

УДК 551.5:001.981.57

**Технология краткосрочных прогнозов
тропических циклонов
северо-западной части Тихого океана
на основе региональной модели HWRf-Ru**

***В.В. Крохин^{1,2*}, А.Ю. Филь¹, Л.И. Евдокимова¹,
М.Б. Моисеев¹, Н.Г. Котович¹***

¹*Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Владивосток, Россия;*

²*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия
vvkrokhin@gmail.com

Представлены результаты испытаний технологии краткосрочных прогнозов положения и интенсивности тропических циклонов (ТЦ) северо-западной части Тихого океана на срок 3 суток с трехчасовой временной детализацией на основе региональной модели HWRf-Ru. Прогнозы положения ТЦ имеют хорошую оправданность и рекомендованы в качестве основного метода, прогнозы интенсивности – удовлетворительную, но могут быть использованы как консультативные. Автоматизированный метод прогноза ТЦ успешно прошел испытания и внедрен в оперативных подразделениях Дальневосточного УГМС.

Ключевые слова: гидродинамические прогнозы, тропические циклоны, модель HWRf, верификация прогнозов

**Technology of short-range tropical cyclone forecasts for the
Northwest Pacific basin based on regional model HWRf-Ru**

***V.V. Krokhin^{1,2*}, A.Y. Fil¹, L.I. Evdokimova¹,
M.B. Moiseev¹, N.G. Kotovich¹***

¹*Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia;*

²*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
vvkrokhin@gmail.com

The results of testing the technology for short-range forecasting of the position and intensity of tropical cyclones (TCs) in the Northwest Pacific for 3 days with the 3-hour resolution based on the HWRf-Ru regional model are presented. The TC position forecasts show a good skill and can be recommended for the use as a main method, and the intensity forecasts are less informative but can be used as advisory ones. The automated method for the TC forecasting has successfully been tested and implemented in the operational divisions of the Far Eastern Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

Keywords: hydrodynamic forecasts, tropical cyclones, hurricane weather research and forecasting (HWRf) model, forecasts verification

Введение

Прогнозирование тропических циклонов северо-западной части Тихого океана является важной и актуальной задачей Росгидромета по обеспечению гидрометеорологической безопасности населения и отраслей экономики Дальнего Востока. Автоматизированный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза положения тропических циклонов (ТЦ) северо-западной части Тихого океана и реализующая его технология на основе модели HWRF-Ru (Hurricane Weather Research and Forecasting model) разрабатывались в 2011–2016 гг. в ФГБУ «ДВНИГМИ».

Основной целью работы являлись разработка и внедрение в оперативную практику технологии прогноза тайфунов на базе выходной продукции модели WRF и своевременное обеспечение потребителей (дальневосточных территориальных управлений Гидрометслужбы) прогностической информацией об имеющихся тропических циклонах. Созданная силами авторов настоящей работы автоматизированная технология прогноза тайфунов является дальнейшим развитием разработок в области прогнозирования ТЦ, проведенных В.П. Туноголовцем и Н.И. Павловым [2, 4]. Ранее до 2017 года в Росгидромете не было утвержденной методики прогнозирования тропических циклонов.

Название оперативной технологии HWRF-Ru предложено авторами (по аналогии с наименованием технологии COSMO), так как оно отражает название своей страны, для однозначной локализации области численного прогноза (Дальний Восток и северо-западная часть Тихого океана), а также опций модели HWRF (физические параметризации, численные методы решения и т. д.).

Оперативные испытания технологии HWRF-Ru проводились в ДВНИГМИ по существующим в настоящее время нормативам оценок численных и общего назначения прогнозов погоды для тропических циклонов [3]. В данной статье приводятся итоги оперативных испытаний прогнозов тропических циклонов технологии HWRF-Ru для северо-западной части Тихого океана и ДВ морей.

1. Система прогноза ТЦ HWRF-Ru в ДВНИГМИ

1.1. Общая характеристика модели HWRF

HWRF (сокращенная аббревиатура от Hurricane Nonhydrostatic Mesoscale Model, WRF-NMM) – это современная гидродинамическая модель на базе WRF-NMM, разработанная сообществом научных организаций США, в том числе в Национальном центре атмосферы и океана, Национальном центре атмосферных исследований [6]. На сайте сообщества WRF приведена подробная научно-техническая документация модели HWRF, а также руководство по применению модели.

