

**РАСЧЕТ НА МЕЗОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЯХ
АТМОСФЕРЫ ETA И WRF (NMM)
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРОПИЧЕСКИХ
ЦИКЛОНОВ С ПОЛЯРНЫМИ ФРОНТАМИ
И СТРУЙНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ**

А.Э. Похил, Е.С. Глебова, А.В. Смирнов

*Гидрометеорологический научно-исследовательский
центр Российской Федерации*

AEPokhil@yandex.ru, ek.glebova@gmail.com, alexandrvs@mail.ru

Введение

В работах авторов [5–7] был исследован механизм взаимодействия пары тропических циклонов (ТЦ), имеющих различные интенсивности; рассматривались случаи тройственного взаимодействия пары ТЦ и полярного фронта; трансформации и регенерации ТЦ вследствие вхождения в область холодного фронта. Были предложены варианты объяснения исчезновения и появления вихрей, а также петель, зигзагов и крутых поворотов при их перемещении. В настоящей работе исследуются случаи необычного поведения тропических циклонов и взаимодействия их с ближайшей окружающей их областью атмосферы.

Известно, что главный дирижер атмосферных движений – это циркуляция на изобарических поверхностях 500–700 гПа. Однако верхние слои атмосферы также оказывают существенное влияние на эволюцию и перемещение атмосферных вихрей, таких, как тропические циклоны.

Впервые отметил связь между возникновением ТЦ и восточным струйным течением (СТ) и высказал предположение об аналогичности роли струйных течений в циклогенезе внетропических и тропических

широт Р.Ф. Бурлуцкий [1]. В работах В.Д. Бохана, А.К. Виприцкой, З.И. Черновой [2, 3] сделано предположение о том, что фактором, обуславливающим возникновение струйного течения, является ТЦ. В результате проведенного анализа было выяснено, что любой ТЦ сопровождается возникновением струйного течения и что каждый тропический циклон в северо-западной части тропической зоны Тихого океана генерирует СТ в ней. После исчезновения вихря уменьшается и скорость струйного течения.

В данной статье обсуждаются результаты исследования эволюции серии тропических циклонов Тихого океана: Парма, Мелор, Лупит при взаимодействии их с полярными фронтами и струйными течениями. Результатом стало понимание процессов, происходящих при взаимодействии вихрей с окружающими атмосферными структурами. Траектории исследуемых ТЦ представлены на рис. 1.

Описание мезомасштабных моделей атмосферы ETA и WRF (NMM)

Расчеты проводились на мезомасштабных численных моделях атмосферы ETA [8] и WRF (NMM) [10], которые были адаптированы к северо-западной части Тихого океана. Размер расчетных областей составлял $40^\circ \times 40^\circ$. Модель ETA, описанная в [7, 8], интегрировалась с пространственным шагом 22 км и шагом по времени 90 секунд. В качестве начальных данных и граничных условий использовались поля анализа NCEP с пространственным разрешением 1° . Для визуализации рассчитанных полей метеорологических величин и анализа их изменения использовался графический пакет GrADS.

WRF (Weather Research and Forecasting Model) – численная модель предсказания погоды, которая подходит как для прогнозирования состояния атмосферы, так и для научных исследований. Модель дает прогнозы с разрешением сетки от 13 до 3 км, позволяет получать прогнозы погоды с заблаговременностью до 7 суток с точностью до одного часа. В работе используется новое негидростатическое ядро WRF (NMM) версии 3.3 [10]. В качестве вертикальных координат используется смешанная сигма-изобарическая система, т.е. до уровня 400 гПа используются сигма-координаты, выше – изобарические уровни (всего 27). Количество рассчитываемых узлов WE=296, SN=444. Применены более

