

УДК 551.5.001.57

В.В.КРОХИН, Б.Е.ЛАМАШ

Использование численной модели высокого разрешения HWRF для прогноза траектории и эволюции тайфунов северо-западной части Тихого океана

Рассматриваются вопросы адаптации региональной модели высокого разрешения HWRF для прогноза траектории и эволюции тропических циклонов северо-западной части Тихого океана на примере тайфуна TALAS 2011 г. Подробно проанализирована ситуация выхода TALAS к восточным берегам Приморского края.

Ключевые слова: тропический циклон, региональная гидродинамическая модель, методы прогноза тропических циклонов.

Using of HWRF numerical model of the high resolution for forecast of the trajectory and evolution of typhoons for the Northwest Pacific. V.V.KROKHIN (Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok), B.Ye.LAMASH (Far Eastern Federal University, Vladivostok).

The questions of adaptation of the high resolution HWRF regional model for forecast of the trajectory and evolution of tropical cyclones for the Northwest Pacific are considered in this article on example of the typhoon TALAS 2011. The situation of the TALAS output to eastern coast of Primorye is fully considered.

Key words: tropical cyclone, regional hydrodynamic model, forecast methods of tropical cyclones.

Тропические циклоны (ТЦ) являются одними из самых интенсивных вихревых объектов синоптического масштаба, образующихся над океанами. Их выход на побережье и даже только косвенное влияние на районы российского Дальнего Востока приводят к человеческим жертвам и значительному экономическому ущербу. В связи с этим разработка методов прогнозирования положения и эволюции ТЦ (в частности, для северо-западной части Тихого океана) – часто единственный способ уменьшения наносимого ими вреда.

Несмотря на длительный (более 50 лет) опыт оперативного прогнозирования гидрометеорологических параметров, знания о физических процессах, протекающих в атмосфере, и в особенности в интенсивных атмосферных вихрях – тропических циклонах, до сих пор остаются неполными [15, 17]. Также можно отметить фактическое отсутствие функционирующих в оперативном режиме отечественных ураганных моделей, прогностическая продукция которых могла бы быть востребована дальневосточными подразделениями Росгидромета.

*КРОХИН Владимир Валерьевич – кандидат географических наук, заведующий отделом (Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток), ЛАМАШ Борис Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор (Дальневосточный федеральный университет, Владивосток). *E-mail: VKrokhin@ferhri.ru

Работа выполнена в рамках тем федерального заказа Росгидрометцентра «Развитие технологий краткосрочных прогнозов опасных метеорологических явлений и тропических циклонов на территории Дальнего Востока с использованием модели WRF» и госконтракта ДВФУ «Технологии мониторинга и прогнозирования опасных синоптических процессов для дальневосточных приморских территорий» (№ 16.515.12.5005).

Наиболее распространенным и достаточно практичным подходом является совместная эксплуатация глобальной и региональной моделей. При этом для региональной (мезомасштабной) модели необходимы начальные данные глобального моделирования для спецификации краевых условий [17]. Отметим, однако, что в настоящее время активно развивается альтернативный вариант: использование глобальной модели с переменным разрешением – например, модели ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [11].

Цель настоящей работы – оценка возможности оперативного использования моделей высокого разрешения семейства WRF (The Weather Research and Forecasting Model) для прогноза и эволюции ТЦ, выходящих или косвенно влияющих на российский Дальний Восток. Это особенно актуально в связи с растущей в результате климатических изменений энергетикой ТЦ.

Известно, что использование при численном прогнозировании ТЦ региональных моделей, особенно применительно к районам, подверженным выходу и влиянию ТЦ, имеет особую специфику [2, 4, 5, 7]. Во-первых, это повышение точности прогностической модели, во-вторых, выбор подходящего метода инициализации данных о ТЦ, в-третьих, возможность улучшения прогноза за счет ассимиляции фактических данных о ТЦ на момент прогноза.

Первая проблема решается: а) в модели ANW (Advanced Hurricane WRF) – «тайфунного» варианта WRF-ARW (динамическое ядро ARW, сокр. от Advanced Research WRF) как за счет использования специальных параметризаций турбулентных потоков тепла и влаги в пограничном слое [9, 23], так и за счет привлечения «усеченной» модели квазиоднородного слоя океана; б) в модели HWRF (Hurricane WRF, динамическое ядро NMM [1, 22], сокр. от Nonhydrostatic Mesoscale Model) путем использования «ураганных» параметризаций глубокой конвекции, турбулентных потоков тепла и влаги в пограничном слое и т.д. Дополнительно предусмотрена возможность объединенного моделирования с моделью океана POM (Princeton Ocean Model) для учета эффекта апвеллинга холодных вод в районе ТЦ [15].