Особенностью конфигурации модели HWRF является то, что она специально разработана для работы с ТЦ. В настоящее время при расчетах тайфунов версия модели HWRF – сборка HWRF-Ru запускается в одиночном режиме без модели океана POM (Princeton Ocean Model).

В модели HWRF используются повернутые сферические координаты. Такие координаты используются также в моделях ETA (США, Бразилия) и в модели COSMO (Метеорологическая служба Германии, Гидрометцентр России). Эти координаты удобны тем, что при сравнительно небольших размерах области, характерных для локальных и региональных моделей, расчеты ведутся на почти равномерной (в линейном смысле) широтно-долготной сетке. Все плоские операторы, присутствующие в уравнениях, являются операторами в сферической системе координат. Концепция масштабного множителя в модели HWRF не применяется.

Расчетная область для модели HWRF-Ru состоит из материнской сетки размером примерно $80 \times 80^\circ$ с шагом $0,18^\circ$ (около 27 км) и вложенной сетки приблизительно $6 \times 6^\circ$ с шагом $0,06^\circ$ (около 9 км),двигающейся вслед за ТЦ (рисунок).

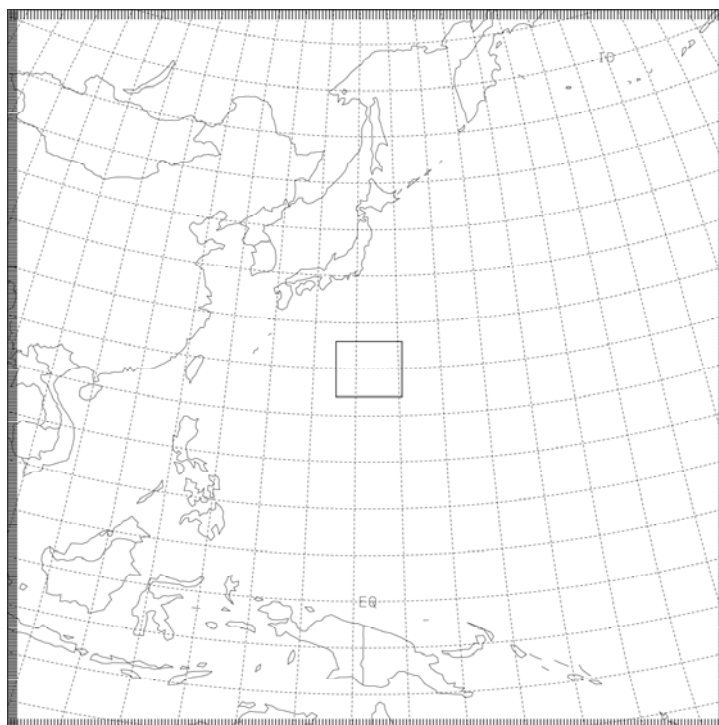


Рис. Область интегрирования системы прогноза ТЦ HWRF-Ru, функционирующей в ДВНИГМИ для северо-западной части Тихого океана и ДВ морей. Выделена область вложенной сетки.

Fig. Example of parent and nested grids used in tropical cyclone forecast technology based on the HWRF-Ru model.

Основные уравнения модели HWRF приведены в [6]. Особенностью модели HWRF с ядром NMM является то, что в ней в явном виде отделены члены, присутствующие в гидростатических моделях, от членов, возникающих вследствие учета негидростатичности. В упрощенном виде система прогностических и диагностических уравнений модели WRF-NMM σ -системе координат на плоскости, трансформированной широтно-долготной проекции, содержит 9 уравнений и 9 неизвестных, т. е. является замкнутой. В полном виде исходная система уравнений также включает источники (стоки) в уравнениях движения и притока тепла. Также добавляются уравнения переноса влаги в различных фазовых состояниях. Численное решение системы уравнений модели WRF-NMM выполняется конечно-разностным аналогом, записанным на расшатанной «Е» сетке Аракавы.