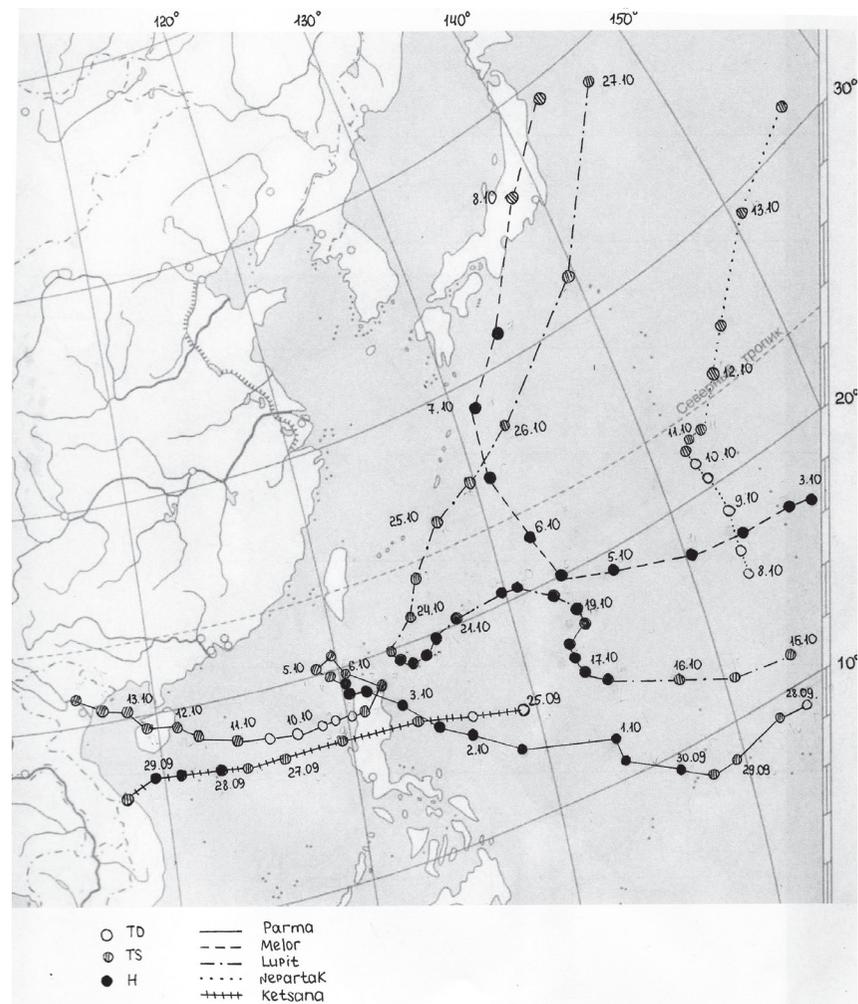


Рис. 1. Траектории тропических циклонов Парма, Мелор, Лупит.

совершенные модели адвекции динамических элементов и силы Кориолиса. Модель WRF (NMM) способна реалистично прогнозировать как мезомасштабные явления (тропические шторма), так и работать в глобальном режиме. В системе вывода обеспечивается возможность интерполяции переменных с модельных уровней на изобарические

поверхности или геометрические высоты. Предусмотрена также возможность представления выходной продукции в коде ГРИБ для ее распространения по линиям связи. Главный недостаток – модель потребляет огромное количество процессорного времени и спроектирована для запуска на суперкомпьютерах, что мешает ее использованию в региональных отделениях метеослужбы.

Посмотрим, что дали результаты расчетов по двум моделям.

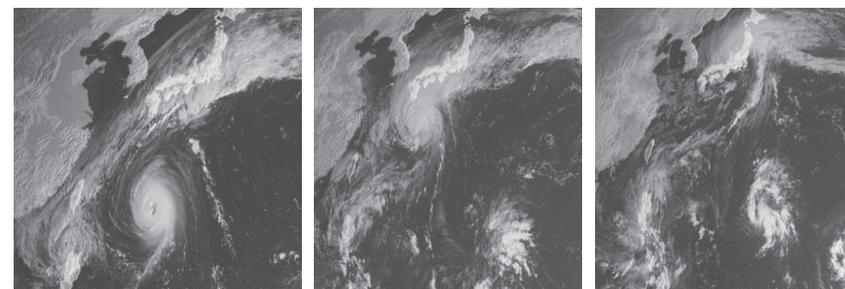
Анализ результатов расчетов траекторий и эволюции тропических циклонов Парма, Мелор

Рассмотрим случай поворота ТЦ Мелор (рис. 1). Циклон начал поворот 15 октября в 12 ч ВСВ на 20° с. ш. вначале на северо-запад, затем на север и далее круто на северо-восток (параболическая траектория). Попытаемся проследить причины и этапы этого поворота.

Известно, что полярно-фронтальное струйное течение связано с полярным фронтом и вместе с ним меняет свое положение. Высокие скорости ветра в верхней тропосфере обусловлены при этом температурным контрастом на фронте и связанным с ним увеличением барических градиентов и усилением ветра с высотой. Расчеты показали, что в период развития ТЦ Мелор над опустившимся довольно низко в южные широты полярным фронтом располагается мощное струйное течение (рис. 6). Наблюдая динамику струйного течения, авторы обнаружили хорошую корреляцию поведения струйного течения и ТЦ.

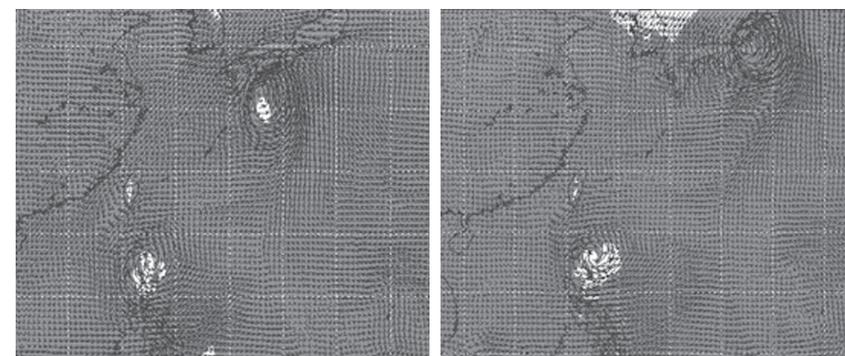
Интересно было проследить, каким образом происходит взаимодействие ТЦ с этими структурами. Трансформация облачных структур при эволюции и перемещении ТЦ показана на рис. 2. Эволюция полей температуры и ветра на 850 гПа представлена на рис. 3, полей кинетической энергии на уровне 850 гПа – на рис. 4.

