

Гидромеханическая модель перемещения тропических циклонов

Б.Я. Шмерлин¹, М.Б. Шмерлин²

¹ФГБУ НПО «Тайфун», Институт экспериментальной метеорологии,
249038 Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, 4
E-mail: shmerlin@typhoon.obninsk.ru ;

²Геофизическая Служба РАН,
249035 Калужская обл., Обнинск, пр. Ленина, 189
E-mail: shmerlin@gsras.ru

Приводятся результаты диагностических, квазипрогностических и прогностических расчётов перемещения тропических циклонов (ТЦ) в рамках гидромеханической модели (ГММ). Показано, что в диагностическом режиме ГММ достаточно корректно описывает перемещение ТЦ. Параметры ГММ (константы для каждого ТЦ) достаточно корректно могут быть определены на предпрогностическом периоде: средние ошибки квазипрогнозов по северо-западной части Тихого океана составляют 217, 272, 258, 257, 267 км на 3, 4, ..., 7 суток соответственно. Средняя по сезону ТЦ 2010 года ошибка прогнозов ГММ на трое суток составила 350 км по указанному региону, что незначительно (на 35 км) превышает ошибку официальных американских прогнозов и находится на уровне ошибок прогнозов наиболее развитых зарубежных динамических методов.

Ключевые слова: прогноз перемещения тропических циклонов, ошибки прогноза, ведущий поток, максимальная скорость ветра, трение о подстилающую поверхность.

Введение

На основе анализа достаточно простых баротропных и бароклинных моделей, игнорирующих трение ТЦ о подстилающую поверхность (ПП), сложилось мнение, что ТЦ лишь незначительно отклоняются от окружающего крупномасштабного течения, называемого ведущим потоком (ВП) (Хаин, 1989; Chan, 2005). Поскольку зачастую это противоречит данным наблюдений (Dong, Neumann, 1986), усилия исследователей направлены на поиск причин существенного отклонения ТЦ от ВП в рамках указанных моделей. Между тем, трение ТЦ о ПП является фактором, обеспечивающим торможение ТЦ как целого и приводящим к значительному отклонению ТЦ от ВП. Характерное время торможения ТЦ вследствие трения о ПП порядка 0.5 суток, время увлечения ТЦ ведущим потоком вследствие лобового сопротивления порядка 2.5 суток (Шмерлин, 1989). На первый взгляд, ТЦ должен почти покоиться, и следует искать причины, по которым ТЦ в тех или иных случаях движется со скоростью, близкой к скорости ВП. В такой ситуации имеет смысл использовать для описания перемещения ТЦ общие выражения для сил, действующих на круговой цилиндр, движущийся произвольным образом в произвольном двумерном вихревом потоке (Якимов, 1970; Петров, 1978). Этот подход реализован в ГММ (Шмерлин, 1981; 1987; 1989; Шмерлин и др., 2004; 2009).

Структура гидромеханической модели

Уравнение, описывающее перемещение ТЦ в рамках ГММ, имеет вид

$$d\vec{V}/dt = d\vec{V}_0/dt + [(\vec{V} - \vec{V}_0) \times \vec{\Omega}_0] - \alpha \cdot (\vec{V} - \vec{V}_0) - \alpha_1 \cdot \vec{V}_0 + \vec{F}_\beta,$$
$$\vec{\Omega}_0 = 2\vec{\Omega}_\perp(1-A) - A\vec{\omega}, \quad \Omega_\perp = \Omega \sin \varphi, \quad \omega = V_\varphi(L)/L, \quad (1)$$
$$\alpha = (b+c)/2, \quad \alpha_1 = (b-a)/2, \quad F_\beta = f \frac{\Omega \cos \varphi}{L^2 R} \int_0^L V_\varphi(r) r^2 dr,$$

где \vec{V} – скорость перемещения ТЦ; $\vec{V}_0(x, y, t)$ – поле скорости ВП; $2\vec{\Omega}_\perp$ – параметр Кориолиса; $\vec{\omega}$ – угловая скорость вращения ТЦ (вектора $2\vec{\Omega}_\perp$ и $\vec{\omega}$ направлены вертикально вверх); Ω – угловая скорость вращения Земли; φ – широта центра ТЦ; L – радиус ТЦ; $V_\varphi(r)$ – радиальное распределение тангенциальной скорости ветра в ТЦ; A – коэффициент, характеризующий отличие обтекания тропического циклона ведущим потоком от чисто двумерного (известно (Куо, 1969; Jones, 1977; Бэтчелор, 1973), что при чисто двумерном обтекании цилиндра параметр Кориолиса исчезает из уравнения движения, т.е. $A = 1$); b – коэффициент трения ТЦ о ПП; a – коэффициент трения ВП о ПП; c – коэффициент трения ТЦ о ВП; \vec{F}_β – направленная на север сила Россби; $f \approx 1$ – безразмерный параметр модели; R – радиус Земли. Мы не приводим соответствующее уравнение в сферической системе координат, которое и использовалось в работе.

