

*В. В. Крохин, Г. Г. Баранов, Л. И. Евдокимова, М. Б. Моисеев,
А. Ю. Филь, ФГБУ «ДВНИГМИ», г. Владивосток*

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

1. Введение

Прогнозирование положения и эволюции тропических циклонов (ТЦ), влияющих на российский Дальний Восток, и доведение информации о них до потребителей выполняется в настоящее время в оперативных подразделениях Росгидромета, в основном, на базе прогностической продукции отечественных и зарубежных глобальных моделей. В ряде управлений Гидрометслужбы и научно-исследовательских учреждениях Росгидромета, с 1997 года ведутся работы по адаптации региональных негидростатических гидродинамических моделей высокого разрешения на регион Дальнего Востока [1, 2, 4, 5].

Однако гидродинамическое прогнозирование тропических циклонов имеет свою специфику. Тропические циклоны в большинстве своем развиваются над морями и океанами, сравнительно слабо охваченными метеорологическими данными. В силу этого, ТЦ получаются недостаточно глубокими и размытыми, слабо выраженными в поле объективного анализа, или не выраженными вовсе [7]. Поэтому, региональные гидродинамические модели, должны определенным образом, инициализировать область тропического вихря, для того, чтобы его вертикальная структура была адекватной.

Наиболее авторитетные (в плане прогноза ТЦ) зарубежные прогностические центры - NCEP в США и JMA в Японии – имеют свои

автоматизированные прогностические комплексы, корректно учитывающие вклад ТЦ в циркуляцию по области расчета [11, 19]. В России прогностического комплекса такого плана еще не существует, хотя в Гидрометцентре России исследования при помощи гидродинамических моделей ETA и WRF (NMM) также ведутся в течение последних десяти лет [5, 7, 8]. Добавим, что первая попытка создания технологической линии прогноза ТЦ (на основе комплексного метода ДВНИГМИ) была предпринята в отделе метеорологии и тропических циклонов под руководством В.П. Тунеголовца [6]. Однако комплексный метод прогноза ТЦ ДВНИГМИ не является полностью автоматизированным и требует ручного ввода информации о ТЦ.

Таким образом, создание отечественной автоматизированной системы прогноза (АСП) положения и эволюции ТЦ на базе региональных гидродинамических моделей представляется важной и актуальной задачей. Различного рода требования к созданию АСП ТЦ приведены во втором разделе.

Не менее важным представляется вопрос о выборе конкретных региональных гидродинамических моделей для использования в АСП ТЦ. В АСП ТЦ ДВНИГМИ предполагается использовать две региональные гидродинамические модели семейства WRF - Hurricane WRF (HWRF) и Advanced Hurricane WRF (AHW), разработанные в NCEP/NCAR [17, 23, 24]. Возможные конфигурации данных моделей обсуждаются в третьем разделе статьи.

Использование моделей HWRF и AHW обосновывается предварительными результатами квазиоперативных испытаний этих моделей (во время сезона тайфунов 2011 года). В четвертом разделе приводятся оценки квазиоперативных прогнозов положения центра ТЦ,

а также минимального давления и скорости максимального ветра. В пятом разделе помещены оценки прогнозов полей некоторых метеорологических элементов в окрестностях ТЦ на основе программного комплекса MET (Model Evaluation Tools), разработанного в [14]. Шестой раздел посвящен проблеме анализа грубых ошибок гидродинамических моделей семейства WRF с привлечением результатов прогнозов контрольной модели. В качестве контрольной предполагается использовать модифицированную региональную модель Лосева В.М. с искусственным потоком пара.

В заключении сформулированы общие выводы, полученные в процессе работы по созданию АСП ТЦ, подчеркивается научная и практическая ценность полученных результатов по проблематике прогнозирования ТЦ.

2. Принципы работы АСП-ТЦ ДВНИГМИ

В настоящей статье делается попытка выработать основные принципы работы АСП-ТЦ ДВНИГМИ. Определим, для ясности, термин «технологическая линия» как совокупность этапов, составляющих процесс автоматизированной подготовки прогноза.

Основное назначение технологической линии прогноза положения и эволюции ТЦ, очевидно, состоит в обеспечении регулярного поступления синоптику рассчитанных оперативных прогностических данных о ТЦ. Поэтому принципы работы АСП-ТЦ ДВНИГМИ будут закономерно вытекать из требований к прогнозу ТЦ.

Прогнозирование с использованием моделей численного прогноза погоды связано с высокой вычислительной сложностью прогнозов и требует применения высокопроизводительной

вычислительной техники. Генерация прогнозов с высоким пространственным разрешением усложняется с увеличением горизонтального разрешения модели в связи с быстрым ростом необходимых вычислительных ресурсов, а именно квадратичным ростом объема необходимой памяти и кубическим ростом времени вычисления. Таким образом, наличие современного быстродействующего компьютерного оборудования является необходимым залогом качественного и своевременного прогноза.

Таким образом, одно из первых основных требований к АСП-ТЦ – наличие достаточных вычислительных ресурсов. Существуют различные оценки и подходы. Например, в [1] приводятся цифры по быстродействию не менее 20 терафлопс с наличием оперативной памяти не менее 10 терабайт. Более корректной можно считать точку зрения специалистов ГМЦ России: «...оперативный прогноз налагает ограничение на допустимое время счета модели (как правило, не более 20 мин астрономического времени для прогноза на 24 часа)...» [10].

До недавнего времени ОМТЦ ДВНИГМИ не располагал сколько угодно существенными вычислительными ресурсами для решения оперативных задач прогноза ТЦ. В 2011 году ДВНИГМИ получил новый высокопроизводительный вычислительный комплекс ALTIX UV-100. Вычислитель состоит из 8 восьмиядерных процессоров Intel Xeon E7-8837 2.67GHz с оперативной памятью 32 GB на одно ядро – всего 256 GB. Система хранения данных включает в себя дисковую систему общей емкостью 10 TB. Комплекс обслуживается системами бесперебойного питания, стабилизации температурно-влажностного режима и пр.

Операционная система вычислителя представляет собой SUSE Linux Enterprise 11.2. На вычислителе установлены все необходимые

средства разработки C/C++, FORTRAN, специализированная библиотека SGI MPT для распараллеливания вычислительных процессов, средства удаленного управления из консоли и т.д.

Заметим, однако, что по производительности (пиковая – 0,5 терафлопс) комплекс SGI ALTIX UV-100 уступает установленному в РСМЦ Хабаровск комплексу G-Scale S4700 с его 0,7 терафлопс, но превосходит по мощности вычислитель Приморского УГМС SGI ALTIX-450 с 80 гигафлопс.

По аналогии с [10], но с некоторыми изменениями, первая версия научно-оперативная технологическая линия прогноза АСП-ТЦ, разрабатываемая в Отделе Метеорологии и Тропических Циклонов (ОМТЦ) ДВНИГМИ, включает в себя следующие программные единицы:

1) подсистема подготовки (закачки) начальных данных в коде GRIB1/GRIB2 по расписанию. Это могут быть как оперативные данные Global Forecast System с разрешением 0,5-1 градус, так и исторические NCEP Final Analysis с градусным разрешением;

2) программный комплекс моделей ANW и HWRF, включающий блоки препроцессинга WRF Preprocessing System и интегрированного постпроцессинга (WRF Unified Post Processor);

3) средства записи прогностической продукции моделей на сервера ДВНИГМИ;

4) программа расчета оценок качества прогнозов положения и эволюции ТЦ (минимальное давление, максимальный ветер);

5) программа расчета оценок качества прогнозов полей гидрометеорологических элементов в окрестности ТЦ;

6) построение прогностических карт:

- полей метеорологических элементов у земли и на изобарических поверхностях;

- траекторий ТЦ и их характеристик (например, зоны ветров);

- вертикальных разрезов (профилей) и т.д.

Вышеперечисленные операции невозможны без выполнения второго требования к работе АСП-ТЦ – обеспечения автоматической работы системы (с минимальным участием оператора). Фактически работа АСП-ТЦ первой версии осуществляется через сценарии (скрипты) управления сеансами на `bash/ksh`, при необходимости, запускаемые по расписанию (`cron`).

Добавим, что наличие вычислительных ресурсов не является достаточным условием. Очевидно, при создании АСП-ТЦ необходимо привлекать условие эффективности, т.е. применение параллельных вычислений для ускорения расчетов. Комплекс моделей семейства WRF, построенный с применением высокоуровневой библиотеки параллельных вычислений Runtime System Library в полной мере удовлетворяет этим требованиям. Кроме того, система АСП-ТЦ должна обеспечивать сравнительную простоту эксплуатации в оперативном режиме и прозрачное для конечного пользователя проведение оперативных и исследовательских расчетов.

О конфигурации ураганных моделей и методах решения задачи прогноза будет сказано в следующем разделе.

3. Конфигурация ураганных моделей

Прогноз положения и эволюции ТЦ относится к категории специализированного гидрометеорологического прогноза [3]. Специфика данного прогноза должна учитывать следующие проблемы:

1. Особенности подготовки начальных данных для прогноза (инициализация вихря), включая конфигурацию района расчетов.
2. Конфигурации ураганных моделей и особенности решения задачи прогноза, как в оперативном, так и в исследовательском режимах.
3. Постпроцессинг и представление прогностических данных.