Вторая проблема следует из того факта, что ТЦ в своем большинстве развиваются над океанами, незначительно охваченными метеорологическими данными. В силу этого ТЦ получается недостаточно глубоким и размытым, слабо выраженным в поле объективного анализа или вовсе не выраженным [5]. Для того чтобы должным образом описать ТЦ в начальных полях модели, необходимо решить так называемую задачу инициализации ТЦ (инициализации вихря).

Первые упоминания о методах инициализации данных о ТЦ в метеорологической литературе, именуемые в англоязычной научной среде как «bogussing», восходят еще к работам Г.Деппермена и Г.Риля [6, 10]. Обширный обзор различных подходов при инициализации вихря дан в работе Л.М.Лесли и Г.Холланда [19]. Общие черты этих методов инициализации вихря ТЦ – выделение области с ТЦ-циркуляцией, перенос центра ТЦ в точку с истинными координатами, удаление исходной и внедрение «искусственной» ТЦ-циркуляции. Добавим, что при этом «искусственный» ТЦ может быть не вполне согласован с окружающим его потоком, и модели обычно требуется некоторое время для восстановления нормальной структуры ТЦ [16, 18].

В схеме инициализации по методике модели HWRF, разработанной в лаборатории геофизической гидродинамики (GFDL) Принстонского университета (США), предусматривается разделение начального поля анализа на фоновый поток и, собственно, саму ТЦ-циркуляцию [18]. В свою очередь, ТЦ-циркуляция в дальнейшем строится из двух составляющих: симметричной и несимметричной.

Схема инициализации ТЦ, разработанная в Национальном центре атмосферных исследований США (NCAR), включена в модель WRF-ARW [23]. На основе решения реверсивного уравнения баланса ТЦ-циркуляция строится на замене исходного вихря в пределах

300 км радиуса на «поддельный» осесимметричный вихрь Рэнкина по данным о максимальном ветре.

Третья проблема – согласование данных анализа и прогноза в окрестности ТЦ [16]. Ее решение позволяет «автоматически» решить предыдущую (инициализация вихря ТЦ), однако требует выделения значительных вычислительных ресурсов и наличия цифровой информации, доступной не для всех метеорологических агентств. Поэтому здесь данная задача не решается.

В работе использована модель HWRF, собранная и настроенная авторами данной статьи на Дальневосточный регион. Ниже представлены некоторые результаты верификации модели HWRF.

Нами исследован тайфун TALAS как самый типичный для августа–сентября 2011 г., оказавший существенное влияние на погодные условия юга Дальнего Востока России. ТЦ TALAS был сравнительно неглубоким, но необычно большим по площади, вызвавшим многочисленные жертвы и разрушения на территории Японии.

Краткое описание модели и исходных данных

Полное описание конфигурации модели HWRF содержится в документации [15], здесь приведены лишь основные детали. Особенностью конфигурации модели HWRF является то, что она специально разработана для работы с ТЦ. Это касается как формирования расчетного региона, шага сетки, физических параметризаций, так и совместной работы с моделью океана POM. В связи с тем что в настоящее время модель океана POM не настроена разработчиками на северо-западную часть Тихого океана, при расчетах модель HWRF запускали в одиночном режиме, т.е. без модели POM. Верификацию модели высокого разрешения HWRF проводили на основе оценок квазиоперативных прогнозов положения ТЦ.

Расчетная область для модели HWRF состояла из материнской сетки $80 \times 80^\circ$ с шагом $0,18^\circ$ (около 27 км) и вложенной сетки с шагом $0,06^\circ$ (область размером приблизительно $6 \times 6^\circ$), двигающейся вслед за ТЦ. Во время счета положение модельного ТЦ вместе с вложенной сеткой отслеживали по максимуму относительного вихря.