По фактическим данным и расчетам моделей, 1 октября 2009 года наблюдалось выраженное СТ на уровне 150–250 гПа. Струйное течение располагалось квазиширотно, и его ось находилась над $37\text{--}40^\circ$ с. ш., соответствуя зоне максимальных градиентов температуры на поверхности 850 гПа. Кинетическая энергия в СТ превышала $3000 \text{ м}^2/\text{с}^2$. Скорость ветра на высоте около 10,5 км по расчетам WRF достигала 70 м/с, по ETA – на 20 % меньше – 55 м/с.



а) 6 октября б) 7 октября в) 8 октября

Рис. 2. Спутниковые снимки (в ИК-диапазоне частот) ТЦ Парма (западнее), Мелор (восточнее) и полярного фронта 6–8 октября.

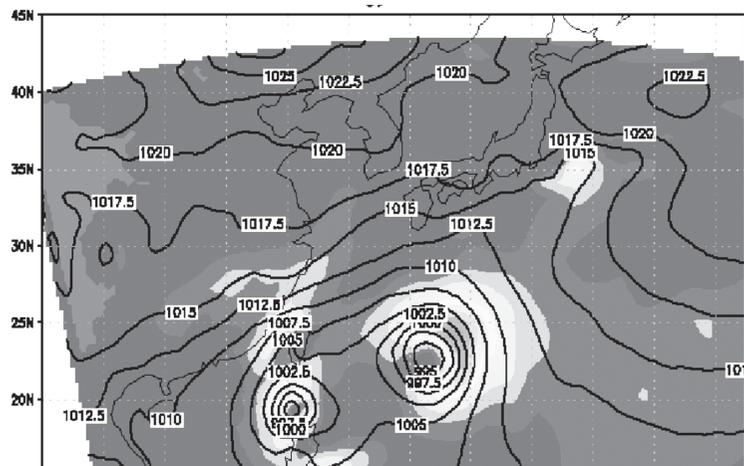


а) 7 октября б) 8 октября

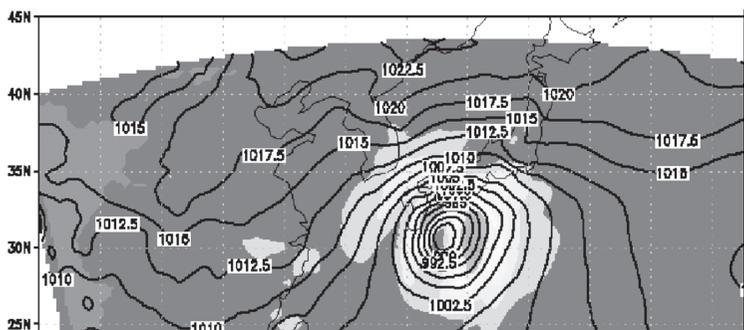
Рис. 3. Поля температуры ($^\circ\text{C}$) и ветра (м/с) на уровне 850 гПа при эволюции ТЦ Парма и Мелор 7–8 октября.

При сравнении с фактической скоростью оказалось, что модель WRF дает более близкие к фактическим значения скорости ветра.

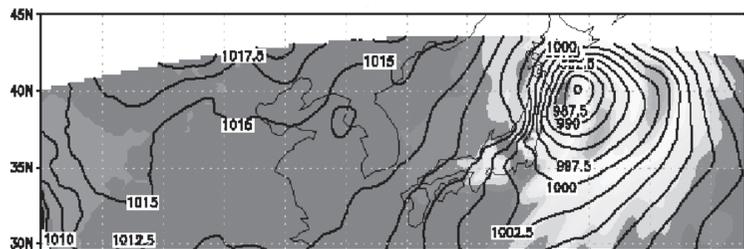
В результате опускания тропосферной ложбины в более южные широты и увеличения меридиональной компоненты циркуляции в этой области произошло сближение полярного фронта и струйного течения с тропическими циклонами (рис. 2а). Одновременно наблюдалось сближение и циклоническое вращение относительно друг друга пары ТЦ Парма и Мелор (рис. 5а). 3 октября южная периферия струйного течения на 250 гПа опустилась довольно низко к



а) 6 октября 00 ч

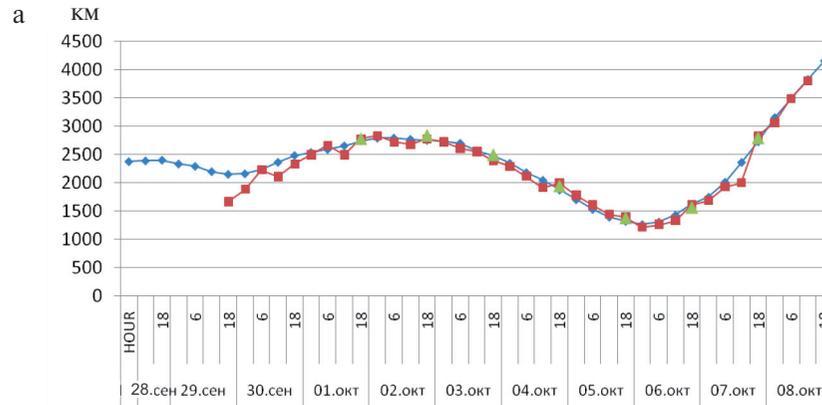


б) 7 октября 12 ч



в) 8 октября 12 ч

Рис. 4. Поля кинетической энергии ТЦ на уровне 850 гПа при эволюции ТЦ Парма и Мелор 6–8 октября.



