

Б.Я. Шмерлин, к.ф.-м.н., **О.В. Корышев**, к.т.н., **В.А. Денькин**,
А.И. Корнев, к.ф.-м.н., **М.Б. Шмерлин**

ГУ НПО «Тайфун», Институт экспериментальной метеорологии, Обнинск, Россия

КВАЗИПРОГНОСТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Аннотация. В рамках гидромеханической модели проведены квазипрогностические расчёты перемещения тропических циклонов (ТЦ) сезона 2003 года. Модель содержит параметры, характеризующие размер ТЦ и распределение тангенциального ветра в ТЦ. Показано, что выбором на предпрогностическом периоде значений этих параметров (констант для каждого ТЦ) удаётся добиться достаточно хорошего совпадения квазипрогностических и реальных траекторий на протяжении всего времени жизни ТЦ (до 11 суток).

Ключевые слова: тропические циклоны, тангенциальный ветер, квазипрогностические траектории.

1 Введение

В НПО «Тайфун» разрабатывается метод прогноза перемещения тропических циклонов (ТЦ), основанный на использовании гидромеханической модели (ГММ) [9].

На основе анализа достаточно простых баротропных и бароклинических моделей, игнорирующих трение ТЦ о подстилающую поверхность (ПП), сложилось мнение, что ТЦ лишь незначительно отклоняются от окружающего крупномасштабного течения, называемого ведущим потоком (ВП) [1,7]. Поскольку зачастую это противоречит данным наблюдений [3], усилия исследователей направлены на поиск возможных причин существенного отклонения ТЦ от ВП в рамках указанных моделей. Между тем, трение ТЦ о ПП является, по нашему мнению, фактором, обеспечивающим эффективное торможение ТЦ как целого и приводящим к значительному отклонению ТЦ от ВП. Для времени τ торможения ТЦ вследствие трения о ПП и времени τ_r увлечения ТЦ ведущим потоком вследствие лобового сопротивления можно получить оценки [10]: $\tau \approx (H/c_d V_m) \cdot (R_m/L) \approx 0.5$ суток, $\tau_r = \pi L / (2k |\vec{V}_0 - \vec{V}|) \approx \pi L / 2k V_0 \approx 2.5$ суток. Здесь $H \approx 6$ км – высота однородной атмосферы, $c_d \approx 1.1 \times 10^{-3}$ – коэффициент сопротивления, $V_0 \approx 10$ м/с – скорость ВП, $V \approx 10$ м/с – скорость перемещения ТЦ, $V_m \approx 50$ м/с – максимальная скорость ветра в ТЦ, $R_m \approx 50$ км – радиус максимальной скорости ветра, $L \approx 300$ км – радиус ТЦ, $k \approx 0.1 \div 1$ – безразмерный параметр модели. Поскольку время торможения ТЦ существенно меньше времени увлечения его ведущим потоком, то, на первый взгляд, ТЦ должен почти покоиться. При этом, в отличие от традиционного подхода, 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 [6,11]. Этот подход реализован в ГММ.

2 Методы исследования и исходные данные

2.1 Уравнение, описывающее перемещение ТЦ в рамках ГММ

Введём обозначения: \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); b – коэффициент трения ТЦ о ПП, $b \approx 1/\tau$; $a = 1/\tau_0$ – коэффициент трения ВП о ПП, $\tau_0 = H/c_d V_0 \approx 10$ суток – время торможения ВП вследствие трения о ПП; $c = 1/\tau_r$ – коэффициент трения ТЦ о ВП; \vec{F}_β – направленная на север сила Россби; c_β – безразмерный параметр модели; Ω – угловая скорость вращения Земли; R – радиус Земли; L – радиус ТЦ; φ – широта центра ТЦ; $V_T(r)$ – радиальное распределение тангенциальной скорости ветра в ТЦ. Уравнение, описывающее перемещение ТЦ в рамках ГММ, имеет вид:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d\vec{V}_0}{dt} + \left[(\vec{V} - \vec{V}_0) \times \vec{\Omega}_0 \right] - \alpha \cdot (\vec{V} - \vec{V}_0) - \alpha_1 \cdot \vec{V}_0 + \vec{F}_\beta, \quad (1a)$$

$$\vec{\Omega}_0 = 2\vec{\Omega}_\perp - \vec{\omega}, \quad (1b)$$

$$\alpha = \frac{(b+c)}{2}, \quad \alpha_1 = \frac{(b-a)}{2}, \quad (1c)$$

$$F_\beta = c_\beta \frac{\Omega \cdot \cos \varphi}{L^2 \cdot R} \cdot \int_0^L V_T(r) \cdot r^2 \cdot dr, \quad \omega = V_T(L) / L. \quad (1d)$$

Для краткости мы не приводим соответствующее уравнение, записанное в сферической системе координат, которое и использовалось в работе.