Приведем краткий перечень физических параметризаций модели HWRF для тропической зоны:

1) параметризация подстилающей поверхности: однослойная схема «GFDL SLAB» с постоянным коэффициентом теплопроводности [15];

2) параметризация приземного слоя: схема по Монину–Обухову с масштабом шероховатости по Зилитинкевичу [15];

3) параметризация планетарного пограничного слоя: схема высокого разрешения GFS PBL с неявным представлением слоя вовлечения как части нелокального по К-слою смешения [15];

4) глубокая конвекция параметризуется на основе подхода «потока массы» по Аракаве–Шуберту [8];

5) схема параметризации для микрофизических процессов Феррье, описывающая многофазные процессы в облаках [13];

6) параметризация радиации по методу Лаборатории геофизической гидродинамики (GFDL) США: в схеме учитывается поглощение водяным паром, диоксидом углерода, озоном, а также микрофизические эффекты [12, 19]. Радиация в экспериментах рассчитывалась каждые 30 мин.

В качестве исходных данных для модели HWRF использовали прогнозы Глобальной системы прогнозов Национального центра экологического прогноза США (GFS NCEP) с широтно-долготным разрешением $1 \times 1^\circ$ [21]. При численном интегрировании применяли переопределенные граничные условия, т.е. все переменные задавали во всех точках

боковой границы. Шаг по времени составлял 54 с. При подготовке информации об орोगрафии и свойствах подстилающей поверхности для модели HWRP использовали наборы данных на основе глобальной цифровой модели рельефа Геологической службы США с 10-минутным разрешением (примерно 19,5 км) [21].

В качестве истинных координат ТЦ использовали данные текстовых телеграмм Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC), оперативно обновляющихся на серверах Глобальной системы прогнозов Национального центра экологического прогноза США [14]. В данной работе задача определения истинного центра ТЦ не ставилась.

Анализ ошибок прогноза перемещения ТЦ TALAS

Всего обчислено 19 ситуаций (траекторий ТЦ TALAS). Расчеты выполняли со сдвижкой 12 ч (старт с 00 ч и 12 ч ВСВ), чтобы по возможности уменьшить сериальную корреляцию оценок прогноза траектории ТЦ. В качестве основного показателя успешности прогноза положения ТЦ использовали абсолютную ошибку прогнозов положения ТЦ, т.е. расстояние между фактическим и прогностическим положениями центров в срок прогноза [3].

Принимая во внимание величины допустимых ошибок при прогнозе перемещения тропических циклонов в соответствии с работой [3], можно констатировать хорошее качество прогноза, полученного с использованием модели HWRP (см. таблицу). Добавим, что средняя ошибка прогноза перемещения ТЦ TALAS моделью HWRP находится на уровне ошибки официального прогноза JTWC за 2006–2010 гг. [22].

Результаты испытаний прогнозов перемещения ТЦ TALAS (август–сентябрь 2011 г.) с помощью модели HWRP

Δt	N	Повторяемость прогнозов, % с различной Δг, км				Δг, км
		< 200	201–400	401–600	>600	
12	19	100	0	0	0	50
24	18	100	0	0	0	89
36	18	80	20	0	0	144
48	14	35	44	14	7	235
60	14	28	58	7	7	290
72	13	7	78	15	0	310

Примечание. Δt – заблаговременность в часах, N – число прогнозов, Δг – ошибка в прогнозе положения барических образований.

Пример прогноза ТЦ TALAS

В качестве примера прогноза выбрана синоптическая ситуация, наблюдавшаяся 2–5 сентября 2011 г. во время переваливания ТЦ TALAS через Японские острова и его выхода в Японское море.

К 2 сентября ТЦ TALAS приблизился к южному побережью Японии. К этому времени он усилился, скорость ветра составляла 35–50 м / с, радиус максимальных штормовых ветров достиг 220 км. Приморское управление Гидрометеослужбы (ПУГМС) официально рассматривало три варианта развития событий:

- 1) тайфун остановится над Японским морем и будет заполняться. Однако такая ситуация больше характерна для июля–августа, чем для сентября;
- 2) антициклон не сможет заблокировать ТЦ, и последний пойдет по Татарскому проливу на север Сахалина. Этот вариант в ПУГМС приняли в качестве рабочего;
- 3) антициклон заблокирует Татарский пролив и Охотское море. ТЦ должен пойти через бухту Преображения в направлении г. Хабаровск.