В АСП-ТЦ авторами предлагается использовать две ураганные модификации модели WRF – ANW и HWRF. Полное описание конфигурации моделей ANW и HWRF содержится в документации [17, 23, 24]. В настоящей статье будут приведены основные детали.

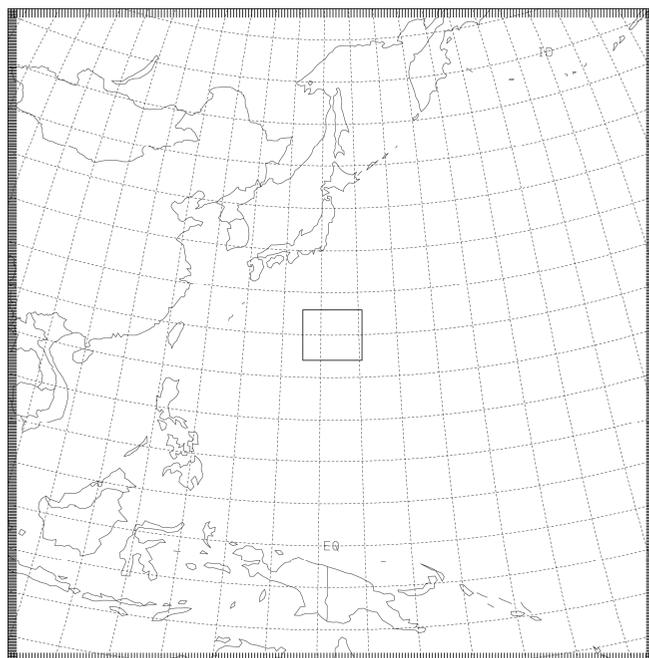
Инициализация вихря, используемая в первой версии АСП-ТЦ, основана на методе богуссинга (с англ. bogussing). Характерными чертами данного подхода является: выделение области с ТЦ-циркуляцией, перенос центра ТЦ в точку с истинными координатами, удаление исходной ТЦ-циркуляции и внедрение «искусственной» ТЦ-циркуляции. При этом «искусственный» тропический циклон может быть не вполне согласован с окружающим его потоком [18].

Особенностью конфигурации модели HWRF является то, что модель специально «заточена» под работу с ТЦ [17]. Это касается как формирования расчетного региона определенного размера, шага сетки, так и физических параметризаций.

Расчетная область для модели HWRF состоит из материнской сетки размером примерно 80x80 град с шагом 0,18 град. (около 22 км) и вложенной сетки приблизительно 6x6 град с шагом 0,06 град.,двигающейся вслед за ТЦ. Материнская сетка позиционируется относительно начального положения ТЦ. Во время счета положение модельного ТЦ вместе с вложенной сеткой отслеживается по максимуму относительного вихря. Число узлов сетки по осям x и y составляет 216 и

432 точек. Область прогноза схематично представлена на рис. 1. Внутренний прямоугольник изображает вложенную сетку на примере одного случая расчета ТЦ TALAS за 00 ВСВ 1 сентября 2011 года.

Блок инициализации вихря в модели HWRP предусматривает разделение начального поля анализа на фоновый поток и, собственно, саму ТЦ-циркуляцию [20]. В свою очередь, ТЦ-циркуляция в дальнейшем строится из двух составляющих: симметричной и несимметричной. Асимметричная часть ТЦ-циркуляции определяется исходя из временной динамики поля ТЦ.



E-GRID E WE = 216. E SN = 432. DX = 0.1800. DY = 0.1800. REF LAT = 25.000. REF LON = 141.400

Рис. 1. Схема области прогноза модели HWRP (ДВНИГМИ) на примере ТЦ TALAS за 00 ВСВ 1 сентября 2011 года

Основной набор параметризаций для модели HWRP таков [17]:

1) Параметризация подстилающей поверхности: однослойная схема «GFDL SLAB» с постоянным коэффициентом теплопроводности;

2) Параметризация приземного слоя: схема по Монину-Обухову с масштабом шероховатости по Зилитинкевичу;

3) Параметризация планетарного пограничного слоя: схема высокого разрешения GFS PBL с неявным представлением слоя вовлечения как части нелокального по K-слою смешения;

4) Глубокая конвекция параметризуется на основе подхода «потока массы» по Аракаве Шуберту;

5) Схема параметризации для микрофизических процессов Феррье, использующая процессы смешанной фазы.

Модель Advanced Hurricane WRF (AHW) содержит ядро ARW, но с использованием специальных параметризаций турбулентных потоков тепла и влаги в пограничном слое [12, 23], а также с привлечением «усеченной» модели квазиоднородного слоя океана. Блок инициализации вихря по методике NCAR включен в систему препроцессинга данных модели ARW [23]. Схема предназначена для запуска по типу холодного старта. 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 при фиксированном радиусе максимального ветра [13].

Заметим, что, в отличие от HWRF, в модели ARW/AHW не накладываемся особых ограничений на размер расчетной области и шага сетки. В текущей версии конфигурации модели AHW был использован набор из двух вложенных сеток с шагом 45 и 15 км. Заметим, что в дальнейшем, шаг сетки предусматривается уменьшить до 27 и 9 км. В текущем варианте набора сеток (материнская) область для численного моделирования представляет собой прямоугольник (в меркаторской

проекции) с приблизительными границами приблизительно $0 - 45^\circ$ с.ш., $115 - 175^\circ$ в.д. Число точек для материнской и вложенной сеток по осям x , y составляет 163, 121 и 367, 244 точек соответственно. Область прогноза схематично представлена на рис. 2.

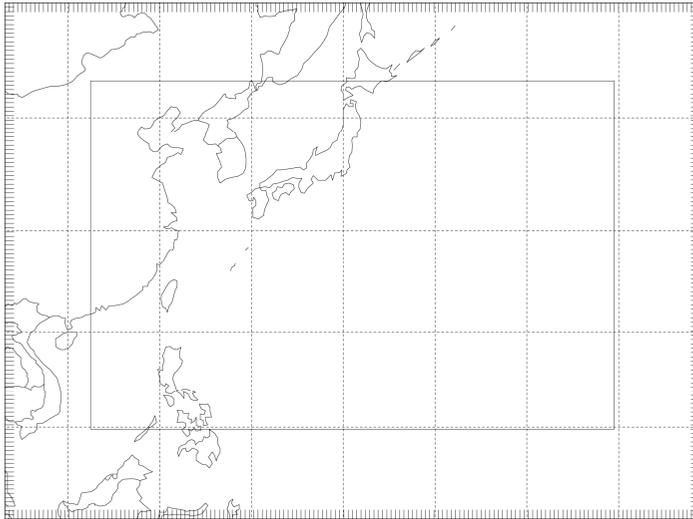


Рис. 2. Схема области прогноза модели АНУ (ДВНИГМИ)

Основной набор параметризаций для модели АНУ (ДВНИГМИ) таков [12]:

1) Параметризация подстилающей поверхности: схема Ноа (Noah). Это объединенная 4-х слойная схема NCEP/NCAR/AFWA с температурой и влажностью почвы, фрагментным снежным покрытием и физикой замороженной почвы;

2) Параметризация приземного слоя: схема по Монину-Обухову с масштабом шероховатости по Зилитинкевичу;

3) Параметризация планетарного пограничного слоя: схема Высокого разрешения Меллора-Ямада-Янича (Mellor-Yamada-Janjic) для планетарного пограничного слоя атмосферы. Иначе носит название-

схема ETA с локальным вертикальным перемешиванием в погранслое;

4) Схема конвекции по Беттсу-Миллеру-Яничу (схема ETA), отличающаяся приспособлением начальных профилей температуры и влажности за определенное время релаксации к некоторым реперным профилям, характеризующим осредненное состояние атмосферы после реализации глубокой конвекции;

5) Схема параметризации для микрофизических процессов Рейснера (Reisner-I).

При численном интегрировании в моделях HWRF и ANW применяются переопределенные граничные условия, т.е. все переменные задаются во всех точках боковой границы. Шаг по времени равен 54 сек. Потоки коротковолновой и длинноволновой радиации в экспериментах рассчитываются каждые 30 мин.

Во всех расчетах используется фактическая температура поверхности океана в предыдущие сутки по данным GFS. Расчетные данные сбрасываются в файловую систему Linux каждые 3 часа. Для подготовки информации об орографии и свойствах подстилающей поверхности используются глобальные наборы данных – наборы с 10-минутным разрешением (около 19 км). Эти данные переводятся на расчётную сетку модели.

Для интерполирования рассчитанных данных с эта-уровней на стандартные изобарические поверхности используется разработанная в NCEP система WRF Post-Processor, задачей которой является приведение выходных данных WRF к формату, пригодному для использования в метеослужбах [17, 23, 24].

Для расчета координат ТЦ на основании прогностических данных модели в АСП-ДВНИГМИ используется программный модуль GFDL

Vortex Tracker [17]. Результатом работы модуля является текстовая ATCF-телеграмма, которая служит источником для построения прогностической карты траектории ТЦ.

Для визуализации рассчитанных прогностических полей метеорологических величин, траекторий ТЦ и их анализа используется графический пакет GrADS.