—♦— dist_real —■— dist_eta —▲— dist_wrf

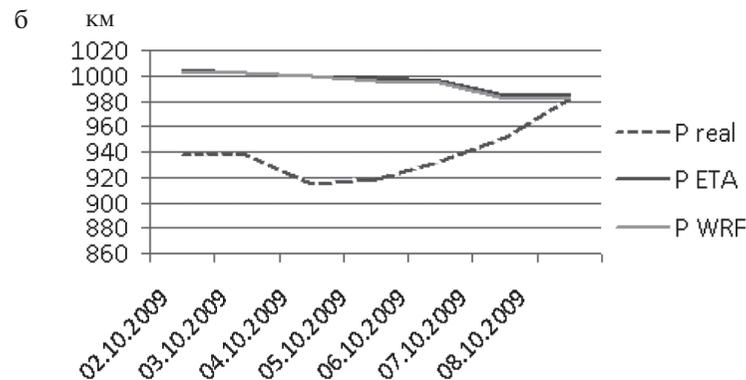


Рис. 5. Расстояние между центрами ТЦ Парма и Мелор (а); фактическое и расчетное давление в центре ТЦ Мелор (б).

югу (до 35° с.ш.), и на струйном течении начала образовываться волна. 4 октября в 12 ч ВСВ давление в Мелоре опустилось до 910 гПа, и такая величина сохранялась в течение суток. 5 октября в 12 ч ВСВ произошел разрыв струйного течения, и одна из его восточных ветвей опустилась до 28° с. ш. на долготе о. Кюсю. Западная его ветвь располагалась над восточным побережьем Китая (28° с.ш., 120° в.д.). Центр ТЦ Парма находился на расстоянии 800–900 км от южной границы

СТ, а центр Мелора – на расстоянии около 1000 км от южной части восточного рукава СТ (рис. 2а). В этот интервал времени более слабый ТЦ Парма являлся вихрем, ведомым более сильным Мелором. Наблюдалось взаимодействие двух ТЦ (расстояние между их центрами уменьшилось до 1200 км (рис. 5а), что привело к образованию петли на траектории Пармы (рис. 1) и удалению Пармы от СТ.

Рассмотрим более подробно результаты расчета обеих моделей.

Эволюция полей кинетической энергии с 6 по 8 октября на уровне 850 гПа представлена на рис. 4. 6 октября в 18 ч ВСВ Мелор приближается к СТ и, соответственно, к полярному фронту (рис. 2а), давление в его центре в это время повышается до 930 гПа.

7 октября вихрь подходит вплотную к фронтальной зоне и 7 октября в 6 ч ВСВ «садится» на полярный фронт (рис. 2б). При этом ТЦ достигает высоты 11–12 км и объединяется с областью струйного течения (это четко прослеживается по полям кинетической энергии на уровне 200–250 гПа). При этом изменяется форма СТ и наблюдается общая изолиния энергии ТЦ и СТ. С этого момента ТЦ Мелор начинает перемещаться с большой скоростью параллельно и южнее оси СТ и вдоль полярного фронта. Отток по его северной периферии совпадает с направлением СТ. В результате потоки складываются и интенсивность СТ несколько увеличивается. К этому моменту за счет быстрого перемещения Мелора расстояние между парой ТЦ увеличивается (рис. 5а), и прекращается их взаимодействие (петля на траектории Пармы заканчивается) (рис. 1). Парма начинает перемещаться на запад.

8 октября в 12 ч ВСВ у Мелора появляется вторая область максимума кинетической энергии (по расчетам на двух моделях), центр которой расположен на расстоянии 800 км от центра ТЦ, другая область максимума кинетической энергии находится на расстоянии 300 км (рис. 4в). Этот момент соответствует превращению ТЦ в среднеширотный и образованию фронтальной области в нем (рис. 2в).

Интересна динамика полей кинетической энергии струйного течения при подходе ТЦ (рис. 6). Как уже упоминалось выше, в определенный момент на СТ образуется волна с прогибом на юг. Далее южная часть струйного течения разрывается, вытягивается двумя рукавами в направлении приближающихся тропических циклонов Парма и Мелор (рис. 6а). На рис. 6б хорошо прорисовывается

замкнутая изолиния, соответствующая энергии Мелора на уровне 250 гПа. На рис. 6 в–д видно продвижение этой области вдоль СТ. После ухода Мелора 9 октября южная часть волны струйного течения, прежде разорванная, «срастается», прогиб ее к югу уменьшается, «струя» выравнивается и стремится расположиться опять по широте (рис. 6 д–з).