В качестве примера нами рассчитана прогностическая траектория ТЦ (рис. 1). Стартовая дата (00 ч ВСВ 3 сентября) выбрана из расчета того, чтобы получить нужный ответ по данным прогноза с заблаговременностью трое суток именно 3–4 сентября, когда ТЦ TALAS был заблокирован антициклоном. Заметим, что 3 сентября ТЦ TALAS находился южнее о-ва Хонсю, и ему потребовались сутки для того, чтобы перевалить Японские острова.

Сравнительный визуальный анализ прогностических и фактической траекторий ТЦ TALAS (рис. 1) показал, что модель HWRP предсказала направление перемещения ТЦ как комбинацию 2-го и 3-го вариантов, принятых ПУГМС.

Также авторами сделана попытка оценить способность модели HWRP помимо прогнозирования траектории ТЦ воспроизводить мезомасштабные поля гидрометеорологических элементов (на примере полей приземного давления и осадков).

Приведем пример анализа за 12 ч ВСВ 5 сентября 2011 г. Незадолго до этого, 4 сентября, начавший трансформацию во внетропический шторм ТЦ TALAS вышел в Японское море и стал оказывать влияние на побережье Приморского края. В ночь на 5 сентября он заполнился (давление в его центре выросло до 994 гПа) и превратился в обыкновенный внетропический шторм. 5 сентября в 00 ч ВСВ он находился в центральной части Японского моря, в течение следующих суток сместился на север, к юго-восточному побережью Приморья. К этому времени ТЦ TALAS уже трансформировался во внетропический шторм, что можно видеть на прогностической карте на эту дату (рис. 2). Модель качественно верно предсказала «растягивание» области низкого давления в шторме преимущественно в широтном направлении.

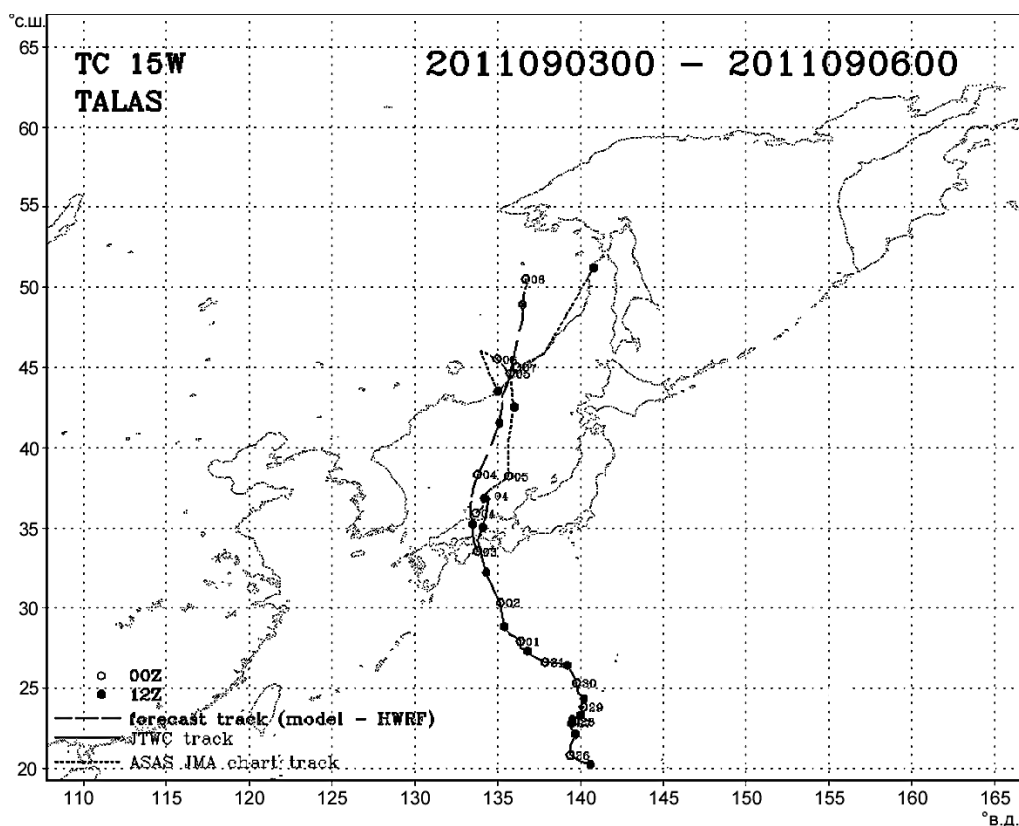


Рис. 1. Пример прогноза траектории ТЦ TALAS с 00 ч ВСВ 3 сентября 2011 г. на 72 ч. Крупным пунктиром обозначена прогностическая траектория по данным JTWC, сплошной линией – фактический путь ТЦ TALAS до момента трансформации во внетропический циклон к 4 сентября 00 ВСВ по данным JTWC, мелким пунктиром – дальнейшая фактическая траектория внетропического циклона по данным Японского метеорологического агентства (ASAS JMA)