4. Результаты квазиоперативных испытаний моделей HWRF и ANW

Известно, что в качестве начальных и граничных условий для модели WRF могут быть использованы данные с различным разрешением, например, исторические (NCEP Final Analysis) с шагом сетки 1x1 градус, так и оперативные - с шагом сетки 1x1 или 0,5 x0,5 град. В нашем случае, при проведении квазиоперативных испытаний численные прогнозы производились по принципу холодного старта два раза в сутки за сроки 00 и 12 ч ВСВ по данным прогнозов глобальной модели GFS с разрешением 1x1 град с заблаговременностью до 72 часов. Кроме этого, для последующей оценки результатов работы моделей рассчитывались инерционные прогнозы положения и эволюции (первого рода), основанные на принципе линейной экстраполяции во времени [3], а также официальные данные метеорологических агентств JTWC и JMA за период 2008 - 2010 гг.

Всего было обчислено от 30 до 40 случаев (в зависимости от заблаговременности) по двум тихоокеанским ТЦ за сезон 2011 года (MUIFA и TALAS) начиная со стадии Tropical Storm (TS), и заканчивая сроком перед трансформацией во внетропический циклон (L). Эти ТЦ были выбраны, как наиболее характерные для категории ТЦ, прямо или косвенно влияющих на российский Дальний Восток.

Методика оценки перемещения и эволюции тропических циклонов, используемая в квазиоперативных испытаниях, основана на [3].

В качестве основного показателя успешности прогноза положения ТЦ, использовалась абсолютная ошибка прогнозов положения ТЦ, являющаяся расстоянием между фактическим и прогностическим положениями центров в срок прогноза с точностью до 10 км.

При анализе результатов принималось, что в зависимости от значений указанных ошибок прогнозы положения ТЦ интерпретируются в следующих категориях:

– при заблаговременности 24 ч при хорошем прогнозе $\Delta r \leq 200$ км, при удовлетворительном прогнозе $201 \text{ км} \leq \Delta r \leq 400$ км, при плохом прогнозе $\Delta r > 400$ км;

– при заблаговременности 48 ч при хорошем прогнозе $\Delta r \leq 350$ км, при удовлетворительном прогнозе $350 \text{ км} \leq \Delta r \leq 550$ км, при плохом прогнозе $\Delta r > 550$ км;

– при заблаговременности 72 ч при хорошем прогнозе $\Delta r \leq 500$ км, при удовлетворительном прогнозе $501 \text{ км} \leq \Delta r \leq 700$ км, при плохом прогнозе $\Delta r > 700$ км.

На рис. 3 – 5 приведены сравнительные оценки прогнозов положения ТЦ, минимального давления и максимальной скорости ветра, рассчитанные моделями ANW и HWRF (ДВНИГМИ) с заблаговременностью до 72 часов, официальные оценки от РСМЦ ВМО тайфун Токио (RJTD) и от Объединенного центра США предупреждения о тайфунах (JTWC), а также оценки инерционного прогноза.

Так, средняя абсолютная ошибка прогноза положения по моделям HWRF (WRF-NMM) и ANW (WRF-ARW) на период 24 час. (40 случаев), 48 час. (34 случая), 72 час (30 случаев) часа составила 94, 214, 357 км и 123, 243, 362 км, соответственно (рис. 3). Согласно [3], качество прогнозов положения ТЦ моделями ANW и HWRF (ДВНИГМИ) может быть признано хорошим, на уровне официальных агентств.

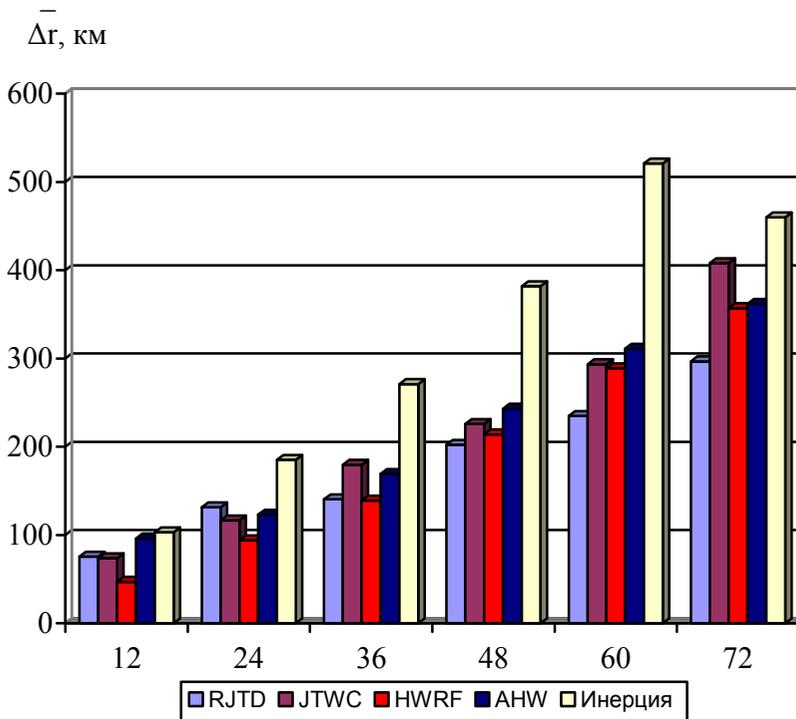


Рис.3. Средние абсолютные ошибки в прогнозах положения тайфунов (Δr , км) для различных периодов заблаговременности от RJTD, от JTWC, по моделям HWRF, ANW (ДВНИГМИ) и по инерционному прогнозу

Дополнительно, на основе привлечения одностороннего критерия Стьюдента согласно подходу, изложенному в [16], учитывающему статистическую связность рядов ошибок, была оценена успешность

прогнозов, рассчитанных по WRF-моделям по отношению к инерционным прогнозам положения ТЦ (прогноз первого рода). Расчеты показали значимое (на уровне 95%) преимущество модельного прогноза над инерционным. Ошибки последнего составили 184, 385, 460 км для 24, 48 и 72 час, соответственно. Это дает основание утверждать, что средняя абсолютная ошибка прогноза положения ТЦ по обеим моделям находится на уровне официальных методик специализирующихся на прогнозе ТЦ метеорологических агентств JTWC и JMA за период 2008-2010 гг. – 117, 226, 368 км и 131, 202, 297 км, соответственно.

Несколько хуже обстояла ситуация с прогнозами минимального давления и максимального ветра, оценки по которым приведены на рисунках 4 и 5, соответственно.

Так, сравнительные оценки погрешности WRF-прогноза минимального давления (рис. 4), показали, что средняя абсолютная ошибка давления для модели ANW составила 13,8, 15,1, 13,2 гПа против модели HWRF – 12,7, 22,0, 23,7 гПа. Добавим, что систематическая (средняя арифметическая) ошибка моделей ANW и HWRF, на 24, 48, 72 часа составила 9,7, 6,7, 2,6 гПа и – 1,9, -9,9, -17,1 гПа, соответственно. По сравнению с HWRF модель ANW показала лучшие результаты, на уровне официальных прогнозов JTWC (10,2, 13,1, 13,3 гПа) и JMA (9,7, 13,9, 13,3 гПа). Таким образом, нами было констатировано занижение минимального давления моделью HWRF. Напротив, модель ANW завышала давление, в среднем на 3 – 7 гПа.

Однако, в экспериментах А.Э. Похил и др., проведенным в ГМЦ России, были получены несколько иные результаты [9]. Прогнозы минимального давления в центре ТЦ по численным моделям ETA и NMM в односеточной конфигурации (единственная сетка 296 на 444

узла с пространственным шагом 22 км) обнаружили, что обе модели, наоборот, существенно завышают атмосферное давление, в среднем на 30 – 40 гПа.

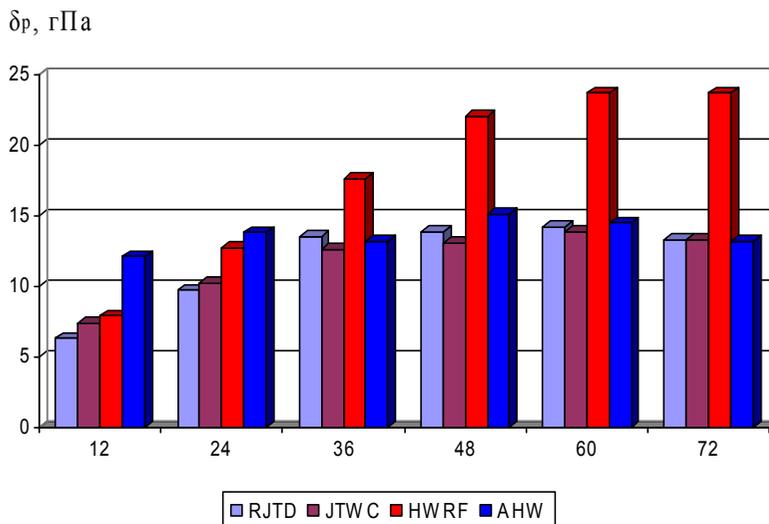


Рис. 4. Средние абсолютные ошибки в прогнозах минимального давления (δp , гПа) для различных периодов заблаговременности от RJTD, от JTWC (2006-2010), по моделям HWRF и AHW (ДВНИГМИ)

В этой ситуации нам остается только предположить о существовании определенной зависимости прогностической величины минимального давления в центре ТЦ от конфигурации расчетной области. Проведенные сравнительные оценки погрешности прогноза максимального ветра, показали (рис. 5), что две модели WRF дают приблизительно одинаковые оценки, что выражается в систематическом занижении скорости установившегося максимального ветра примерно на 10 – 11 м/с для всех заблаговременностей.