Основной набор параметризаций для модели HWRF выглядит следующим образом:

- 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 К-слою смещения;
- 4) глубокая конвекция параметризуется на основе подхода «потока массы» по Аракаве – Шуберту;
- 5) схема параметризации для микрофизических процессов Феррье, описывающая многофазные процессы в облаках;
- 6) коротко- и длинноволновая радиация параметризуется схемой GFDL.

Шаг по времени равен 54 сек. Потоки коротковолновой и длинноволновой радиации в экспериментах рассчитываются каждые 30 мин.

В версии модели HWRF, используемой в ДВНИГМИ, применяется инициализация вихря ТЦ при холодном старте. В технической документации модели HWRF для определения получившегося вихря применяется термин «композиционный вихрь» (composite vortex). На основании данных положения и интенсивности ТЦ, получаемых по результатам самолетного и дистанционного зондирования, производится поиск параметров вихря в полях первого приближения (guess fields) – крупномасштабных метеорологических полях объективного анализа, полученных по результатам работы глобальной модели (оперативный прогноз или повторный анализ). Под термином параметры вихря здесь понимается информация об интенсивности и положении ТЦ. Завершается инициализация ТЦ проведением коррекции размера композиционного вихря на основании фактических данных о ТЦ – скорости и радиуса максимального ветра, и, по возможности, радиуса внешней замкнутой изобары. Получившийся вихрь

в полной мере удовлетворяет физике и динамике модели при соблюдении соответствия фактическим значений минимального давления в центре ТЦ, максимального ветра и радиуса максимальных ветров. Вихрь не подвергается инициализации или (и) перемещению в случае, если он находится над сушей.

Отслеживание прогностического положения ТЦ и определение его интенсивности производится по программе, разработанной в GFDL, являющейся составной частью постпроцессинга модели HWRF [6]. Метод отслеживания вихря ТЦ реализует объективную процедуру получения прогностических параметров ТЦ (координаты и параметры интенсивности) из набора полей (относительная завихренность, геопотенциал, давление на уровне моря и компоненты скорости ветра в окрестности ТЦ), являющихся выходной продукцией численной модели HWRF. Результатом работы программы отслеживания вихря ТЦ является текстовая телеграмма в международном формате ATCF (Automated Tropical Cyclone Forecast format). По умолчанию, в версии модели HWRF, используемой в ДВНИГМИ, вывод прогностических параметров происходит с дискретностью 3 часа. В ATCF-формате на один прогностический срок может приходиться от одной до трех строк в зависимости от интенсивности ТЦ. В строке все параметры отделяются друг от друга запятой и пробелом.

Текстовая телеграмма ATCF содержит информацию о районе прогноза, номере ТЦ, идентификаторе модели, начальной дате-времени прогноза, заблаговременности (час), а также различную информацию о координатах, интенсивности и радиусах штормовых ветров. Более полное развернутое описание ATCF-формата дано в [6].

1.2. Организация прогнозов ТЦ в ДВНИГМИ

К настоящему времени на вычислительных средствах Росгидромета в ДВНИГМИ функционирует система прогноза ТЦ HWRF-Ru для территории северо-западной части Тихого океана и ДВ морей (см. рисунок).

Система прогноза ТЦ HWRF-Ru в ДВНИГМИ была впервые задействована в экспериментальном режиме с сентября 2012 г. для обеспечения гидрометеорологической безопасности проведения саммита глав государств-участников АТЭС на о. Русский (Владивосток). Технология находится в оперативной эксплуатации на вычислительных ресурсах отдела автоматизации ДВНИГМИ с мая 2013 года.

В настоящее время система краткосрочного прогноза ТЦ HWRF-Ru использует версию 3.3.1 модели HWRF, версию 2.2.0 постпроцессинга и версию 3.4a трекинга ТЦ. Система препроцессинга WPS регулярно актуализируется в соответствии с обновлением ассортимента выходной продукции модели GFS.

Для нахождения начальных и боковых граничных условий используются прогнозы глобальной модели GFS с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ [7].