Отметим, что подобный подход использовался и ранее в работах [4,5], в которых ТЦ также моделировался твёрдым цилиндром. Были получены уравнения, описывающие перемещение ТЦ в однородном стационарном ВП с постоянным горизонтальным сдвигом скорости. Там же было впервые обращено внимание на важность учёта трения ТЦ о ПП, о чём речь шла выше. В отличие от указанных работ, в которых использовалось точное выражение для сил, действующих на цилиндр в однородном стационарном потоке идеальной жидкости с постоянным горизонтальным сдвигом скорости, мы воспользовались приближёнными результатами [6,11], которые справедливы с точностью до членов третьего порядка малости включительно по L/L' , где L' – масштаб неоднородности ВП. В связи с этим в уравнении (1) появилось дополнительное весьма важное слагаемое – переносное ускорение ВП. Также в уравнение дополнительно включена сила Россби, учитывающая влияние на перемещение ТЦ β -эффекта (зависимости параметра Кориолиса от широты) [2]. Существенным образом изменены параметризации коэффициентов трения, используемые в модели. Наконец, важнейшим отличием ГММ от [4,5] является присутствие параметра Кориолиса в выражении для Ω_0 . Дело в том, что направление отклонения ТЦ от ВП определяется знаком Ω_0 [9]. В уравнениях, использованных в работах [4,5], $\Omega_0 = -\omega \leq 0$, и ТЦ может отклоняться только вправо от ВП [4,5,9]. Это противоречит данным многочисленных наблюдений за перемещением ТЦ [3]. В рамках ГММ параметр Ω_0 меняет знак по мере смещения ТЦ по широте вследствие изменения параметра Кориолиса и по мере изменения угловой скорости вращения ТЦ ω , при этом

ТЦ может отклоняться как вправо, так и влево от ВП в зависимости от знака Ω_0 . Указанные отличия подробно обсуждаются в [8].

Судя по литературе, в дальнейшем исследования с использованием моделей [4,5] были прекращены, и в настоящее время нам неизвестны другие исследования с использованием подобных моделей. Таким образом, ГММ стоит особняком в ряду моделей различного типа, используемых для прогноза перемещения ТЦ.

Закономерности отклонения ТЦ от ВП в рамках ГММ оказываются совершенно иными, чем в моделях, игнорирующих трение ТЦ о ПП [9 и приведённые там ссылки на работы автора]. Вместе с тем, правильное описание отклонения ТЦ от ВП имеет решающее значение для прогноза перемещения ТЦ.

Как следует из (1), перемещение конкретного ТЦ в рамках ГММ определяется полем скорости ВП, а также интенсивностью и радиальной структурой ТЦ. В дальнейшем, говоря об интенсивности ТЦ, будем одновременно подразумевать и радиальную структуру. В соответствии с этим, разрабатываемый метод прогноза перемещения ТЦ содержит три блока: блок интенсивности ТЦ, обеспечивающий объективный анализ и прогноз интенсивности; блок ВП, обеспечивающий объективный анализ и прогноз поля скорости ВП; собственно блок прогноза перемещения ТЦ, использующий ГММ.

2.2 Схема блока интенсивности ТЦ

В блоке интенсивности используется информация телеграмм – штормовых предупреждений. Они передаются 4 раза в сутки Национальным Центром Ураганов в Майами (ННС) для Атлантики и северо-востока Тихого океана и Объединённым Центром Предупреждения Тайфунов на о. Гуам (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.