Хотя средняя абсолютная ошибка прогноза максимального ветра по WRF-моделям меньше, чем ошибка инерционного прогноза, она больше по сравнению с ошибками официального прогноза JTWC и JMA

примерно в 2 – 3 раза. Однако следует помнить, что официальные прогнозы JTWC и JMA формируются на основе консенсусных методов прогноза и только для тропической зоны до 30° с.ш., что еще более уменьшает ожидаемую ошибку прогноза.

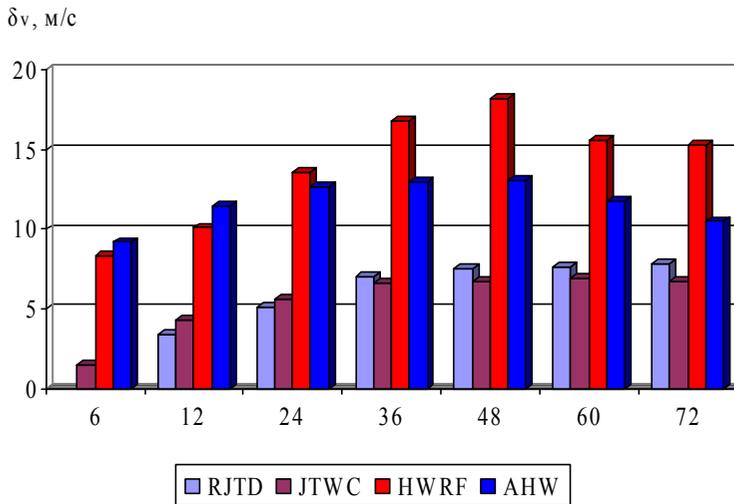


Рис. 5. Средние абсолютные ошибки в прогнозах максимального ветра (δ_v , м/с) для различных периодов заблаговременности от RJTD, от JTWC, по моделям HWRF и ANW (ДВНИГМИ)

На рис. 6а и 6б показаны ошибки в прогнозе направления перемещения тайфунов моделями ANW и HWRF (ДВНИГМИ) в зависимости от заблаговременности (до 72 часов).

Дополнительно, для сравнения, здесь и далее, на рис. 7 показаны ошибки инерционных прогнозов, а также допуски хорошего прогноза, согласно [3]. Анализ средней абсолютной ошибки направления перемещения ТЦ моделями ANW и HWRF показал, что качество прогнозов может быть признано хорошим (рис. 6а и 6б). Однако вышесказанное не означает отсутствия грубых ошибок моделей на

период свыше 24 часов. Более подробно разбор вероятных причин этого будет дан в разделе 6.

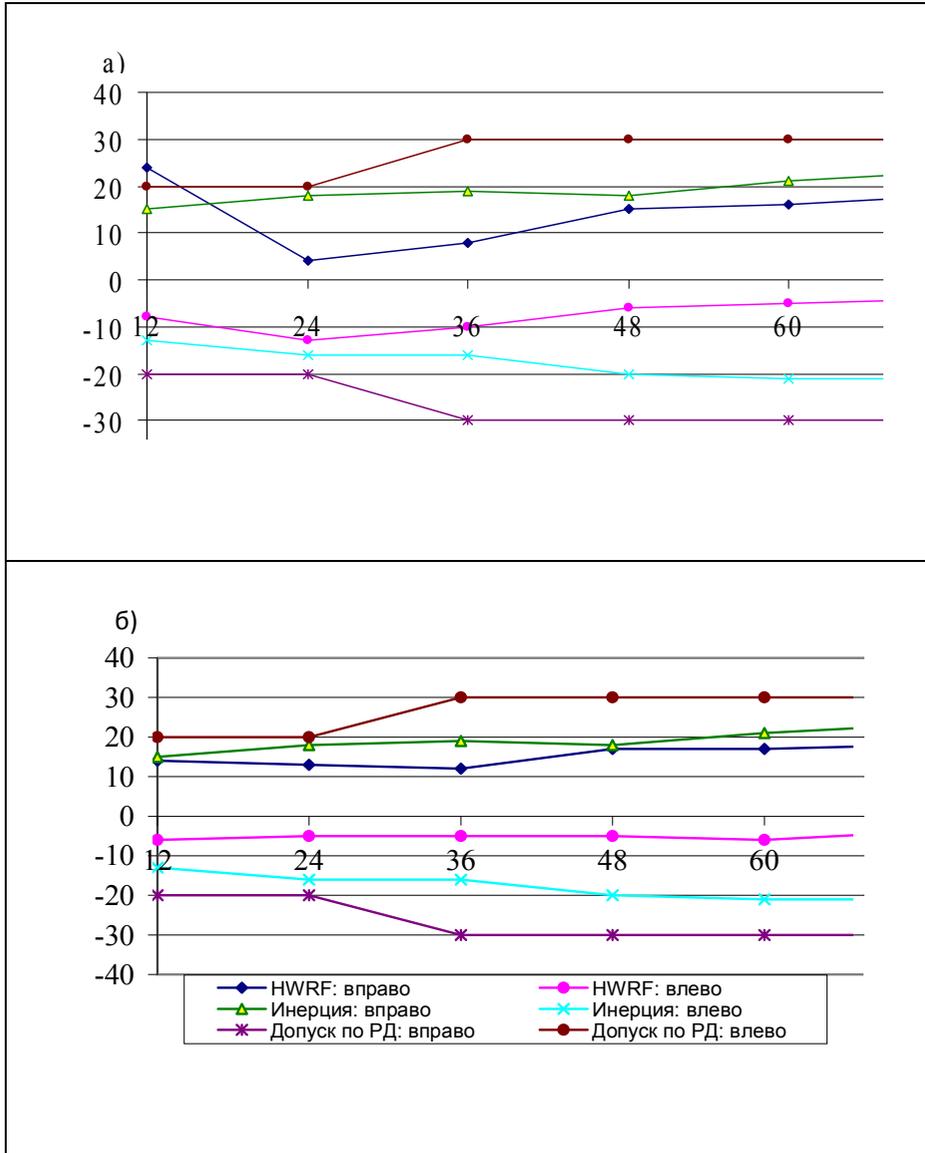


Рис. 6. Ошибки в прогнозе направления перемещения тайфунов ($\Delta\varphi, ^\circ$) для различных периодов заблаговременности по моделям АНУ и HWRP (ДВНИГМИ) по сравнению с инерционным прогнозом и допуском хорошего прогноза [3]

На рис. 7 приведены оценки прогноза скорости перемещения ТЦ (в км за соответствующий период прогноза) моделями АНУ и НУУ (ДВНИГМИ) в зависимости от заблаговременности (до 72 часов). Несмотря на то, что ошибка скорости перемещения по обеим моделям укладывается в допуск хорошего прогноза, можно отметить лучшее качество прогноза скорости перемещения моделью НУУ над моделью АНУ примерно на 40%.

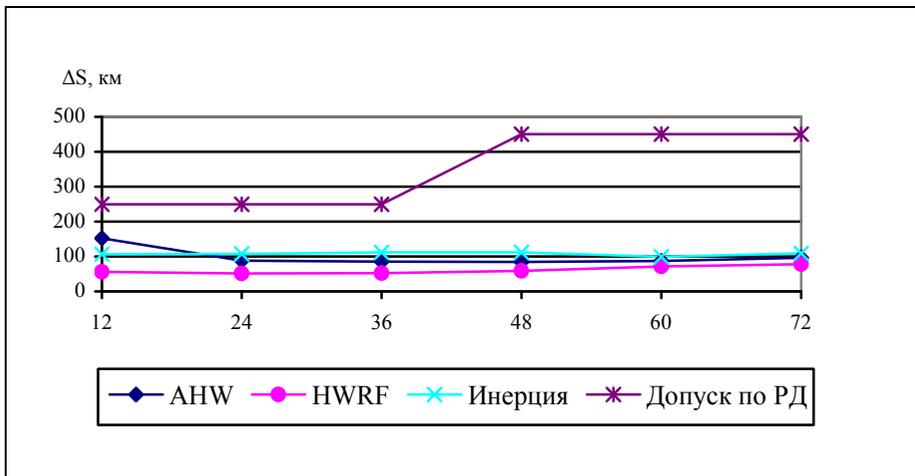


Рис. 7. Ошибки в прогнозе скорости перемещения тайфунов (ΔS , км) для различных периодов заблаговременности по моделям АНУ и НУУ (ДВНИГМИ) по сравнению с инерционным прогнозом и допуском [3]

В целом, добавим, что наибольшие величины ошибок относительного положения и эволюции ТЦ отмечаются:

- на начальных стадиях ТЦ, когда его центр недостаточно хорошо выражен [9];

- в первые сутки численного интегрирования из-за явления так называемого spin-up модели, возникающего из «шока», вызываемого введением искусственного вихря Ренкина в область прогноза [21];

- к концу третьих суток численного интегрирования из-за накапливающихся вычислительных ошибок.

Наилучшее качество прогноза достигается в период 24-48 часов численного интегрирования.