Подобный подход применялся ранее (Куо, 1969; Jones, 1977). Использовались точные выражения для сил, действующих на цилиндр в однородном стационарном потоке идеальной жидкости с постоянным горизонтальным сдвигом скорости, и для этого случая были получены уравнения перемещения ТЦ. Там же обращено внимание на важность учёта трения ТЦ о ПП. В (1) мы воспользовались результатами (Якимов, 1970; Петров, 1978), которые справедливы с точностью до членов третьего порядка малости по L/L' , L' – масштаб неоднородности ВП. В связи с этим в уравнении (1) появилось дополнительное важное слагаемое – ускорение (полное) ВП. Также включена сила Россби, учитывающая влияние на перемещение ТЦ β -эффекта (Chan, Williams, 1987). Полностью изменены параметризации, используемые в модели (см. далее). Наконец, важным отличием ГММ от моделей (Куо, 1969; Jones, 1977) является присутствие параметра Кориолиса в выражении для Ω_0 , поскольку направление отклонения ТЦ от ВП определяется знаком Ω_0 (Шмерлин, 1981). В упомянутых моделях $\Omega_0 = -\omega < 0$, и ТЦ может отклоняться только вправо от ВП. Это противоречит данным многочисленных наблюдений за перемещением ТЦ (Dong, Neumann, 1986). В рамках ГММ параметр Ω_0 может менять знак вследствие изменений угловой скорости вращения ТЦ и параметра Кориолиса, при этом ТЦ отклоняется как вправо, так и влево от ВП. Закономерности отклонения ТЦ от ВП в рамках ГММ оказываются совершенно иными, чем в моделях, игнорирующих трение ТЦ о ПП. Судя по литературе, в дальнейшем исследовании с использованием указанного подхода были прекращены. Таким образом, в настоящее время ГММ стоит особняком в ряду моделей различного типа, используемых для прогноза перемещения ТЦ.

Приведём схемы параметризаций, используемых в ГММ. В качестве модельного вихря выбран вихрь Ренкина $V_\varphi(x)/V_m = v(x) = 2x/(1+x^2)$, $x = r/R_m$, V_m – максимальная скорость ветра ТЦ, R_m – радиус, на котором скорость ветра достигает максимального значения. В известных радиальных распределениях параметров ТЦ характерный внешний радиус ТЦ отсутствует. Тем не менее, такой внешний радиус можно ввести. Это радиус области восходящих движений (облачного покрова) ТЦ. Формула Ооямы (Ooyama, 1969) позволяет связать вертикальную скорость $w(x)$ с радиальным распределением тангенциальной скорости и из условия $w(x) = 0$ найти безразмерный радиус области восходящих движений x_0 (Калашник, 1994)

$$w(x) = \frac{V_m c_d}{x} \frac{d}{dx} \left\{ x^2 v^2(x) / \frac{d}{dx} [x v(x) + \text{Ro}^{-1} x^2] \right\}, \quad \text{Ro} = \frac{V_m}{R_m \Omega \sin \varphi}; \quad x_0 = \left[1 + (4 + 3 \text{Ro})^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Здесь $c_d \approx 1.1 \times 10^{-3}$ – коэффициент сопротивления, Ro – число Россби. Мы полагаем $L = x_0 R_m$. Из (1) получаем $\omega = 2V_m / [R_m (1 + x_0^2)]$, $F_\beta = f \Omega \cos \varphi V_m R_m [x_0^2 - \ln(1 + x_0^2)] / (R x_0^2)$. По смыслу, коэффициенты трения – это коэффициенты пропорциональности перед скоростью (или относительной скоростью) в выражении для силы трения, поделённой на массу. Вводя высоту однородной атмосферы $H \approx 8 \times 10^3$ м, для коэффициента трения ВП о ПП