В качестве начальной информации о ТЦ в системе HWRF-Ru используется оперативная историческая информация по положению и интенсивности ТЦ из текстовых телеграмм Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC), оперативно обновляющихся (каждые 6 часов: 00, 06, 12, 18 ч ВСВ) на серверах Глобальной системы прогнозов Национального центра экологического прогноза США.

Расчеты прогнозов тайфунов выполняются на вычислительных ресурсах ДВНИГМИ два раза в сутки от 00 и 12 ч ВСВ. Расчет характеристик успешности прогнозов ТЦ осуществляется в конце года на основе разработанных программ.

Подсистема выпуска прогностической продукции включает:

- прогностические поля метеорологических элементов у Земли и на изобарических поверхностях по северо-западной части Тихого океана на период 72 ч с интервалом 3 ч в графическом и бинарном виде. Карты основных метеорологических элементов: давление на уровне моря, 3-часовые накопленные суммы осадков, данные о высоте геопотенциальных поверхностей 1000, 850, 700 гПа и т. д. размещены на сайте ДВНИГМИ (<http://www.ferhri.ru>);

- текстовые прогностические телеграммы в формате ATCF (Automated Tropical Cyclone Forecast);

- специализированные прогнозы ТЦ в графическом и бинарном виде предоставляются всегда и доступны на сайте ДВНИГМИ.

Выходная прогностическая информация фиксируется на серверах ДВНИГМИ. Кроме того, ссылка на прогнозы тропических циклонов системы HWRF-Ru по северо-западной части Тихого океана и ДВ морям размещена на web-сервере ФГБУ «Приморское УГМС».

2. Оценка успешности численных краткосрочных прогнозов характеристик ТЦ системой HWRF-Ru

2.1. Методика оценки успешности прогнозов ТЦ

Для определения качества прогноза перемещения ТЦ, в соответствии с [3], вычислялись показатели, характеризующие ошибки прогноза положения центра ТЦ, скорости и направления его перемещения.

Допустимые ошибки прогнозов перемещения ТЦ для заблаговременностей 24, 48 и 72 ч представлены в табл. 1.

В табл. 1, согласно [3], приняты следующие обозначения:

- Δr – абсолютные ошибки прогноза положения центра ТЦ (расстояние между фактическим и прогностическим положениями центров в срок прогноза);

- ΔS – абсолютная ошибка прогноза скорости перемещения ТЦ;

- $\Delta \varphi$ – ошибка прогноза направления перемещения, определяемая значением угла между фактической и прогностической траекториями ТЦ (в пределах от 0 до 180° вправо или влево).

Основными показателями успешности прогнозов перемещения ТЦ принято считать ошибки в прогнозе положения ТЦ (Δr).

В дополнение к расчету успешности качества прогнозов перемещения ТЦ в ходе оперативных испытаний также рассчитывалось и качество прогнозов эволюции ТЦ. Для установления надежности методов прогноза эволюции ТЦ использовались, в том числе, такие статистические показатели успешности прогнозов давления в центре ТЦ и максимального ветра, как абсолютная и относительная ошибки прогноза.

Оценка оправдываемости прогноза максимального ветра в циклонах производилась с использованием тех же характеристик, что и оценка оправдываемости прогноза давления в центре ТЦ.

Таблица 1. Допустимые ошибки прогнозов перемещения тропических циклонов

Table 1. Admissible errors of forecasts of movement of tropical cyclones

Качество прогноза	Δr , км	ΔS , км/сут	$\Delta \varphi^\circ$
Заблаговременность 24 ч			
Хорошее	< 200	< 250	< 20
Удовлетворительное	201–400	251–450	21–35
Неудовлетворительное	> 400	> 450	> 35
Заблаговременность 48 ч			
Хорошее	< 350	< 350	< 30
Удовлетворительное	351–550	351–450	31–40
Неудовлетворительное	> 550	> 450	> 40
Заблаговременность 72 ч			
Хорошее	< 500	< 450	< 30
Удовлетворительное	501–700	451–650	31–45
Неудовлетворительное	> 700	> 650	> 45

Согласно [3], испытание новых методов прогноза перемещения и эволюции ТЦ производится в сравнении с другими расчетными методами аналогичного прогноза, а также в сравнении с инерционным прогнозом первого порядка. Инерционный прогноз представляет собой линейную экстраполяцию движения и других характеристик ТЦ на последующий период времени.