Поле температур на 850 гПа (рис. 3) также реагирует на приближение ТЦ: начинается искажение первоначально прямой границы температурного фронтального раздела при приближении ТЦ и когда он «садится» на полярный фронт. 8 октября вихрь, «проникнув» во фронтальную зону, «закручивает» ее температурное поле в свою структуру. На рисунке можно видеть, каким образом при подходе вихря к зоне температурного раздела полярного фронта искажается его структура: появляется асимметрия (рис. 3а), сопровождающаяся наклоном оси максимума температур и увеличением пространства, захваченного вихрем.

После выхода ТЦ за расчетную область (ухода на северо-восток) зона максимального температурного градиента СТ также стремится выровняться. Атмосферный процесс в данной области восстанавливает широтную направленность.

Надо сказать, что в рассмотренном случае мощное струйное течение имело место до появления ТЦ и вступило с ним в «связь» при сближении с ТЦ на определенное расстояние (менее 1000 км).

Посмотрим, как рассчитывается положение центра ТЦ на моделях. Изменение расстояния между центрами Пармы и Мелора (фактическое и по расчетам моделей) представлено на рис. 5а.

Расстояние между центрами ТЦ обе модели дают практически одинаково хорошо, за исключением стадии тропический шторм (TS), когда центры вихрей определяются не достаточно точно (рис. 5а). Давление в центре ТЦ рассчитывается обеими моделями примерно одинаково: завьшается и определяется с точностью до 5–10 % в зависимости от стадии вихря. Расчеты на обеих моделях достаточно хорошо описали странную петлю на траектории Пармы. Поворот на траектории Мелора обеими моделями также хорошо рассчитан. (Результаты исследования причин появления этой петли подробно рассмотрены в [5]). Ошибка в положении центра ТЦ Пармы при расчете по ETA на сутки составляет 100–120 км, на двое суток – 200–280 км. При расчете по WRF на сутки

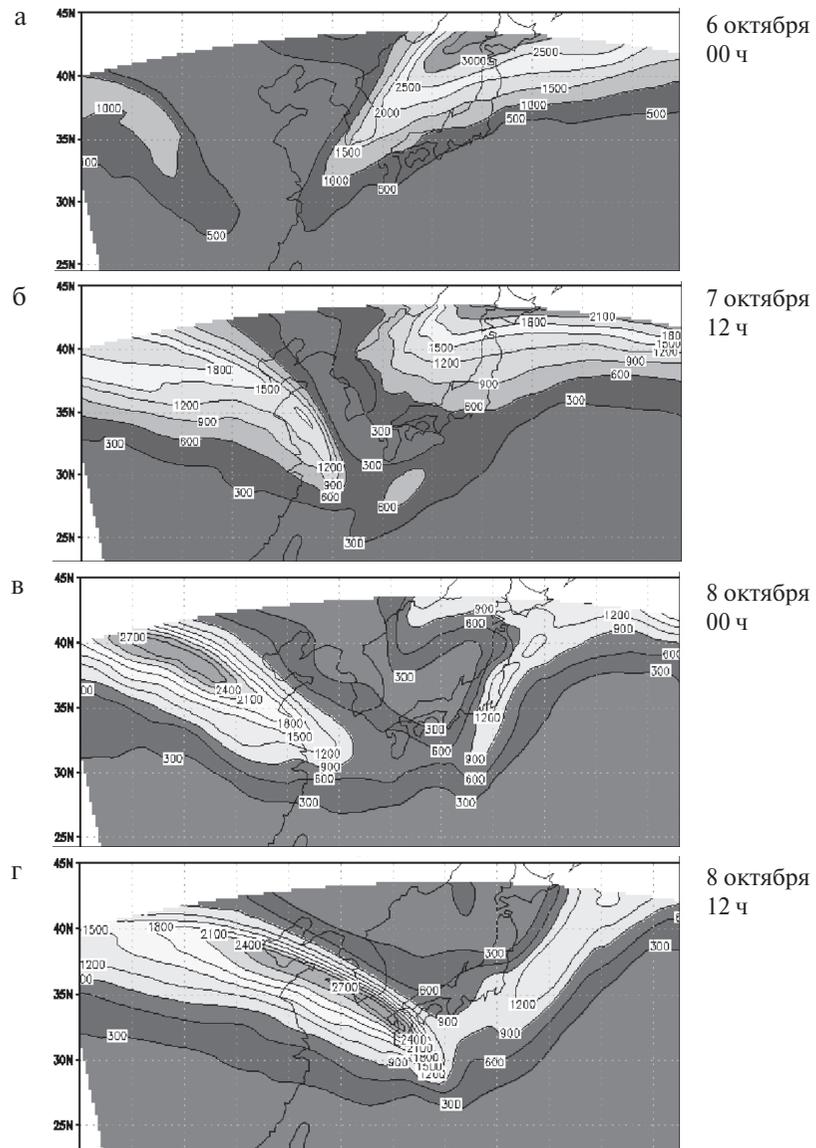


Рис. 6 (а–г). Поля кинетической энергии струйного течения на 250 гПа при прохождении ТЦ Мелор 6–9 октября.