5. Оценки прогнозов полей некоторых метеорологических элементов в окрестностях ТЦ на основе программного комплекса MET

Оценки прогнозов положения и эволюции ТЦ не являются единственными характеристиками качества работы ураганных моделей, адаптированных в ОМТЦ ДВНИГМИ. В данном разделе сделана попытка оценить способность моделей ANW и HWRF прогнозировать поля основных метеорологических элементов, на примере высоты поверхности и температуры воздуха на уровне 1000 гПа.

Программный комплекс MET - Model Evaluation Tools был разработан в NOAA (США) для производства расчетов по оценке качества численных прогнозов метеорологических элементов. Последний релиз версии MET v3.1. вышел в феврале 2012 года. Подробнее о MET можно узнать на сайте производителя [<http://www.dtcenter.org/met/users/index.php>].

Для оценки качества прогноза полей метеорологических элементов в заданной области сетки использован модуль GRID_STAT. В ОМТЦ ДВНИГМИ была осуществлена его адаптация и настройка на выходные данные ураганных моделей ANW и HWRF (ДВНИГМИ). Выходные данные MET – файлы ASCII формата – содержат различные оценки качества прогнозов по всем заданным заблаговременностям в виде специальным образом структурированных таблиц. Более развернутое описание программного комплекса оценки имеется в

документации ОМТЦ ДВНИГМИ.

Регион расчета оценок был ограничен $0 - 45^\circ$ с.ш., $110 - 150^\circ$ в.д. Пространственный шаг сетки был равен $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. В расчете оценок использовались данные численных моделей АНУ и НУУ (ДВНИГМИ), а также исходные данные глобальной модели GFS, служащие начальными и граничными условиями для прогноза УУ.

На рис. 8 и 9 представлен временной ход (в зависимости от заблаговременности прогноза от 0 до 72 часов) величины средней абсолютной ошибки (САО) прогноза полей геопотенциала и температуры на уровнях 1000 и 500 гПа. Оценки прогнозов проведены по [3]. Данные усреднены по всем случаям.

Анализ графиков показывает сходный (синхронный) ход САО для прогнозов модели НУУ и GFS – постепенное увеличение САО со временем, вызванное несовершенством вычислительных схем, ошибками аппроксимации и т.д.

Отдельно стоит отметить временной ход САО для модели АНУ. Так как на этапе инициализации вихря в модели давление в центре ТЦ завышается (см. предыдущий раздел), то модели требуется около суток на процесс приспособления искусственного вихря Ренкина к окружающему ТЦ крупномасштабному термобарическому полю.

В заключение раздела добавим, что усвоение обеими моделями (НУУ и АНУ) данных происходит несколько хуже на более низких уровнях. Особенно это заметно в первые сутки, в среднем через 12 — 24 ч. после внедрения искусственного ТЦ. Поскольку внедрение искусственного ТЦ происходит в нижней тропосфере, то абсолютные ошибки геопотенциальной высоты за первые 24 ч на изобарической поверхности 1000 гПа наиболее различны и составляют примерно 26 —

12 гп.м, 5 — 12 гп.м для АНВ и НВRF о соответственно (рис.8а).

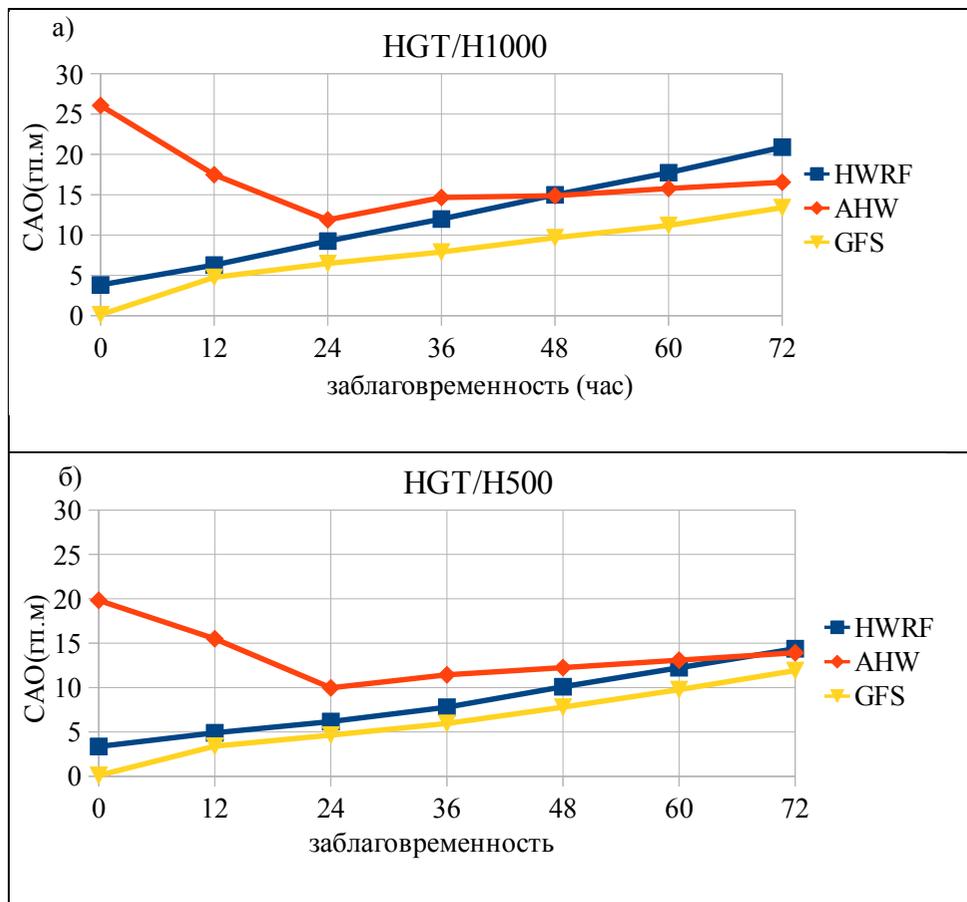


Рис. 8. Средняя абсолютная ошибка поля геопотенциальной высоты изобарической поверхности 1000 гПа (а) и 500 гПа (б) в окрестности ТЦ

По температуре абсолютные ошибки на изобарической поверхности 1000 гПа изменяются в пределах $0,4 - 1,1^\circ$ для АНВ и $0,4 - 0,6^\circ$ для НВRF (рис. 9а). Хотя первоначально модель НВRF усваивает данные искусственного ТЦ лучше, чем модель АНВ, последующие двое суток показывают незначительное ухудшение значений средней

абсолютной ошибки поля температуры поверхностей H1000 и H500 у модели HWRF относительно значений средней абсолютной ошибки модели GFS.

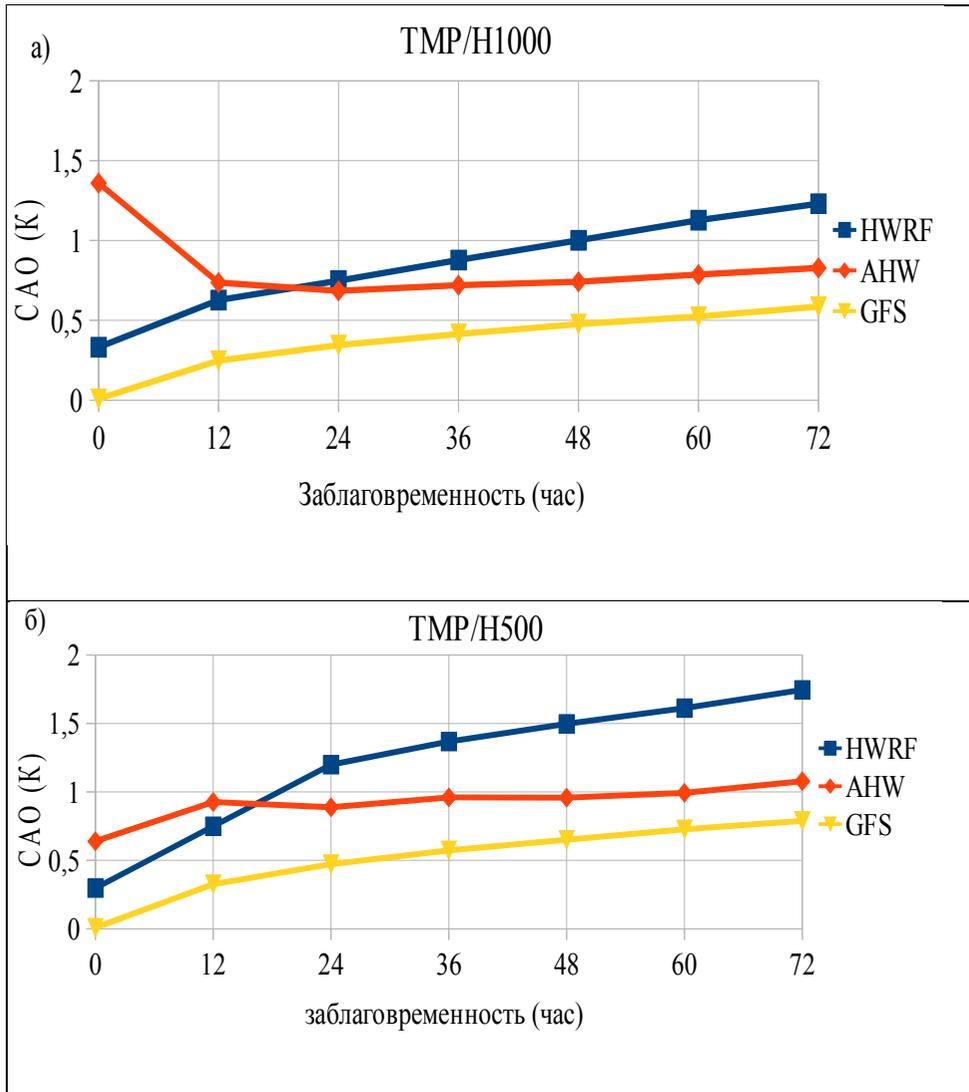


Рис. 9. Средняя абсолютная ошибка поля температуры на изобарической поверхности 1000 гПа (а) и 500 гПа (б) в окрестности ТЦ

Различие между полями геопотенциала моделей HWRF и GFS с высотой уменьшается. При прогнозе на 72 часа значения средней абсолютной ошибки на уровнях 1000 и 500 гПа составляют соответственно 8 и 3 гп.м.