В связи с требованиями [3], а также в связи с большими различиями в физико-географических и климатических условиях развития и перемещения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана, зафиксированных на рассматриваемой территории, оценки рассчитывались как в среднем по всей территории, так и по районам южнее и севернее 25° с. ш.

В следующем разделе кратко представлены основные результаты оперативных испытаний прогнозов перемещения и эволюции ТЦ системой HWRF-Ru. Полное описание результатов испытаний приведено в соответствующем отчете [1].

2.2. Оценки успешности прогнозов характеристик ТЦ

Всего за период оперативных испытаний 2014–2016 гг. было обчислено 68 ТЦ, что составило 90 % от 76 ТЦ, отмечавшихся в северо-западной части Тихого океана. Это обстоятельство позволяет считать полученные прогностические оценки репрезентативными. Результаты оперативных испытаний сведены в 15 таблиц, представленных в [1]. Из-за большого их объема в настоящей статье эти таблицы не приводятся, а дается краткий анализ результатов испытаний.

2.2.1. Прогноз положения тропических циклонов

При любой заблаговременности прогнозов положения ТЦ численный метод дает хороший результат.

Средняя ошибка прогнозов положения центров ТЦ при заблаговременности прогнозов до 24 ч не превышает 101 км при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и 95 км при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.; при заблаговременности 48 ч – 188 и 179 км, при заблаговременности 72 ч – 259 и 341 км, соответственно, к югу и северу от 25° с. ш.

При заблаговременности прогнозов до 48 ч в большинстве случаев ошибка прогноза положения при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. не превышает 156 км (от 99 % при заблаговременности 12 ч до 59 % при заблаговременности 48 ч). При нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. она изменяется от 93 % при заблаговременности 12 ч до 69 % при заблаговременности 48 ч. При большей заблаговременности возрастает число случаев, когда эта ошибка превышает 200 км. В среднем разница между прогностическим и фактическим положением тропических циклонов находится в интервале 201–400 км.

Минимальная величина ошибки положения составляет примерно одну десятую градуса для всех заблаговременностей прогноза. Максимальное значение ошибки (707 км) приходится на прогнозы сезона 2014 года с заблаговременностью 60–72 ч при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и 965 км для заблаговременности 72 ч при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.

Относительная ошибка положения ТЦ с увеличением заблаговременности Δt от 24 до 72 ч меняется незначительно, с тенденцией слабого уменьшения. Максимальные значения характерны для первых часов прогноза (0,30–0,43). По мере увеличения заблаговременности относительная ошибка положения ТЦ стабилизируется (0,23–0,27).

Большие ошибки прогноза положения ТЦ при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. по сравнению с ошибками прогноза положения ТЦ при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш., предположительно, могут быть объяснены тем фактом, что скорость перемещения ТЦ по мере своего перемещения на север, как правило, значительно увеличивается.

2.2.2. Прогноз скорости перемещения тропических циклонов

Анализ результатов показывает, что при любой заблаговременности прогнозов численный метод прогнозов скорости перемещения ТЦ имеет хорошее качество. При всех заблаговременностях прогнозов в подавляющем большинстве случаев (99–100 % при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и 93–98 % при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.) ошибка прогноза скорости перемещения тропических циклонов не превышает 250 км/сут.

Скорость перемещения ТЦ систематически занижается от 38 до 8 км/сут. при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и от 74 до 31 км/сут при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.

2.2.3. Прогноз направления перемещения тропических циклонов

Погрешность определения направления смещения тропических циклонов при любой заблаговременности прогнозов, включительно до 72 ч, в большинстве случаев (от 79 до 91 % при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и от 93 до 100 % при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.) не превышает 25° .

Средний показатель угла отклонения прогностической траектории от фактической при любой заблаговременности прогнозов равен $4\text{--}6^{\circ}$. Чаще всего (от 50 до 65 % случаев) прогностические траектории отклоняются от фактических вправо при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. и влево (от 50 до 55 %) при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. Максимальные значения ошибок, в том числе более 35° по направлению, отмечаются в первые 12 ч.