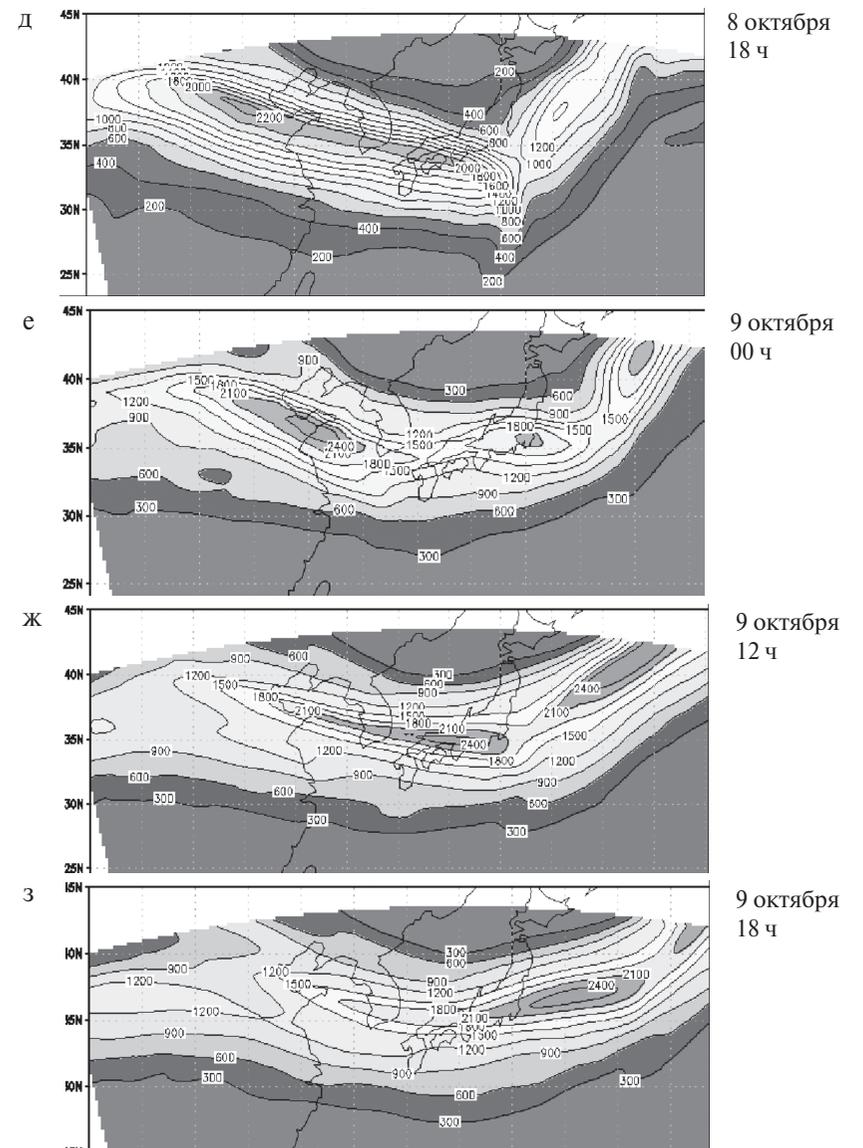


Рис. 6 (д–з). Поля кинетической энергии струйного течения на 250 гПа при прохождении ТЦ Мелор 6–9 октября.

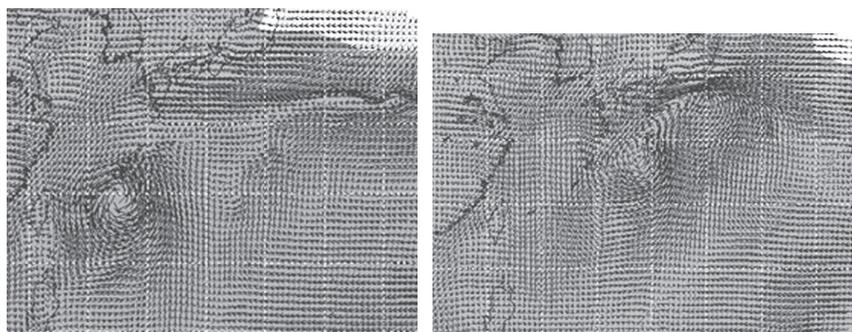
ошибка приблизительно на 15–20 % меньше. Для Мелора (более простая параболическая траектория) ошибки по WRF несколько меньше и составляют максимально до 85 км на первые сутки и до 210 км – на вторые; по ETA ошибки больше на 10–20 %. Наибольшие ошибки определения положения центра циклона отмечаются на стадии тропической депрессии, когда циклон недостаточно хорошо выражен.

Анализ результатов расчетов траекторий и эволюции тропического циклона Лупит

Проследим, как взаимодействует, и взаимодействует ли Лупит со струйным течением. 15 октября образовалась тропическая депрессия – будущий Лупит. Причины «неправильности» его траектории до 12 ч ВСВ 23 октября проанализированы в [5].