В модели используется простейшее радиальное распределение тангенциальной скорости ветра ТЦ: $V_T(r)/V_m = 2x/(1+x^2)$, $x = r/R_m$ (модифицированный вихрь Ренкина). Отсюда по данным телеграмм определяется радиус максимального ветра ТЦ

$$R_m = R_1 \left(V_m/V_1 + \left[(V_m/V_1)^2 - 1 \right]^{0.5} \right)^{-1}.$$

Важнейшим параметром модели является радиус ТЦ L , который определяет угловую скорость вращения ТЦ, силу Россби, а также коэффициенты трения ТЦ о подстилающую поверхность и о ведущий поток. Между тем, в известных радиальных распределениях параметров ТЦ характерный внешний радиус ТЦ отсутствует, что хорошо видно на примере с модифицированным вихрем Ренкина. Нами использована параметризация, позволяющая связать радиус ТЦ L с радиусом максимального ветра: $L/R_m = pF(Ro, q)$. Здесь $Ro = V_m/(R_m \cdot \Omega \cdot \sin \varphi)$ – число Россби; $q = \beta V_m/c_d$, $\beta = 4 \times 10^{-5}$ с/м – постоянная в соотношении $c_d(v) = c_d + \beta \cdot v$, определяющем зависимость коэффициента сопротивления от скорости v ; F – функция, для расчёта которой применяется достаточно простой численный алгоритм. Коэффициент пропорциональности p является третьим (наряду с упомянутыми выше k и c_β) безразмерным параметром модели. После этого легко вычисляются величины ω , F_β , c . Коэффициент трения ТЦ о ПП b вычисляется через интегральное по области,

занятой ТЦ, трение о подстилающую поверхность, соответствующая оценка $\tau = 1/b$ приведена в начале статьи.

2.3 Схема блока ведущего потока

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 полей ветра находится среднее по высоте тропосферы в слое от поверхности до 100 мб поле ветра. Оно, вообще говоря, содержит циркуляцию ТЦ. В окрестности ТЦ вырезается окно, охватывающее циркуляцию ТЦ, и внутри окна осуществляется интерполяция поля ветра из внешней области. Полученное поле ветра, не содержащее циркуляцию ТЦ, считается полем скорости ВП $\vec{V}_0(x, y, t)$ за соответствующий срок. В качестве примера слева на рис. 1 приведено поле ветра с циркуляцией ТЦ, справа – поле скорости ВП, ТЦ находится в точке с координатами 125 градусов в.д., 25 градусов с.ш.

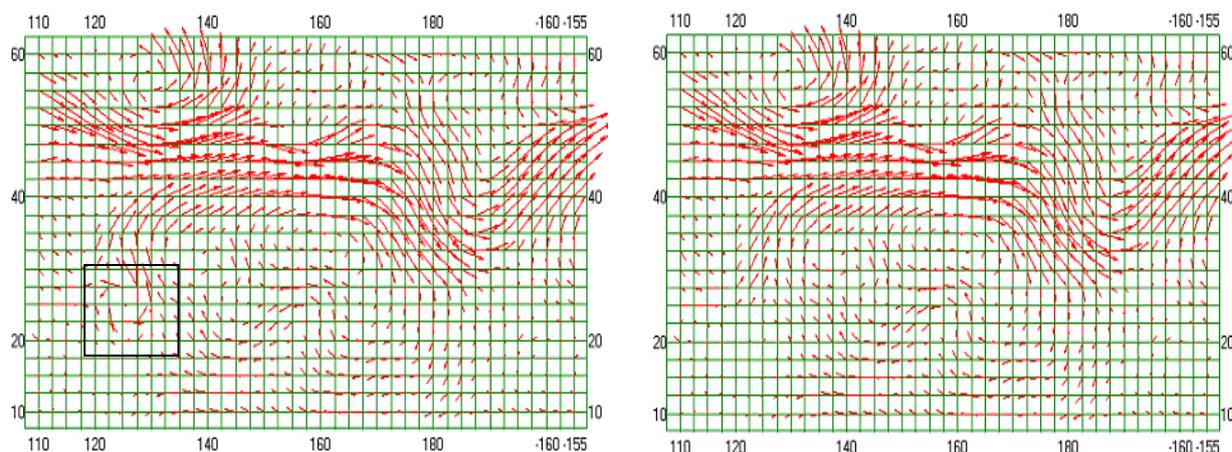


Рис.1 – Крупномасштабное поле ветра до и после исключения циркуляции ТЦ. Слева приведено окно, охватывающее циркуляцию ТЦ.

Между сроками прогнозов телеграмм и полей скорости ВП используется линейная интерполяция соответствующих величин по времени.