Таким образом, правый поворот относительно истинной траектории преобладает в течение всего периода прогноза системы HWRF-Ru.

2.2.4. Прогноз минимального давления в тропических циклонах

Абсолютная ошибка прогнозов давления при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. с увеличением заблаговременности растёт от 7,5 до 27,3 гПа. Средняя арифметическая ошибка прогноза положительна при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш., отрицательна при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. В целом, имеет место занижение величины прогноза давления, особенно значительное на третьи сутки прогноза.

Относительная ошибка метода с увеличением заблаговременности, как правило, уменьшается при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. или остается без существенного изменения при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.

При любой заблаговременности прогнозов численный метод прогнозов давления в центре ТЦ имеет удовлетворительное качество.

2.2.5. Прогноз максимального ветра в тропических циклонах

Средняя арифметическая ошибка прогнозов максимального ветра для всех заблаговременностей при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш., как правило, отрицательна. Следовательно, имеет место занижение прогноза максимального ветра.

Средняя арифметическая ошибка при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш. с увеличением заблаговременности изменяется от -5 м/с (на 12 ч) до -25 м/с (на 72 ч). При этом, занижение скорости максимального ветра в прогнозах больше характерно при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш.

Анализ качества инерционных прогнозов максимальной скорости ветра показывает преимущество методических численных прогнозов при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш.

2.3. Статистическая оценка преимущества методического прогноза системы HWRF-Ru над инерционным

Для проверки значимости преимущества методических прогнозов положения ТЦ системы HWRF-Ru был применен статистический t-критерий Стьюдента [7].

Если отрицательное значение t-статистики меньше соответствующего критического значения на выбранном уровне значимости (обычно 5 %), то это говорит о преимуществе методического прогноза над инерционным.

Данные табл. 2 подтверждают, что на уровне значимости 5 % ошибки методических прогнозов положения ТЦ значимо меньше, чем ошибки инерционного. Также становится ясно, что наилучшим образом удаются прогнозы положения ТЦ, на втором месте по качеству идут прогнозы направления перемещения, и на последнем месте – прогнозы скорости перемещения ТЦ.

Оценка качества методических прогнозов интенсивности ТЦ удовлетворительная, в большинстве случаев имеет место занижение прогноза давления в центре ТЦ при нахождении циклона на момент прогноза к северу от 25° с. ш., и завышение – при нахождении циклона на момент прогноза к югу от 25° с. ш. Максимальная скорость ветра в центре ТЦ занижается на сравнительно постоянную величину для каждой заблаговременности.

Таблица 2. Оценка статистической значимости преимущества методических прогнозов ТЦ перед инерционными прогнозами по статистическому t-критерию Стьюдента [8] за весь период оперативных испытаний 2014-2016 гг.

Table 2. Estimation of the statistical significance of advantage of methodical forecasts of TCs compared to persistent forecasts according Student's statistical t-criterion [8] for the entire period of operating testing during 2014-2016

Заблаговременность, ч	Число прогнозов	Число тайфунов	Значение t-статистики по Стьюденту (критическое значение t-статистики при уровне значимости 5 %)		
			Ошибка положения центра ТЦ	Средняя абсолютная ошибка скорости перемещения ТЦ	Средняя абсолютная ошибка направления перемещения ТЦ
24	523	68	-18,78 (-1,97)	-4,53 (-1,97)	-5,77 (-1,97)
48	428		-18,01 (-1,97)	-3,50 (-1,97)	-8,35 (-1,97)
72	335		-16,34 (-1,98)	-1,27 (-1,98)	-8,52 (-1,98)

2.4. Сравнение методических прогнозов системой HWRF-Ru с официальными прогнозами ТЦ ведущих мировых метеорологических агентств

Для оценки качества прогноза положения ТЦ проведено их сопоставление с официальными синоптическими прогнозами по данным Японского Метеорологического Агентства (JMA) и Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (Joint Typhoon Warning Centre, JTWC) для северо-западной части Тихого океана, а также с комплексным методом ДВНИГМИ (табл. 3, 4).