Рассмотрим причины крутого поворота (почти на 110–120°) вихря на северо-восток 23 октября в 12 ч ВСВ (рис. 1).

Эволюция полей температуры и ветра на уровне 850 гПа представлена на рис 7, полей скорости и кинетической энергии СТ – на уровне 250 гПа – на рис. 8 и 9, соответственно.

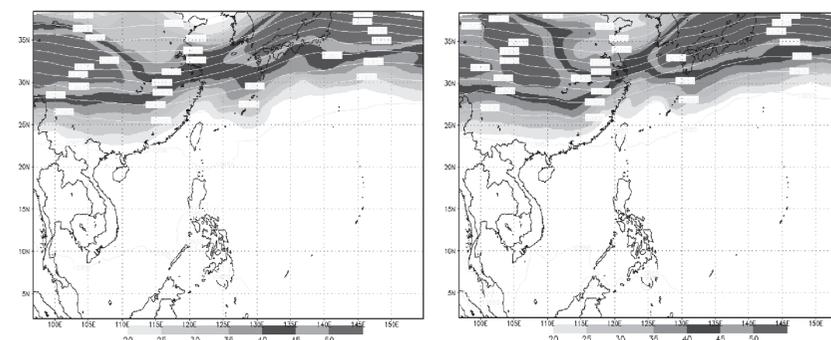


а) 25 октября

б) 26 октября

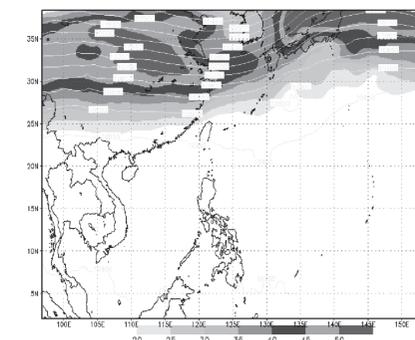
Рис. 7. Поля температуры (°С) и ветра (м/с) на уровне 850 гПа при эволюции ТЦ Лупит 25–26 октября.

В момент образования ТЦ ось СТ в рассматриваемой области располагалась параллельно кругу широты (31–35° с.ш.).



а) 24 октября

б) 25 октября



в) 26 октября

Рис. 8. Поля скорости струйного течения (м/с) на уровне 250 гПа при эволюции ТЦ Лупит 24–26 октября.

23 октября ТЦ находился на расстоянии 800 км от южной части СТ, которое в это время, также как это произошло в случае с рассмотренными выше ТЦ Парма и Мелор, прогнувшись к югу, стало образовывать волну. Часть южной ветви СТ опустилась до 23° с. ш., где в этот момент находился ТЦ Лупит. Началось взаимодействие этих двух систем. ТЦ «садится» на полярный фронт. Струйное течение подхватывает вихрь, и далее он перемещается вдоль южной границы СТ и, соответственно, вдоль полярного фронта. Именно в этот момент Лупит начал круто поворачивать на северо-восток и 24 октября с большой скоростью двинулся

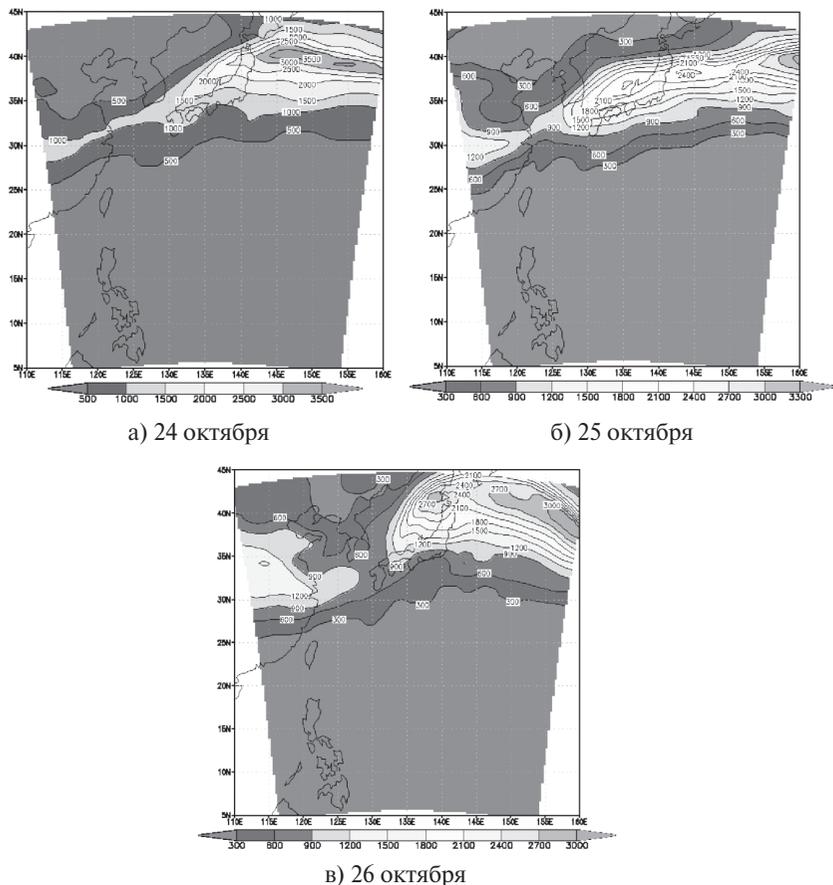


Рис. 9. Поля кинетической энергии струйного течения на уровне 250 гПа при прохождении ТЦ Лупит 24–26 октября.