6. Анализ систематических ошибок гидродинамических моделей семейства WRF с привлечением результатов прогнозов контрольной модели

Несмотря на то, что, в целом, обе модели показали результаты, которые могут быть признаны хорошими (прогноз положения) и удовлетворительными (прогноз эволюции) согласно [3], в некоторых случаях имели место систематические ошибки прогноза траектории ТЦ. Покажем это на примере прогноза положения ТЦ MUIFA моделями ANW и HWRF (ДВНИГМИ) от 5 августа 2011 г. за 12 ВСВ. Дата прогноза относится к случаю, когда ТЦ ещё не прошёл точку поворота и двигается по прямой ветви траектории.

5 августа 12 ВСВ ТЦ MUIFA находился в районе $26,1^{\circ}$ с.ш., $127,8^{\circ}$ в.д. и смещался на северо-запад со скоростью 5 узлов. Минимальное давление в ТЦ MUIFA составляло 950 гПа, максимальный ветер 80 узлов. На рис. 10 и 11 представлены поля приземного давления и высот изобарической поверхности 500 гПа.

Движение ТЦ происходило вдоль юго-западной периферии отрога субтропического антициклона, который был хорошо выражен в поле геопотенциала нижней тропосферы. Примерно в 30 градусах к востоку от ТЦ MUIFA находился ещё один ТЦ – TS MERBOK, который также медленно смещался на северо-запад по прямой ветви траектории.

В средней и верхней тропосфере вместо отрога антициклона на картах JMA существовал изолированный антициклон с центром Токио.

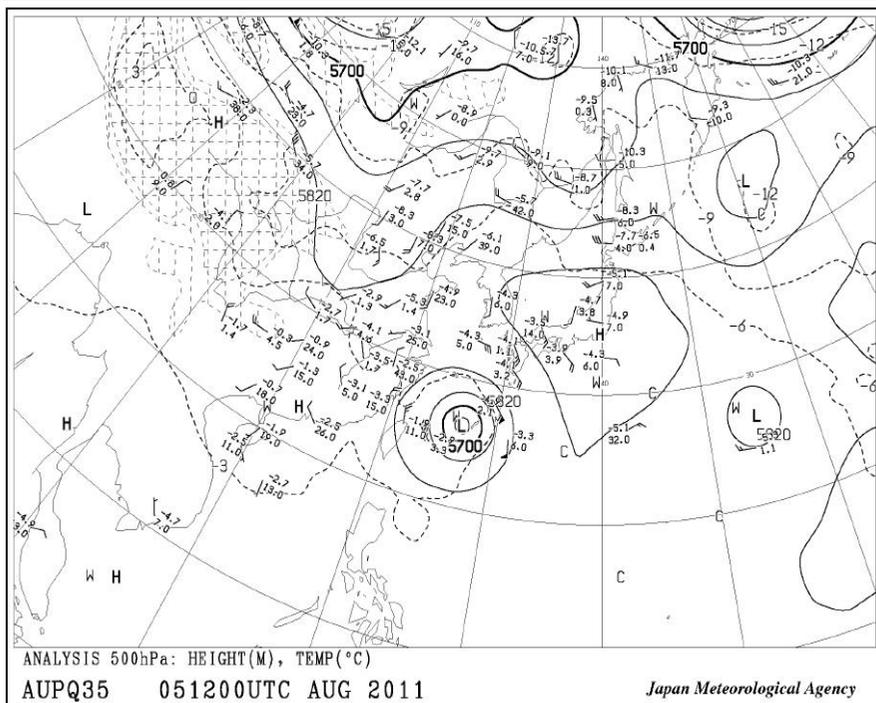


Рис. 11. Карта барической топографии поверхности 500 гПа ЖМА за 12 ВСВ 5 августа 2011 г.

На районы Северо-Восточного Китая STS MUIFA (1109) вышел 8 августа. К 12 ВСВ он преобразовался в тропический шторм, а спустя 12 часов стал тропической депрессией. Облачный массив ТЦ MUIFA охватил значительную часть территории юга Дальнего Востока. Под его воздействием оказались: северо-восточные провинции Китая, Приморье, юг Хабаровского края и Амурская область. К 9 августа ТЦ изменил направление смещения на северо-восточное и в ночь на 10 августа вышел на юг Хабаровского края. 11 августа он сместился на о. Сахалин, а затем вышел на Охотское море. Трансформация ТЦ MUIFA произошла в 12 ВСВ 9 августа в координатах $47,3^\circ$ с.ш., $129,9^\circ$ в.д.

Особенностью прогнозов большинства моделей (и метеорологических центров) на временном отрезке примерно с 4 по 6

августа являлось систематическое отклонение прогностических траекторий к западу от истинной траектории ТЦ МУИФА. При этом уже в телеграмме-предупреждении от 4 августа за 18 ВСВ синоптики JTWC отмечали, что с каждым новым расчётом модельные прогностические траектории ТЦ отклоняются на восток относительно предшествующих прогнозов, т.е. прогностические траектории со временем подворачивали к истинной траектории ТЦ. Поэтому собственно прогностические траектории JTWC, которые, начиная с 18 ВСВ 3 августа, шли по касательной к побережью Китая и далее на Пекин, также с каждым новым прогнозом отклонялись на восток, пока 7 августа в 18 ВСВ не стали направлять ТЦ точно на север в Западно-Корейский залив.

На рис. 12 приведена прогностическая траектория ТЦ МУИФА от 5 августа за 12 ВСВ согласно JTWC.

Прогностические траектории ТЦ МУИФА от 5 августа 12 ВСВ, рассчитанные JTWC и КМА, проходила через Шаньдунский и Ляодунский полуострова и далее в Маньчжурию, а поворот ТЦ МУИФА на обратную ветвь траектории должен был произойти ровно через трое суток над Ляодунским полуостровом (т.е. 8 августа в 12 ВСВ). В реальности ТЦ МУИФА в последующие трое суток смещался восточнее прогностической траектории и пересёк Западно-Корейский залив в районе 124° в.д.

На рис. 13а 13б показаны прогностические траектории ТЦ МУИФА моделями ANW и HWRF (ДВНИГМИ) за 12 ВСВ 5 августа 2011 г. на трое суток (72 часа). Видно, что прогностическая траектория ТЦ МУИФА, согласно обоим моделям, отклонилась к западу, в то время как в реальности ТЦ МУИФА в последующие трое суток прошёл Восточно-Китайское и Желтое моря, т.е. его траектория имела существенную

северную составляющую.