2.4 Диагностические расчёты перемещения ТЦ

Ранее [10] в рамках разрабатываемого метода прогноза была проведена серия диагностических расчетов перемещения ТЦ сезонов 2001 и 2003 годов. Под диагностическими имеются в виду расчёты, в которых в течение всего времени жизни ТЦ в качестве полей скорости ВП и интенсивности ТЦ используется объективный анализ соответствующих величин. При этом параметры модели k , c_β и p (константы для каждого ТЦ) подбираются из условия наилучшего совпадения расчётной и фактической траектории в течение всего времени жизни ТЦ (в [10] для всех ТЦ было принято $k = 0$). В сезонах ТЦ 2001 и 2003 годов оказалось порядка 60 ТЦ длительностью четверо суток и более, для которых проводились диагностические расчёты. Для всех этих ТЦ среднее вдоль траектории отклонение расчетного положения от фактического не превышает 130 км, для большинства ТЦ оно меньше

100 км, что сравнимо с точностью определения фактического положения ТЦ. При этом для 36 ТЦ время жизни (время счёта) находилось в пределах от 5 до 14,5 суток. Диагностические расчёты воспроизводят не только общий характер траекторий ТЦ, но также характерные особенности большинства траекторий, например, характерную форму той или иной траектории в окрестности точек поворота, петли, топтание на месте и т. д. Это обстоятельство является весьма важным. Из него следует, что в основу разработки метода прогноза перемещения ТЦ положена модель, адекватно описывающая перемещение ТЦ. В целом, проведение диагностических расчётов позволило выбрать параметризации, используемые в модели. Результаты диагностических расчётов представляют интерес сами по себе, безотносительно к прогнозу перемещения ТЦ: нам неизвестны какие-либо другие попытки моделирования перемещения ТЦ на срок более 6 суток, поскольку рост ошибок делал проведение таких расчётов бессмысленным.

3 Результаты исследования

В настоящей работе приводятся некоторые результаты квазіпрогностических расчётов перемещения ТЦ сезона 2003 года. Под квазіпрогностическими имеются в виду расчёты, в которых по-прежнему в течение всего времени жизни ТЦ в качестве полей скорости ВП и интенсивности ТЦ используется объективный анализ соответствующих величин. При этом, однако, параметры модели 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, квазіпрогностические расчёты отличаются от прогностических тем, что в случае реального прогноза на прогностическом периоде вместо объективного анализа полей скорости ВП и интенсивности ТЦ будет использоваться прогноз соответствующих величин.

В качестве примера на рис. 2–5 приведены результаты квазіпрогностических расчётов для ряда ТЦ. Метки на траекториях проставлены через 12 часов, траектории с кружками – расчётные. Первые две цифры – порядковый региональный номер ТЦ в сезоне 2003 года, символ “w” соответствует северо-западу Тихого океана, символ “a” – северо-западу Атлантического океана. В скобках приведена ошибка положения ТЦ на момент начала квазіпрогноза и далее ошибки квазіпрогноза на первые, вторые, третьи и т.д. сутки. По горизонтали отложена долгота в градусах (восточной долготе соответствуют положительные значения), по вертикали – широта. Значения параметров модели выбирались из условия минимума средней в течение предпрогностического периода ошибки расчёта.

Ранее при проведении теоретических исследований в рамках ГММ была обнаружена неустойчивость траекторий вихрей, моделирующих ТЦ: в определённых случаях малые изменения параметров вихря или модельной синоптической обстановки приводят к смене типа траектории вихря [9]. Это же демонстрируют диагностические [10] и квазіпрогностические расчёты. Как правило, ошибки на предпрогностическом периоде малы и близки друг к другу в целой области W значений параметров модели. При этом возможны две ситуации.

В большинстве случаев квазіпрогностические траектории, посчитанные при различных значениях параметров модели из области W , одного типа и достаточно близки друг к другу. Об этом можно говорить как об устойчивости траекторий. При этом удовлетворительным критерием выбора параметров является условие минимума средней в течение предпрогностического периода ошибки расчёта. Это хорошо демонстрируют приведённые выше результаты квазіпрогнозов для ряда ТЦ.

Рис.2 – ТЦ 212003w. Квазипрогноз на 8 суток, предпрогностический период двое суток. Ошибки (33), 95, 241, 150, 89, 157, 43, 137, 24 км.