Таблица 3. Сравнение средней ошибки прогноза положения центра ТЦ (км) разными методами

Table 3. Comparison of an average error of the forecast of position of TCs (km) by different methods

Метод	Заблаговременность (час)		
	24	48	72
2014 г.			
Метод HWRF-Ru (опер. испытания)	98	188	273
Синоптический метод JMA	101	177	249
Синоптический метод JTWC	91	152	228
2015 г.			
Метод HWRF-Ru (опер. испытания)	87	150	218
Синоптический метод JMA	72	119	176
Синоптический метод JTWC	78	124	181

Анализ табл. 3 показывает, что численный метод системы HWRF-Ru прогноза положения центра ТЦ на период до 48 ч вполне сравним по качеству с оправдываемостью синоптических методов прогноза положения

ТЦ ведущих мировых метеорологических агентств (JMA и JTWC) со специализацией деятельности в области тропических циклонов.

Ввиду большой изменчивости ошибок прогноза положения ТЦ от года к году, была составлена сводная табл. 4, содержащая итоговые осредненные за период ошибки положения ТЦ. Для мировых метеорологических агентств принят период 5 лет. Оценки по методу HWRF-Ru усреднены за три года оперативных испытаний. Для сравнения приведены оценки комплексного физико-статистического метода В.П. Тунеголовца для сезона 2009 года [4].

Таблица 4. Сводная таблица средней ошибки положения центра ТЦ (км) разными методами

Table 4. Summary table of an average forecast error of position of the center of TCs (km) by different methods

Метод	Период оценки, год	Заблаговременность, ч		
		24	48	72
Численный метод HWRF-Ru	2014–2016	91	170	258
Официальные оценки Японского Метеорологического Агентства (JMA)	2011–2015	87	143	210
Официальные оценки Объединенного центра предупреждения о тайфунах США (JTWC)	2011–2015	96	167	244
Инерционный прогноз 1 рода	2014–2016	384	468	496
Комплексный физико-статистический метод (автор В. П. Тунеголовец, ДВНИГМИ, 2010)	2009	133	216	352

В соответствии с методическими указаниями [3], оправдываемость полностью автоматизированного метода прогноза положения центра ТЦ версией модели HWRF, используемой в ДВНИГМИ, оценивается как хорошая.

Выводы

Численный метод прогноза положения тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана системы HWRF-Ru при нахождении циклона на момент прогноза как к югу, так и к северу от 25° с. ш. позволяет с большой вероятностью рассчитывать будущее положение тропических циклонов с заблаговременностью до 72 ч включительно.

По всем показателям успешности метод имеет преимущество перед инерционными прогнозами. Отмечается некоторое занижение прогностической скорости смещения ТЦ по сравнению с фактической. Направление смещения ТЦ прогнозируется хорошо, качество прогнозов практически

не меняется с увеличением заблаговременности прогнозов, при этом преобладает повторяемость отклонения прогностических траекторий вправо, вне зависимости от нахождения циклона на момент прогноза к югу или к северу от 25° с. ш.

Основные положения метода прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана численной региональной моделью HWRf и результаты испытаний (изложенные выше) реализующей его технологии HWRf-Ru докладывались на Ученом Совете ФГБУ «ДВНИГМИ» 2 марта 2017 г., на Техническом Совете ФГБУ «Приморское УГМС» 4 апреля 2017 г. и на заседании Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета 20 июня 2017 года [<http://method.meteorf.ru>].

ЦМКП Росгидромета рекомендовала, в том числе:

– внедрить автоматизированный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана в составе выходной продукции численной региональной модели HWRf в ФГБУ «ДВНИГМИ» и для практического применения в оперативно-прогностической работе ДВ управлений Росгидромета, а также в Дальневосточном и Камчатском филиалах ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» в качестве **основного метода;**

– прогноз интенсивности ТЦ может использоваться в качестве **консультативного прогноза;**

– авторам продолжить работу по совершенствованию автоматизированной технологии краткосрочного (с заблаговременностью до 72 ч) прогноза положения и интенсивности тропических циклонов (ТЦ) и методов прогноза элементов и явлений погоды в окрестностях тропических циклонов по северо-западной части Тихого океана с учетом физико-географических и климатических особенностей рассматриваемого региона, включая вопрос об увеличении заблаговременности прогноза.