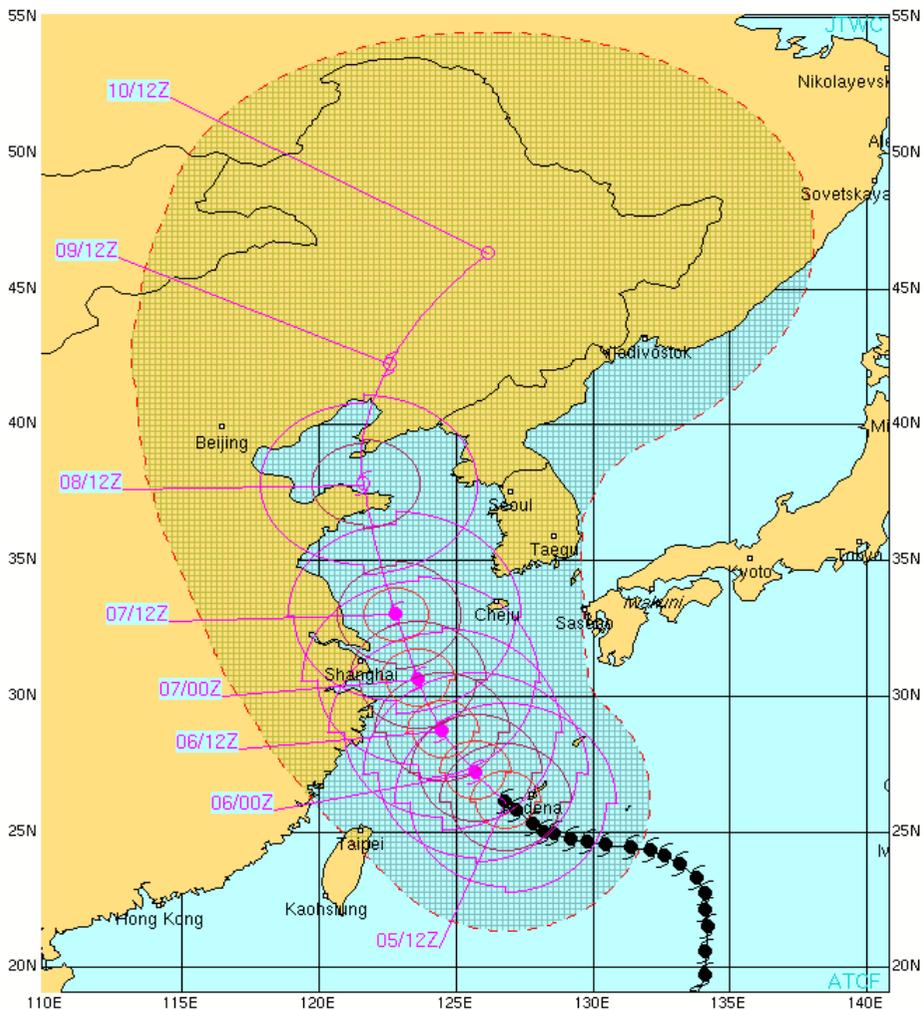


Рис. 12. Прогностическая траектория ТЦ MUIFA от 5 августа 12 ВСВ (JTWC)

Для объяснения возможных причин отклонений прогностических траекторий к западу был проведен численный контрольный эксперимент с региональной гидродинамической моделью (РГМ) Гидрометеоцентра России (автор – В.М. Лосев), адаптированной под задачи прогноза ТЦ в

ОМТЦ ДВНИГМИ. Более подробное описание модели дано в документации ОМТЦ и в [6].

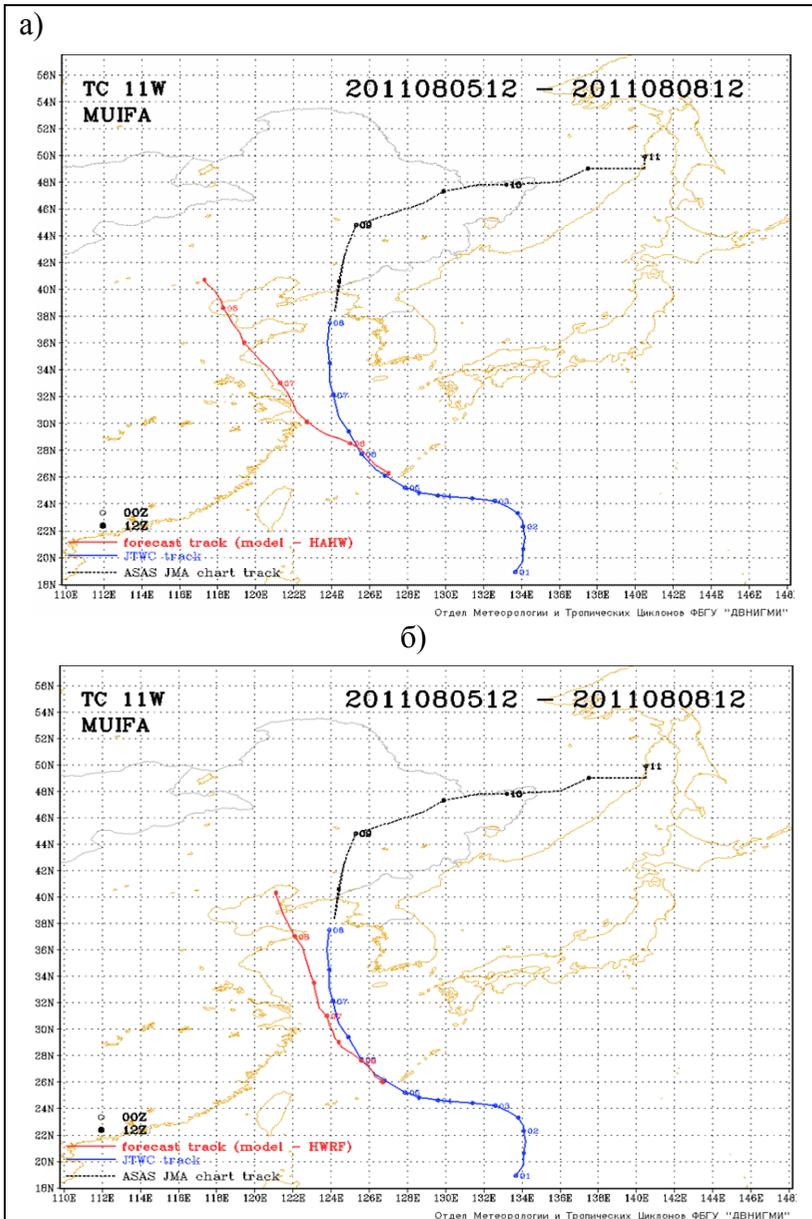


Рис. 13. Пример прогноза траектории ТЦ MUIFA моделями ANHW (а) и HWRW (б) (ДВНИГМИ) за 12 ВСВ 5 августа 2011 г.

Суть эксперимента заключалась в том, что интенсивность ТЦ взаимосвязана с его прогностической траекторией, поэтому, варьируя величины параметров, связанных с интенсивностью ТЦ, можно, во-первых, оценить их влияние на траекторию ТЦ, а во-вторых, использовать их для внесения соответствующих корректив в прогностическую траекторию с целью уменьшения ошибок прогноза.

Из факторов, оказывающих влияние на интенсивность ТЦ, синоптики JTWC, в частности, постоянно обращают внимание на 4 фактора – вертикальный сдвиг ветра на прогностической траектории ТЦ, интенсивность оттока воздуха в верхнем слое ТЦ (канал оттока), температура воды и вероятность выхода на сушу на период заблаговременности прогноза. Из данных 4 факторов в данном случае систематические ошибки в прогностических траекториях ТЦ реально мог вызвать неправильный учёт двух факторов - вертикального сдвига ветра и (или) учёт интенсивности каналов оттока воздуха из ТЦ.

Напрямую оценить влияние этих двух факторов на интенсивность и траекторию ТЦ затруднительно. Однако можно попробовать оценить взаимосвязь интенсивности и траектории ТЦ другим способом, а именно варьированием потока скрытого тепла в области ТЦ, для чего была использована модель Лосева В.М.

В качестве исходных данных для модели РГМ послужили данные Японского реанализа с пространственным разрешением 1,25x1,25 градуса.

Ранее в [6], было получено, что РГМ хорошо, в целом, описывает адвективные процессы умеренных широт, перемещение внетропических циклонов и выпадение осадков, но для ее адаптации к ТЦ пришлось вводить искусственный поток скрытого тепла.

Поэтому, в основу эксперимента была положена гипотеза, похожая на подход Розенталя [22]: траектория ТЦ формируется в основном адвективными факторами плюс влияние интенсивной влажной конвекции (поддержание или усиление интенсивности ТЦ выделением скрытой теплоты конденсации). В результате был выбран явный метод введения в РГМ искусственного потока скрытого тепла – введение в уравнения для влажности искусственные источники влаги.

Численные эксперименты представлены на рис. 14. Красным цветом показана прогностическая траектория ТЦ, синим – фактическая.

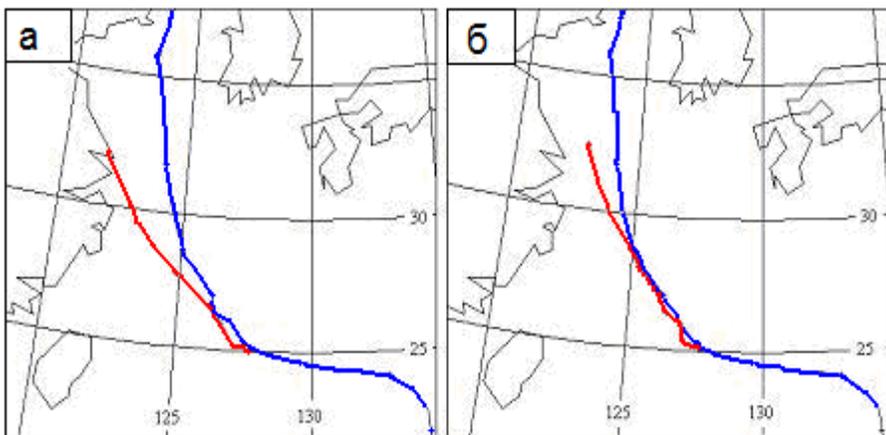


Рис. 14. Сравнение прогнозов по региональной гидродинамической модели без потока пара (а) и с введением искусственного потока пара от океана (б) на примере ТЦ MUIFA за 12 ВСВ 5 августа 2011 г.

В отсутствие задания потока пара траектория ТЦ MUIFA сильно напоминает прогностические траектории от моделей ANW и HWRF (особенно ANW). Однако при вводе потока пара в РГМ близкого к предельному, прогностическая траектория от РГМ с достаточной степенью точности приближается к фактической.