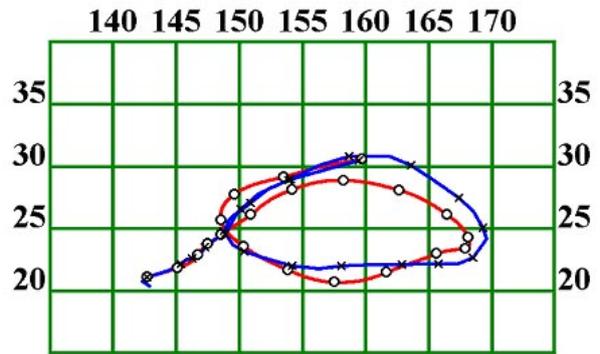


Рис.3 – ТЦ 102003a. Квазипрогноз на 9 суток, предпрогностический период двое суток. Ошибки (26), 164, 203, 289, 386, 523, 346, 105, 101, 216 км.

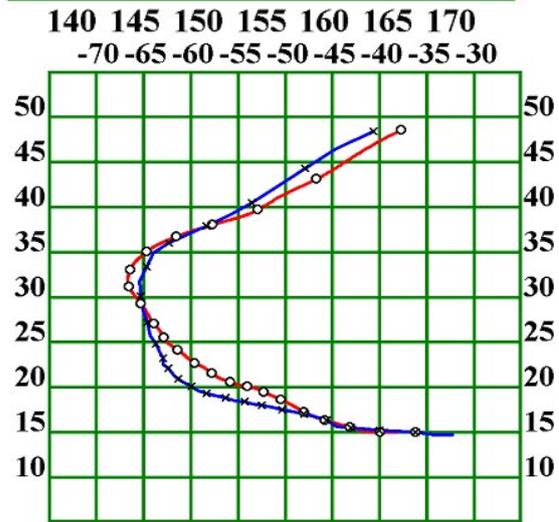


Рис.4 – ТЦ 132003a. Квазипрогноз на 9.5 суток, предпрогностический период 3 суток. Ошибки (79) 159, 223, 244, 210, 130, 185, 237, 321, 574 км.

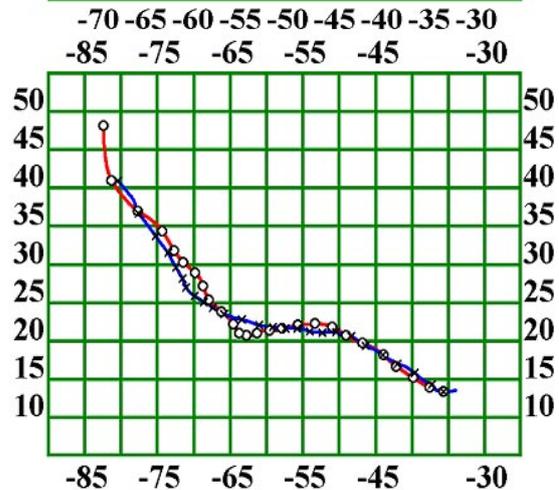
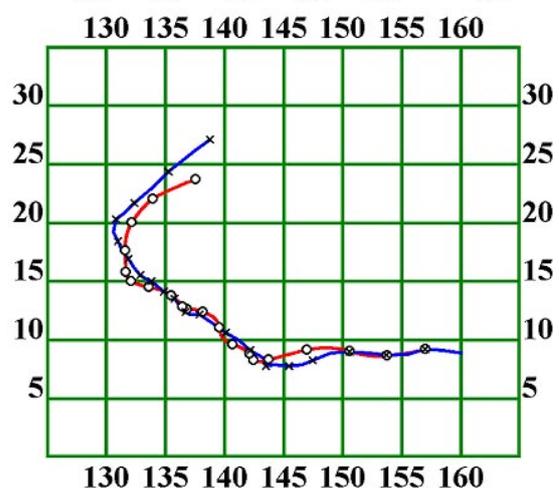


Рис.5 – ТЦ 262003w. Квазипрогноз на 8.5 суток, предпрогностический период 1 сутки. Ошибки (5) 203, 30, 222, 150, 226, 208, 306, 299 км.



Наряду с этим встречаются ситуации, когда квазіпрогностическіе траектории, посчитанные при различных значениях параметров модели из области W , весьма сильно отличаются друг от друга и могут быть разных типов. Об этом можно говорить как о неустойчивости траекторий по отношению к малым изменениям параметров модели. Тем не менее, и в этом случае ГММ при соответствующих значениях параметров в диагностическом режиме достаточно корректно описывает перемещение ТЦ [10]. Отсюда следует вывод: неустойчивость в указанном выше смысле внутренне присуща перемещению ТЦ. Это может являться объективной причиной плохого качества прогнозов в определённых ситуациях. Самым простым решением при этом будет вообще не давать прогноз перемещения ТЦ. Возможны и другие подходы, связанные, например, с оценкой на предпрогностическом периоде вероятности реализации тех или иных значений параметров модели. Важно отметить, что вопрос об устойчивости либо неустойчивости траектории может быть решён в каждом конкретном случае прогноза заранее путём перебора траекторий, соответствующих различным значениям параметров модели из области W . Подчеркнем, что выше речь шла о неустойчивости траекторий на момент прогноза и на срок прогноза. Так, если ТЦ миновал “точку” неустойчивости, то область W , соответствующая малым ошибкам предпрогностического периода, резко сокращается, а сама траектория далее может быть вполне устойчивой.

