind speed vector, V, the coefficient of horizontal mesoscale turbulent diffusion, Kd, and vorticity, rotV) in the zones of tropical cyclones origination and development in the Atlantic. The calculations were made with the method developed by the authors. It is based on the use of heterogeneities of a conservative impurity concentration field (water vapor and ozone) as tracers and the correlation-extreme algorithms. The evolution of the dynamic characteristics in the process of tropical cyclone Bertha (2008) generation and development has been analyzed. The fields of dynamic characteristics of the upper troposphere were constructed for the model of a composite cyclone at the stages of a tropical depression, a tropical storm and a hurricane.

Keywords: tropical cyclones, remote sensing, geostationary satellites, dynamic characteristics, upper troposphere, lower stratosphere