Результат численного эксперимента показывает, что в данной своей конфигурации «по умолчанию» модели ANW и HWRF не всегда адекватно описывают траекторию и эволюцию ТЦ. Справедливости ради, отметим, что рассчитанная по данным прогнозов по глобальной модели GFS от 5 августа 2011 г. за 12 ч ВСВ траектория ТЦ MUIFA (не показано), также дает ошибку смещения, чуть меньшую ошибки модели HWRF.

Таким образом, можно предположить, что имеется возможность тонкой настройки блоков конвекции и параметризации процессов в пограничном слое, что позволит улучшить качество прогнозов положения и эволюции ТЦ моделями семейства WRF.

Визуальный анализ общей синоптической ситуации показывает, что варьирование параметров, влияющих на интенсивность ТЦ, может приводить к улучшению не только прогноза положения ТЦ, а также к улучшению прогноза всего поля (синоптического положения), за исключением окрестности ТЦ, где происходит «переуглубление» полей геопотенциала.

Авторы отдают себе отчет в том, что с одновременным улучшением прогнозов положения ТЦ данный подход приводит к ухудшению прогнозов его интенсивности (ТЦ получается более глубоким), поэтому его следует применять только с целью улучшения прогнозов положения ТЦ, но не прогнозов его эволюции.

7. Выводы

На основе обзора отечественных и зарубежных работ сформулированы основные требования к работе АСП-ТЦ ДВНИГМИ:

- наличие достаточных вычислительных ресурсов;

и- автоматизация работы системы (с минимальным участием оператора);

- условие эффективности, в том числе, применение параллельных вычислений для ускорения расчетов;

- наличие стабильного и высокоскоростного канала связи (Интернет);

- сравнительное удобство эксплуатации в оперативном режиме и прозрачное для конечного пользователя (синоптика или исследователя) проведение оперативных и исследовательских расчетов.

Результаты квазиоперативных испытаний ураганных моделей ANW и HWRF показали следующее:

1. Было получено, что оба подхода - движущаяся (HWRF) и статическая (ANW) (вложенные сетки) дают примерно одинаковую погрешность прогноза положения ТЦ на период до 72 час. Этот вывод согласуется с результатами (Michael Fiorino and Edward J. Harrison Jr.).

2. Ошибки в прогнозе положения, скорости и направления перемещения ТЦ меньше у модели HWRF, что говорит о большей её устойчивости (robustness), т.е. её способности обеспечить наилучшие результаты расчетов (выходные данные), по сравнению с моделью ANW.

3. Можно предположить, что конфигурация с единственной материнской сеткой с пространственным шагом порядка 45 – 22 км в районе ТЦ, является существенно недостаточной для хорошего прогноза эволюции ТЦ, и можно рекомендовать использование вложенной сетки с шагом порядка не более 9 – 15 км.

4. Блок инициализации ТЦ в модели ANW требует дальнейшей адаптации под ДВ-регион, так как ввиду завышения давления в ТЦ в

начальный момент времени в текущей конфигурации период приспособления вихря (spin-up) составляет порядка суток.

5. Эксперименты с контрольной моделью В.М. Лосева показывают возможность дальнейшей настройки блоков конвекции и пограничного слоя для работы с ТЦ.

6. На примере двух ТЦ 2011 г. подтверждена принципиальная способность моделей ANW и HWRF воспроизводить пространственно-временные характеристики ТЦ на различных стадиях развития на уровне официальных прогнозов.

Достоверность оценок подкрепляется использованием двух моделей с разными подходами к реализации динамического ядра и способами построения сеток (ANW – динамическое ядро EM использует сетку класса «С» Аракавы, вложенная сетка неподвижна; HWRF – динамическое ядро NMM использует сетку класса «Е» Аракавы, вложенная сетка перемещается вслед за ТЦ). Разумеется, эти результаты носят несколько индикативный характер, однако проведенная предварительная оценка дисперсии оценок методического WRF-прогноза положения и эволюции ТЦ (ошибки положения, минимального давления и максимального ветра) говорит о значимом преимуществе над инерционным прогнозом.

Таким образом, основным результатом данной работы можно считать вывод о перспективности использования моделей семейства WRF для прогноза перемещения и эволюции ТЦ на Дальнем Востоке Российской Федерации.

Работа выполнена в рамках темы федерального заказа Росгидромета «Развитие технологий краткосрочных прогнозов опасных метеорологических явлений и тропических циклонов на территории

Дальнего Востока с использованием модели WRF».

ЛИТЕРАТУРА

1 Вербицкая Е. М. Перспективы развития системы численных прогнозов погоды в Региональном специализированном метеорологическом центре Хабаровск // ДВНИГМИ – 60 лет. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – С. 12 – 24.

2 Гончуков Л. В., Ламаш Б. Е. Численный прогноз опасных явлений погоды по северу Приморского края // Вестник 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. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 150 с.

4 Моисеев М. Б. Некоторые характеристики прогнозирования тропических циклонов атмосферными моделями // Сборник трудов ДВНИГМИ – 60 лет. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – С. 275 – 281.

5 Наумов, А. Д., Николаева А. В. Использование региональной ETA-модели для прогноза траекторий тропических циклонов по данным Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 10. – С. 33 – 40.

6 Отчет о НИР. Развитие методов и технологий прогноза активности тропических циклонов (ТЦ) и их перемещения. ДВНИГМИ. – N ГР 01200850393. – Владивосток, 2010. – 214 с.

7 Похил А. Э., Зайченко М. Ю. Исследование влияния структуры инициализированного вихря на расчет перемещения ТЦ на основе ETA-модели // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 2. – С. 68 – 77.

8 Похил А. Э., Глебова Е. С. О взаимодействии тропических циклонов между собой и с другими атмосферными структурами // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 9. – С. 5 – 18.

9 Похил А. Э., Глебова Е. С., Смирнов А. В. Расчет На Мезомасштабных Моделях Атмосферы Eta И Wrf (Nmm) Взаимодействия Тропических Циклонов с Полярными Фронтами и Струйными Течениями // Тр. Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 87 – 102.

10 Толстых М. А., Мизяк В. Г. Параллельная версия полулагранжевой модели ПЛАВ с горизонтальным разрешением порядка 20 км // Тр. Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 181 – 190.

11 Aberson, S. D. Targeted observations to improve operational tropical cyclone track fore-cast guidance // Mon. Wea. Rev. – 2003. – V. 131. – № 8. – PP. 1613 – 1628.

12 Charnock, H. Wind stress on a water surface // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. – 1955. – V. 81. – PP. 639 – 640.

13 Davis, C. A., S. Low-Nam. The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme // Air Force Weather Agency (AFWA) Report. – 2001. – 12 p. – Internet. – [http:// box.mmm.ucar.edu/mm5/mm5v3/tc-report.pdf](http://box.mmm.ucar.edu/mm5/mm5v3/tc-report.pdf).

14 Developmental Testbed Center, 2011: Model Evaluation Tools Version 3.1 (METv3.1) User's Guide 3.1 // Internet.

15 Fiorino M., Harrison E. A comparison of the performance of two operational dynamic tropical cyclone models // Mon. Wea. Rev. – V. 110. – Issue 7 (July 1982). – PP. 651 – 656.

16 Goerss, J., Jeffries, R. Assimilation of Synthetic Tropical Cyclone Observations into the Navy Operational Global Atmospheric Prediction System // Wea. Forecasting. – 1994. – V. 9. – Issue 4. – PP. 557 – 576.

17 Gopalakrishnan, S., Q. Liu, T. Marchok, D. Sheinin, N. Surgi, M. Tong, V. Tallapragada, R. Tuleya, R. Yablonsky and X. Zhang. Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model. – 2011 Scientific Documentation, Technical Report, Developmental Tested Center. // Internet. http://www.dtcenter.org/HurrWRF/users/docs/scientific_documents/HWRFSscientificDocumentation_August2011.pdf.

18 Hsiao Ling-Feng, Liou Chi-Sann, Yeh Tien-Chiang A vortex relocation scheme for tropical cyclone initialization in advanced research WRF // *Mon. Wea. Rev.* – 2010. – V. 138. – № 8. – PP. 3298 – 3315.

19 http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline-nwp/pdf/pdf4/outline_4_2.pdf

20 Kurihara Y., Tuleya R. E., Ross R. J. Improvements in the GFDL hurricane prediction system // *Mon. Wea. Rev.* – 1995. – V. 123. – № 9. – PP. 2791 – 2801.

21 Leslie L., Holland G. On the bogussing of tropical cyclones in numerical models: a comparison of vortex profiles // *Meteorol. and Atmosp. Phys.* – 1995. – V. 56. – Numbers 1-2. – PP. 101 – 110.

22 Rosenthal S. L. Numerical simulation of tropical cyclone development with latent heat by resolvable scales I. Model description and preliminary results // *J. Atmos. Sci.* – 1978. – V. 35. – PP. 258 – 271.

23 Skamarock, W. C, Klemp J. B., Dudhia J. [et al]. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 [Electronic resource]. – NCAR Technical Note / NCAR/TN-475+STR. 2010. – 113 p. – Internet. – http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.

24 User's Guide for the NMM core of the Weather Research and Forecast (WRF) modeling system Version 3.3.1. 2010 – // Internet. – http://www.dtcenter.org/wrf-nmm/users/docs/user_guide/index.php. http://www.dtcenter.org/met/users/docs/users_guide/MET_Users_Guide_v3.1.pdf