получаем $a = c_d V_0 / H$. Считая силу трения ТЦ о ВП пропорциональной потоку относительного импульса через миделево сечение ТЦ, находим $c = 2k |\vec{V} - \vec{V}_0| / (\pi R_m x_0)$, $k \approx 1$ – безразмерный параметр модели. Коэффициент трения ТЦ о ПП вычислим, учитывая, что неподвижный воздух из пограничного слоя с вертикальной скоростью $w(x)$ поступает в область, занятую ТЦ, и затем вовлекается в горизонтальное движение со скоростью ТЦ.

$$\text{Тогда } b = \frac{s}{x_0^2 H} \int_0^{x_0} w(x) x dx = \frac{2s c_d V_m}{H} \frac{x_0}{1 + \text{Ro}^{-1} (1 + x_0^2)^2} \equiv s b_0, \quad s \approx 1 \text{ – безразмерный параметр}$$

модели. Величина $\tau = b_0^{-1}$ представляет собой отношение массы ТЦ к потоку массы в ТЦ из пограничного слоя, т.е. характерное время «вентиляции» ТЦ. Время оборота вращающейся системы координат составляет $\tau_r = (\Omega \sin \varphi)^{-1}$. Отношение τ_r / τ характеризует отличие обтекания ТЦ от чисто двумерного. Мы полагаем $A = \exp\{-p[b_0 / (\Omega \sin \varphi)]\}$, где p – последний безразмерный параметр модели. При чисто двумерном обтекании $b_0 = 0$ и $A = 1$. Таким образом, в общем случае модель содержит четыре параметра f, k, s, p , которые считаются константами для каждого конкретного ТЦ.

Метод прогноза перемещения ТЦ на основе ГММ включает три блока: блок интенсивности и радиальной структуры ТЦ, обеспечивающий объективный анализ и прогноз V_m и R_m ; блок ВП, обеспечивающий объективный анализ и прогноз поля скорости ВП; собственно блок прогноза, использующий ГММ. В первом блоке используется информация телеграмм - штормовых предупреждений. Они передаются четыре раза в сутки Национальным Центром Ураганов (ННС) для Атлантики и северо-востока Тихого океана и Объединённым Центром Предупреждения Тайфунов (GTWC) для северо-запада Тихого океана. Телеграммы содержат объективный анализ и прогноз с заблаговременностью до 5 суток включительно координат ТЦ, максимальной скорости ветра V_m и радиуса R_1 , на котором скорость ветра достигает значения $V_1 = 34$ узла. Отсюда определяется $R_m = R_1 [V_m / V_1 + \sqrt{(V_m / V_1)^2 - 1}]$. В блоке ВП используется объективный анализ и прогноз (с заблаговременностью до 6 суток включительно) полей ветра на стандартных уровнях в коде GRIB на сетке 2.5×2.5 градуса. Указанная информация выдаётся Глобальной Оперативной Моделью ГМЦ РФ два раза в сутки. За каждый срок прогноза находится среднее по высоте тропосферы в слое от поверхности до 200 мб поле ветра. Оно содержит циркуляцию ТЦ. В окрестности ТЦ вырезается окно, охватывающее циркуляцию ТЦ, и внутрь окна осуществляется интерполяция поля ветра из внешней области. Полученное поле ветра считается полем скорости ВП $\vec{V}_0(x, y, t)$ за соответствующий срок. Между сроками прогнозов телеграмм и полей скорости ВП используется линейная интерполяция соответствующих величин по времени.

Диагностические расчёты перемещения ТЦ

Под диагностическими имеются в виду расчёты, в которых в течение всего времени жизни ТЦ в качестве полей скорости ВП и величин V_m и R_m используется их объективный анализ. При этом параметры модели (константы для каждого ТЦ) подбираются из условия наилучшего совпадения расчётной и фактической траектории в течение всего времени жизни ТЦ. Нами накоплены все необходимые архивы полей ветра и телеграмм по ТЦ за сезоны 2001, 2003, 2010 и 2011 годов. В указанных сезонах оказалось порядка 120 ТЦ со временем жизни от 4 до 15 суток, для которых проводились диагностические расчёты. Для всех этих ТЦ среднее вдоль траектории отклонение расчетного положения от фактического не превышает 150 км, для большинства ТЦ оно меньше 100 км, что сравнимо с точностью определения фактического положения ТЦ. Диагностические расчёты воспроизводят не только общий характер траекторий ТЦ, но также характерные особенности большинства траекторий: характерную форму той или иной траектории в окрестности точек поворота, петли, топтание

на месте и т. д. Таким образом, ГММ достаточно корректно описывает перемещение ТЦ. Примеры диагностических расчётов для ТЦ, имевших нестандартные траектории, приведены на рис. 1. Первые 4 цифры в имени ТЦ – номер года, следующие две – порядковый региональный номер ТЦ в сезоне, символ “W” соответствует северо-западу Тихого океана, символ “A” – северо-западу Атлантического океана. Метки проставлены через 12 часов, траектории с кружками – расчётные. По горизонтали отложена долгота (западной долготе соответствуют отрицательные значения), по вертикали широта в градусах.