4 Выводы

Проведённые расчёты дают представление об уровне ошибок прогноза перемещения ТЦ, который может быть достигнут в рамках разрабатываемого метода в перспективе, по мере уменьшения ошибок прогноза крупномасштабного поля ветра и ошибок прогноза интенсивности ТЦ. Со временем прогнозы крупномасштабного поля ветра и интенсивности ТЦ будут приближаться к объективному анализу, откуда следует, что ошибки прогноза перемещения ТЦ будут стремиться к ошибкам квазіпрогноза. В свою очередь, вполне вероятно, что ошибки квазіпрогноза будут уменьшаться по мере улучшения качества объективного анализа крупномасштабных полей ветра и интенсивности ТЦ.

В целом, проведённые расчёты демонстрируют возможность корректного определения параметров модели по части траектории ТЦ, соответствующей предпрогностическому периоду. Это позволяет положить ГММ в основу разработки нового метода прогноза перемещения ТЦ.

Литература

1. *Chan, J.C.L.*, (2005) The physics of tropical cyclone motion. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 37, pp. 99–128.
2. *Chan, J.C., R. Williams.* (1987) Analytical and numerical studies of the Beta-Effect in tropical cyclone motion. Part 1: Zero mean flow. *J. Atmos. Sci.*, Vol.44, No. 9, pp. 1257–1265.
3. *Dong, K., C.J. Neumann* (1986) The relationship between tropical cyclone motion and environmental geostrophic flows. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 114, No. 1, pp. 115–122.
4. *Jones, R.W.* (1977) Vortex motion in a tropical cyclone model. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 34, pp. 1518–1527.
5. *Kuo, H.L.* (1969) Motion of vortices and circulating cylinder in shear flow with friction. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 26, pp. 390–398.

6. Петров А.Г. Реакции, действующие на малое твёрдое тело в плоскопараллельном вихревом потоке. – ДАН СССР, т. 238, № 1, 1978, с. 33–35.
7. Хаин А.П. Математическое моделирование тропических циклонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1989, 246 с.
8. Шмерлин Б.Я. Использование гидромеханической модели для описания перемещения тропических циклонов. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. – Обнинск, Институт экспериментальной метеорологии, 1989, 173 с.
9. Шмерлин Б.Я. Некоторые исследования устойчивости траекторий тропических циклонов в рамках гидромеханической модели. – Тр. 3-го Междунар. симпоз. “Тропическая метеорология”. – Л.: Гидрометеиздат, 1987, с. 292–307.
10. 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.
11. Якимов Ю.Л. Движение цилиндра в произвольном потоке идеальной несжимаемой жидкости. – Изв. АН СССР, МЖГ, № 2, 1970, с. 202–204.

“Queasyprognostic” calculations of tropical cyclones motion

Abstract. *Within a framework of the hydromechanical model (HMM) of a tropical cyclone (TC) motion, the “queasyprognostic” calculations of TC’s movement are carried out during the 2001 and 2003 year seasons. A TC motion is defined by a large scale wind field and TC intensity. “Queasyprognostic” means, that an objective analyses of a large scale wind field and an objective analyses of a TC intensity are used during an all life cycle of a TC. The model contains parameters describing a size of a TC and a distribution of a tangential wind of a TC. It is shown, that an appropriate choice for everyone TC of meanings of these parameters (constants) during a “beforeprognostic” period, provides enough good agreement between an actual and calculated tracks of various types for a “queasyprognostic” period up to 9 days. A duration of a “beforeprognostic” period in the case of a real prognostic calculations corresponds to a period, for which information about a privies TC motion is available. Thus, model parameters may be enough correctly defined during a “beforeprognostic” period. The HMM may be taken as a base for a development of the new track prediction model.*

Keywords: *tropical cyclones, tangential wind, “queasyprognostic” calculations of TC’s movement.*