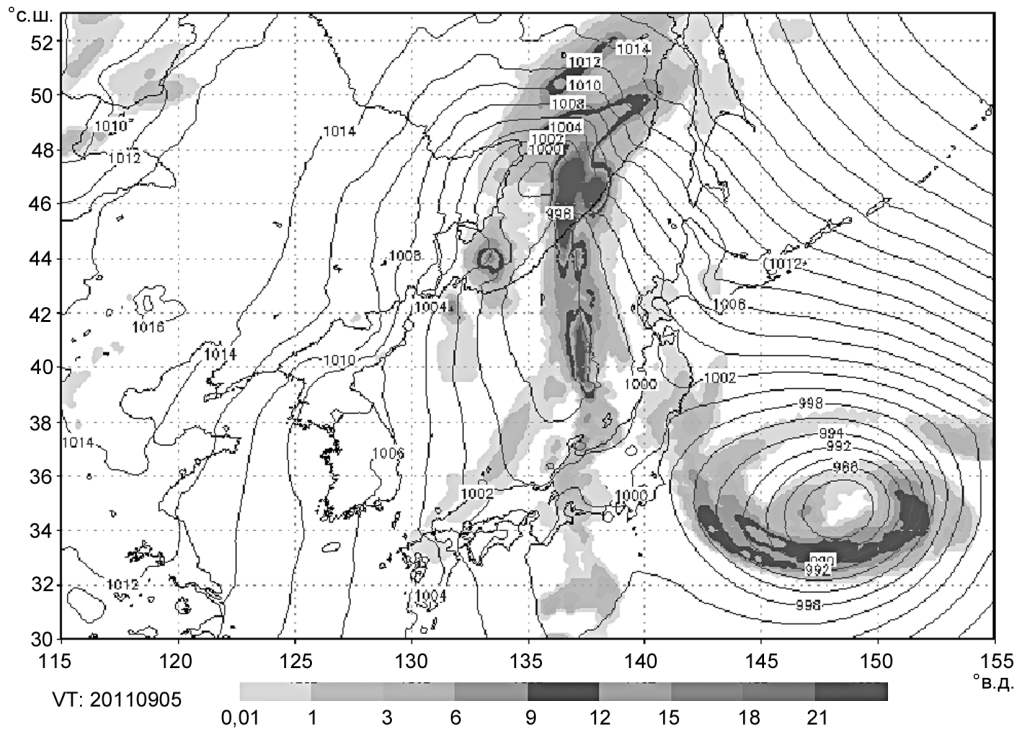


Рис. 2. Прогноз приземного поля давления и трехчасовых сумм осадков (в мм) по данным модели HWRP на 12 ч ВСВ 5 сентября 2011 г. с заблаговременностью 36 ч. VT – Verify Time (фактическая дата прогноза)

Добавим, что визуальный анализ прогностических данных по осадкам, проведенный авторами, выявил хорошее визуальное совпадение изогет поля осадков на холодном фронте (рис. 2) и конфигурации области радиолокационной засветки с интенсивностью более 20 мм / ч. Модель HWRP правильно предсказала большое количество осадков на восточном побережье и практически полное их отсутствие на крайнем западе и юго-западе Приморья. По данным ПУГМС уже в ночь на 5 сентября в восточной половине края начались дожди разной интенсивности. Всего же за 5 сентября и ночь 6 сентября количество осадков, выпавших в восточных районах, составило 150–200 мм (1–2 месячные нормы). Западные и юго-западные районы Приморского края, в том числе и г. Владивосток, оказались в тыловой части бывшего ТЦ. Здесь проходили небольшие, местами умеренные дожди с грозами. По данным ПУГМС, на побережье зарегистрировано усиление северных ветров – до 20–25 м/с, на мысах – с порывами до 35 м/с.