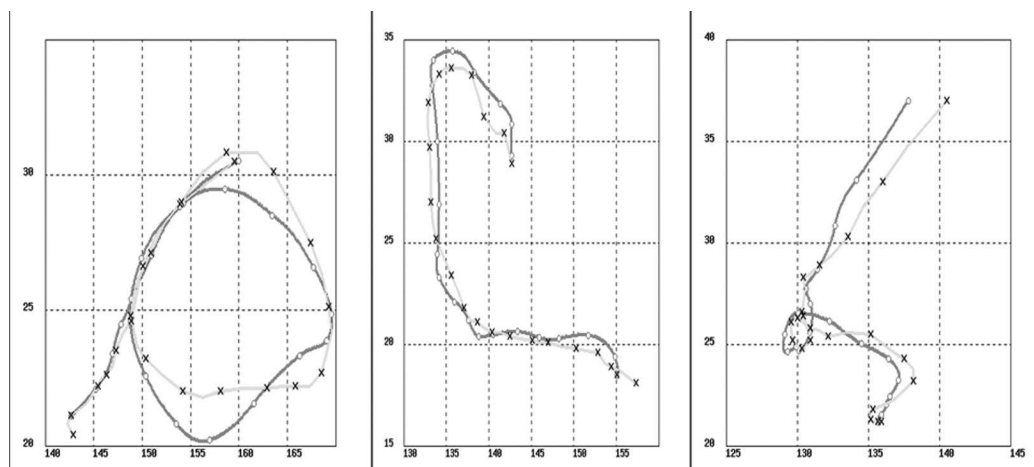


Рис. 1. Примеры диагностических расчётов: слева ТЦ 2003 21W, время жизни 10 суток, средняя вдоль траектории ошибка 87 км; в центре ТЦ 2011 08W, время жизни 10 суток, ошибка 118 км; справа ТЦ 2011 18W, время жизни 9.5 суток, ошибка 103 км

Квазипрогностические расчёты перемещения ТЦ

Под квазипрогностическими имеются в виду расчёты, в которых по-прежнему в течение всего времени жизни ТЦ в качестве полей скорости ВП и величин V_m и R_m используется их объективный анализ. При этом, однако, параметры модели (константы для каждого ТЦ) подбираются из условия наилучшего совпадения расчётной и фактической траектории на протяжении предпрогностического периода, длительность которого в случае реального прогноза определяется имеющейся на момент прогноза информацией о предшествующем перемещении ТЦ. Таким образом, квазипрогностические расчёты отличаются от прогностических тем, что в случае реального прогноза на прогностическом периоде вместо объективного анализа полей скорости ВП и величин V_m и R_m используется их прогноз. Средние по сезону 2010 года ошибки квазипрогнозов по северо-западной части Тихого океана составляют 217, 272, 258, 257, 267 км на 3, 4...7 суток соответственно, что существенно меньше средних ошибок официальных американских прогнозов (315, 450, 540 км на 3, 4 и 5 суток). В целом, квазипрогностические расчёты демонстрируют возможность корректного определения параметров модели по части траектории ТЦ, соответствующей предпрогностическому периоду. Примеры квазипрогнозов представлены на рис. 2.

Прогностические расчёты перемещения ТЦ сезона 2010 года

В сезоне 2010 года проведены испытания ГММ в прогностическом режиме. Примеры прогнозов точки поворота представлены на рис. 3. Средняя по сезону ТЦ 2010 года ошибка прогнозов ГММ на трое суток составляет 350 км по северо-западной части Тихого океана, что незначительно (на 35 км) превышает ошибку официальных американских прогнозов и

находится на уровне ошибок прогнозов наиболее развитых зарубежных динамических методов. Вместе с тем, ошибка прогнозов почти на 130 км больше ошибки квазипрогнозов. Это связано только с тем, что прогнозы крупномасштабного поля ветра и интенсивности ТЦ значительно отличаются от соответствующего объективного анализа. По мере того, как эти прогнозы будут приближаться к объективному анализу, ошибки прогнозов ГММ будут приближаться к ошибкам квазипрогнозов.