вдоль оси СТ. По динамике полей скорости (рис. 8) и кинетической энергии (рис. 9) струйного течения хорошо наблюдается перемещение вихря вдоль СТ. Структура этих полей изменяется и закручивается в вихрь. В поле температур на уровне 850 гПа (рис. 7) хорошо просматривается граница полярного фронта и его динамика при приближении вихря. Можно наблюдать, как вихрь «накручивает» на себя фронтальную зону и область струйного течения, образуя на них волну (рис. 7б, 8в, 9в).

Далее, вслед уходящему Лупиту, небольшой рукав, видимый в полях скорости и кинетической энергии СТ, постепенно втягивается в основное «русло» струйного течения, восточный и западный рукава СТ стремятся объединиться, ось – расположиться по широте. Скорость на оси СТ в этот момент превышала 55 м/с.

Расчеты продемонстрировали, что модель ETA успешно воспроизвела необычную траекторию циклона Лупит, причем наибольшие ошибки (до 280 км) отмечались не в период отклонения циклона от параболической траектории, а после поворота вихря, когда скорость его движения начала стремительно расти при приближении к внетропическим широтам. Аналогичная ситуация наблюдалась в модели WRF.

Выводы

1. На основании расчетов на мезомасштабных численных моделях атмосферы ETA и WRF (NMM) траекторий и полей метеорологических величин (давления, скорости и направления ветра, температуры, кинетической энергии) был проведен анализ перемещения и эволюции ТЦ Парма, Мелор, Лупит и их взаимодействие со струйными течениями и полярными фронтами. Показано, что взаимодействие ТЦ со струйным течением начинается с расстояния несколько менее 1000 км в зависимости от интенсивности этих структур и приводит к трансформации всех сопутствующих полей метеорологических величин, к усилению или ослаблению энергии СТ, но не к его образованию, как было указано в [2, 3].

2. Обнаружен интересный эффект образования второй зоны максимальных скоростей и, соответственно, энергии в ТЦ Мелор при преобразовании его во внетропический среднеширотный циклон.

3. Сравнивая качество воспроизведения траекторий тропических циклонов в двух моделях, можно заметить, что в случае правильной параболической траектории (Мелор) обе модели дают похожие результаты, хорошо согласующиеся с фактическими. При наличии петли (Парма) модель WRF показывает лучшие результаты, в то время как модель ETA дает ошибку прогноза примерно 100 км. В то же время обе модели хорошо описали крутой поворот на траектории ТЦ Лупит с точностью 50–100 км.

4. Если говорить о качестве воспроизведения метеорологических полей обеими моделями в период взаимодействия циклонов, следует отметить:

– обе модели существенно завышают атмосферное давление в центре вихрей, в среднем на 30–40 гПа;

– скорости ветра в струйном течении в модели ETA оказываются на 10–15 м/с ниже, чем в WRF;

– кинетическая энергия струйного течения в модели ETA оказывается на 100–250 м²/с² ниже, чем в WRF, однако, учитывая величину значений энергии (3000–3500 м²/с²), погрешность можно считать незначительной (менее 1 %).

Список использованных источников

1. Бурлуцкий Р.Ф. О структуре тропической атмосферы при возникновении тайфунов // Метеорология и гидрология. – 1964. – № 3. – С. 27–30.
2. Бохан В.Д., Виприцкая А.К. Восточное тропосферное струйное течение в зоне деятельности тайфунов // Труды ДВНИГМИ. – 1984. – Вып. 115. – С. 51–59.
3. Виприцкая А.К., Чернова З.И. К вопросу о причинах зарождения (незарождения) тропических циклонов над северо-западной частью Тихого океана в июле–сентябре 1988 года // Труды ДВНИГМИ. – 1993. – Вып. 146. – С. 3–21.
4. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 615 с.
5. Похил А.Э. Об интересных случаях взаимодействия пары тропических циклонов и полярного фронта // Метеорология и гидрология. – 2012 (в печати).
6. Похил А.Э. О нескольких случаях взаимодействия тропических циклонов в Тихом океане в сезон 1988 года // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 6. – С. 60–67.
7. Похил А.Э., Глебова Е.С. О взаимодействии тропических циклонов между собой и с другими атмосферными структурами // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 9. – С. 5–16.
8. Mesinger F. Eta Model at NCEP: Challenges overcome and lessons learned // Lecture notes, Workshop on «Design and Use of Regional Weather Prediction Models». – The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Miramare, Trieste, Italy, 11–19 April 2005.
9. Rossby C.-G. Collaborators. Relation between the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and displacements of the semipermanent centers of action // J. Marine Res. – 1939. – Vol. 2. – P. 38–55.
10. <http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/>

Поступила в редакцию 06.10.2011 г.