Таким образом, по результатам предварительных расчетов и анализа успешности прогноза траектории ТЦ TALAS можно заключить, что рассматриваемая в работе модель HWRP соответствует уровню официального прогноза JTWC. Ее применение имеет хорошие перспективы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д. Информация о модели общего пользования WRF-NMM. М.: Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Главный вычислительный центр, 2007. 124 с.
2. Гончуков Л.В., Ламаш Б.Е. Численный прогноз опасных явлений погоды по северу Приморского края // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 6. С. 17–23.

3. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов / РД 52.27. 284. 91. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 150 с.
4. Наумов А.Д., Николаева А.В. Использование региональной ETA-модели для прогноза траекторий тропических циклонов по данным Гидрометцентра России // *Метеорол. и гидрология*. 2003. № 1. С. 33–40.
5. Похил А.Э., Зайченко М. Ю. Исследование влияния структуры инициализированного вихря на расчет перемещения ТЦ на основе ETA-модели // *Метеорол. и гидрология*. 2005. № 2. С. 68–77.
6. Риль Г. Тропическая метеорология: пер. с англ. М.: Иностран. лит., 1963. 364 с.
7. Ярошевич М.И., Ингель Л.Х. Диагноз взаимодействия тропических циклонов // *Изв. РАН. Физика атмосферы океана*. 2006. Т. 42, № 6. С. 766–770.
8. Arakawa A., Schubert W.H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. // *J. Atmos. Sci.* 1974. Vol. 31, N 3. P. 674–701.
9. Charnock H. Wind stress on a water surface // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1955. Vol. 81. P. 639–640.
10. Deppermann C. Notes on the origin and structures of Philippine typhoons // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1947. Vol. 28. P. 399–404.
11. Deque M., Piedelievre J.P. High resolution climate simulation over Europe // *Clim. Dyn.* 1995. Vol. 11. P. 321–339.
12. Fels S.B., Schwarzkopf M.D. The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations // *J. Atmos. Sci.* 1975. Vol. 32. P. 1475–1488.
13. Ferrier B.S. An efficient mixed-phase cloud and precipitation scheme for use in operational NWP models // *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*. 2005. Vol. 86 (18). P. A42A-02.
14. Format of the tropical cyclone vital statistics record. – http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data_processing/tcvitals_description.htm (дата обращения: 25.01.2012).
15. Gopalakrishnan S., Liu Q., Marchok T. et al. Hurricane Weather and Research and Forecasting (HWRF) Model 2011 Scientific Documentation, Technical Report // Boulder. Developmental Tested Center. – http://www.dt-center.org/HurrWRF/users/docs/scientific_documents/HWRFScientificDocumentation_August2011.pdf. (дата обращения: 25.01.2012).
16. Hsiao Ling Feng, Liou Chi Sann, Yeh Tien Chiang. A vortex relocation scheme for tropical cyclone initialization in advanced research WRF // *Monthly Weather Review*. 2010. Vol. 138, N 8. P. 3298–3315.
17. Kalnay E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge: University Press, 2003. 340 p.
18. Kurihara Y., Tuleya R.E., Ross R.J. Improvements in the GFDL hurricane prediction system. // *Monthly Weather Review*. 1995. Vol. 123, N 9. P. 2791–2801.
19. Lacis A.A., Hansen J.E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere // *J. Atmos. Sci.* 1974. Vol. 31. P. 118–133.
20. Leslie L.M., Holland G.J. On the bogussing of tropical cyclones in numerical models: A comparison of vortex profiles // *Meteor. Atmos. Phys.* 1995. Vol. 56. P. 101–110.
21. NOAA's Global Forecast System Homepage. – <http://www.emc.ncep.noaa.gov/> (дата обращения: 25.01.2012).
22. Sampson C.R., Wittmann P.A., Tolman H.L. Consistent Tropical Cyclone Wind and Wave Forecasts for the U.S. Navy // *Weath. Forecasting*. 2010. Vol. 25, N 4. P. 1293–1306.
23. Skamarock W.C. (ed.) A Description of the Advanced Research WRF Version 3: NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2010. 113 p. – http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf (дата обращения: 25.01.2012).
24. User's Guide for NMM core of Weather Research and Forecasts (WRF) modeling system version 3 (view complete document in pdf). 2011. 201 p. – http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/docs/user_guide/V3/users_guide_nmm_chap1-7.pdf (дата обращения: 25.01.2012).