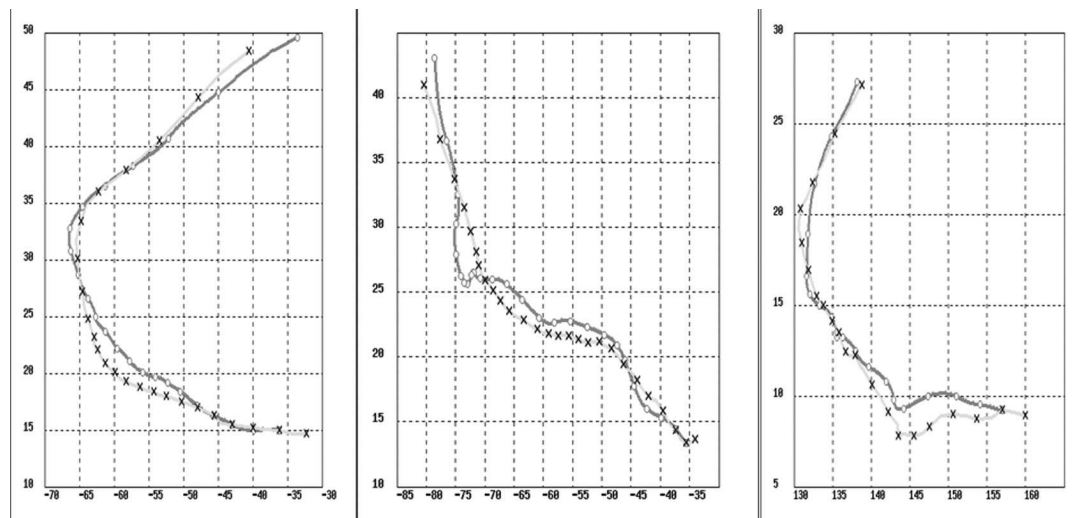


Рис. 2. Примеры квазипрогностических расчётов, длительность предпрогностического периода двое суток: слева ТЦ 2003 10А, квазипрогноз на 9 суток (счёт из начальной точки траектории на 11 суток); в центре ТЦ 2003 13А, квазипрогноз на 10.5 суток (счёт из начальной точки траектории на 12.5 суток); справа ТЦ 2003 26W, квазипрогноз на 9.5 суток (счёт из точки, соответствующей началу квазипрогноза, на 9.5 суток)

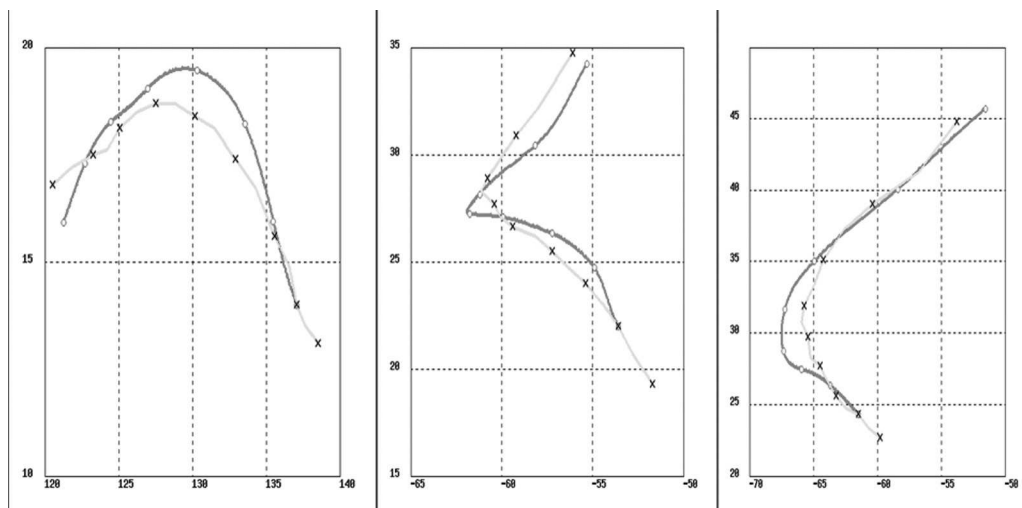


Рис. 3. Примеры прогнозов на 3.5 суток: слева ТЦ 2010 15W, в центре ТЦ 2010 06А, справа ТЦ 2010 11А

Литература

1. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости // М.: Мир, 1973. 758 с.
2. Калашиник М.В. О максимальной скорости ветра в тропическом циклоне // Изв. АН СССР. ФАО. 1994. Т. 30. № 1. С. 26-30.
3. Петров А.Г. Реакции, действующие на малое твёрдое тело в плоскопараллельном вихревом потоке // ДАН СССР. 1978. Т.238. № 1. С. 33–35.
4. Хаин А.П. Математическое моделирование тропических циклонов // Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 246 с.