Благодарности

Работа выполнена благодаря неоценимой помощи сотрудников ФГБУ «ДВНИГМИ», коллег из ФГБУ «Хабаровский ЦГМС-РСМЦ» и кафедры океанологии и гидрометеорологии школы естественных наук ДВФУ. Всем им выражаем нашу искреннюю благодарность и признательность.

Список литературы

1. Крохин В.В. Автоматизированный метод краткосрочного (с заблаговременностью до 72 часов) прогноза положения тропических циклонов северо-западной части Тихого океана численной региональной моделью HWRf: Отчёт об оперативных испытаниях. Владивосток, 2003. 55 с.

2. Павлов Н.И. Тайфуны северо-западной части Тихого океана: дис. ... докт. геогр. наук. Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, 1998. 295 с.
3. РД.52.27.284-91. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиофизических прогнозов. 150 с.
4. Тунеголовец В.П., Сиротенко М.В. Результаты испытания комплексного метода прогноза перемещения и интенсивности тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана с заблаговременностью до 72 ч // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 38. 2010. С. 31-45.
5. Goerss J.S., Jeffries R.A. Assimilation of synthetic tropical cyclone observations into the Navy operational global atmospheric prediction system // *Wea. Forecast.* 1994. Vol. 9, no. 4. P. 557-576.
6. Gopalakrishnan S., Liu, Q., Marchok T. Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model: Scientific Documentation. 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://dtcenter.org/HurrWRF/users/docs/scientific_documents/HWRF_final_2-2_cm.pdf
7. McClung T. Global Forecast System: Technical Implementation Notice 16-11 Amended. Nation Weather Service. Archived from the original on 5 June 2016. Retrieved 5 June 2016. URL: http://www.nws.noaa.gov/os/notification/tin16-11gfs_gdasaaa.htm

References

1. Krokhin V.V. Avtomatizirovannyj metod kratkosrochnogo (s zablagovremennost'yu do 72 chasov) prognoza polozheniya tropicheskikh ciklonov severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana chislennoj regional'noj model'yu HWRF: Otchyot ob operativnyh ispytaniyah. Vladivostok, 2003. 55 p. [in Russ.].
2. Pavlov N.I. Typhoons of north-western part of Pacific ocean: Doctor PhD. Vladivostok, Tikhookeanskiy okeanologicheskiy institut im. Il'ichyova Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy Akademii nauk [V.I. Ilyichov Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Science], 1998, 295 p. [in Russ.].
3. RD.52.27.284-91. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu proizvodstvennyh (operativnyh) ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh metodov gidrometeorologicheskikh i geliiofizicheskikh prognozov, 150 p. [in Russ.].
4. Tunegolovets V.P., Sirotenko M.V. Rezul'taty ispytaniya kompleksnogo metoda prognoza peremeshcheniya i intensivnosti tropicheskikh ciklonov v severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana s zablagovremennost'yu do 72 ch. Rezul'taty ispytaniy novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyi sbornik. 2010, no. 38, pp. 31-45 [in Russ.].
5. Goerss J.S., Jeffries R.A. Assimilation of synthetic tropical cyclone observations into the Navy operational global atmospheric prediction system. *Weather and Forecasting*, 1994, vol. 9, no 4, pp. 557-576.
6. Gopalakrishnan S., Liu, Q., T. Marchok T. Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model: Scientific Documentation. 2016. available at: https://dtcenter.org/HurrWRF/users/docs/scientific_documents/HWRF_final_2-2_cm.pdf
7. McClung T. Global Forecast System: Technical Implementation Notice 16-11 Amended. Nation Weather Service. Archived from the original on 5 June 2016. Retrieved 5 June 2016. available at: http://www.nws.noaa.gov/os/notification/tin16-11gfs_gdasaaa.htm.

Поступила в редакцию 11.10.2018 г.

Received by the editor 11.10.2018.