5. Шмерлин Б.Я. Исследование закономерностей перемещения крупномасштабных вихрей относительно чистозонального потока // Метеорология и гидрология. 1981. № 7. С. 27-35.
6. Шмерлин Б.Я. Некоторые исследования устойчивости траекторий тропических циклонов в рамках гидромеханической модели // Тропическая метеорология. Тр. 3-го Междунар. симпоз. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 292-307.
7. Шмерлин Б.Я. О подтверждении адекватности гидромеханической модели перемещения тропического циклона // Тропическая метеорология. Тр. 4-го Междунар. симпоз. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 179-186.
8. Шмерлин Б.Я. и др. Диагностические расчеты перемещения тропических циклонов сезона 2001 года в рамках гидромеханической модели // Международная конференция МСС 04 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность, 23-25 ноября 2004 г. Сборник трудов». М.: РОХОС, 2004. С. 284-289.
9. Шмерлин Б.Я. и др. Квазипрогностические расчёты перемещения тропических циклонов // Украинский гидрометеорологический журнал. 2009. № 4. С. 67-74.
10. Якимов Ю.Л. Движение цилиндра в произвольном потоке идеальной несжимаемой жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 2. С. 202–204.
11. Chan J.C.L. The physics of tropical cyclone motion // Annu. Rev. Fluid Mech. 2005. V.37. P. 99–128.
12. Chan J.C., Williams R. Analytical and numerical studies of the Beta-Effect in tropical cyclone motion. Part 1: Zero mean flow // J. Atmos. Sci. 1987. V.44. № 9. P. 1257–1265.
13. Dong K., Neumann C.J. The relationship between tropical cyclone motion and environmental geostrophic flows // Mon. Wea. Rev. 1986. V.114. № 1. P. 115–122.
14. Jones R.W. Vortex motion in a tropical cyclone model // J. Atmos. Sci. 1977. V.34. P. 1518–1527.
15. Kuo H.L. Motion of vortices and circulating cylinder in shear flow with friction // J. Atmos. Sci. 1969. V.26. P. 390–398.
16. Ooyama K. Numerical simulation of the life-cycle of tropical cyclones // J. Atmos. Sci. 1969. V. 26. P. 1–43.

Hydromechanical Model of a Tropical Cyclones motion

B.Ya. Shmerlin ¹, M.B. Shmerlin ²

¹ *Research and Production Association «Typhoon»,
249038 Kaluga region, Obninsk, 4 Pobedy street
E-mail: shmerlin@typhoon.obninsk.ru ;*

² *Russian National Seismological Center GS RAS,
249035 Kaluga region, Obninsk, pr. Lenina 189
E-mail: shmerlin@gsras.ru*

Within the frameworks of the hydromechanical model (HMM) the diagnostic, quasi-prognostic and prognostic calculations of TC movement are carried out. A TC motion is defined by a large-scale wind field and a TC intensity. The model contains parameters describing TC dimensions and a distribution of the tangential wind. Diagnostic and quasi-prognostic calculations mean that an objective analysis of a large scale wind field and an objective analysis of a TC intensity are used during the TC whole lifetime. In case of diagnostic calculations, model parameters (constants for each TC) are defined during all the TC life cycle; for quasi-prognostic calculations they are defined during the preliminary «preprognostic» period from the best coincidence between the real and calculated track of a TC. Diagnostic calculations show that the HMM rather correctly describes peculiarities of TC motion during the whole TC lifetime. Quasi-prognostic calculations show that model parameters may be rather correctly defined during the preliminary «preprognostic» period. Mean forecast errors of the quasi-prognostic calculations for the North-West Pacific are: 217, 272, 258, 257, 267 km for 3, 4...7 days correspondingly in the TC season of 2010. The mean forecast error of the prognostic calculations for this region and the season is 350 km for 72 hours, that insignificantly (about 35 km) exceeds the official error and is within the limits of the forecast errors of the most developed dynamical prediction models.

Keywords: tropical cyclone, hydromechanical model, tropical cyclone track forecast, track forecast errors.