# Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей

#### А.В.Быков, А.Н. Шихов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, 614990, Россия E-mail: bykovav@psu.ru

Статья посвящена оценке прогноза мезомасштабных конвективных систем (МКС), в которых наблюдались опасные метеорологические явления, по данным глобальных и мезомасштабных моделей атмосферы. Для этого реализованы два подхода: прогноз на основе физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости по выходным данным глобальных моделей атмосферы GFS и ПЛАВ и прямое моделирование конвекции с помощью мезомасштабной модели WRF с динамическими ядрами ARW и NMM. Для прогноза MKC по данным глобальных моделей, помимо известных параметров неустойчивости, был разработан новый индекс, базирующийся на модификации индекса плавучести. Проверочным материалом для оценки прогноза послужили спутниковые снимки Terra/Aqua MODIS, а также данные наблюдательной сети. На основе сопоставления прогнозируемых областей максимальной неустойчивости с фактическим положением МКС, которое определялось по спутниковым данным, было показано, что прогноз по отечественной модели ПЛАВ имеет более высокое качество, чем по модели GFS. Оценка успешности прогноза МКС по моделям WRF-NMM и WRF-ARW показала, что в большинстве случаев прогностическое положение МКС не соответствует фактическому, что может быть связано с ошибками в начальных условиях (данных глобальной модели GFS). Во внутримассовых ситуациях МКС иногда вообще не воспроизводятся. Также стоит отметить, что модель WRF-NMM существенно завышает площадь зон с сильными ливневыми осадками (≥30 мм/ч), а также их интенсивность. В связи с этим при прогнозе сильных ливней увеличивается число оправдавшихся прогнозов, но также растёт и число ложных тревог.

**Ключевые слова:** глобальные модели атмосферы, мезомасштабные модели атмосферы, данные MODIS, опасные метеорологические явления, мезомасштабные конвективные системы, Пермский край

Одобрена к печати: 07.03.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-213-224

#### Введение

Ежегодно в тёплый период над территорией Пермского края фиксируются случаи опасных метеорологических явлений (ОМЯ), связанных с развитием атмосферной конвекции. В подавляющем большинстве случаев эти ОМЯ происходят под влиянием мезомасштабных конвективных систем (МКС) масштаба мезо-α и мезо-β (Вельтищев, Степаненко, 2006; Шихов, Быков, 2016). Таким образом, задачу прогноза конвективных ОМЯ можно свести к прогнозу МКС.

Для прогноза МКС используется два основных подхода (Быков и др., 2017): 1) расчёт физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости по выходным данным глобальных прогностических моделей; 2) прямое моделирование атмосферной конвекции мезомасштабными моделями с высоким пространственным разрешением. При этом наибольшую сложность представляет прогнозирование места и времени возникновения МКС и зон опасных явлений. Для получения адекватной оценки качества прогнозов МКС по мезомасштабным моделям были предложены различные модификации объектно-ориентированного подхода (Вельтищев и др., 2011; Davis et al., 2006). Ранее для территории Среднего Урала решалась задача прямого моделирования МКС мезомасштабной моделью WRF с динамическим ядром ARW (Kalinin et al., 2017). Задача прогноза МКС физико-статистическими параметрами неустойчивости на территории России прежде не решалась: производился прогноз либо конвективных ОМЯ (Быков и др., 2017), либо грозы как явления (Губенко, Рубинштейн, 2015). В этой связи цель настоящего исследования — оценить применимость глобальных и мезомасштабных моделей для прогноза МКС над территорией Пермского края. Для исследования привлечены глобальные прогностические модели GFS и ПЛАВ, а также мезомасштабная модель WRF с динамическими ядрами ARW и NMM. Стоит отметить, что отечественная модель ПЛАВ применена для такого исследования впервые.

Всего рассмотрено 17 дней в июне – сентябре 2016 г., в течение которых наблюдалась грозовая активность. Из них в 14 случаях по данным Terra/Aqua MODIS были зафиксированы MKC, а в 9 случаях по данным сети метеостанций наблюдались ОЯ (КНЯ) конвективного характера. Таким образом, три раза MKC, вызвавшие ОЯ (КНЯ), не были зафиксированы по данным Terra/Aqua MODIS. Эти случаи наблюдались 19.06.2016, 30.07.2016 и 28.08.2016 и были связаны с короткоживущими MKC масштаба мезо-β. В связи с отсутствием спутниковых данных верификация прогноза этих случаев ОЯ (КНЯ) дана только по данным наблюдались тельной сети.

### Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных прогностических моделей

Для исследования были привлечены две глобальные прогностические модели с относительно высоким пространственным разрешением: NCEP-GFS и ПЛАВ-2014.

Модель GFS (Global Forecast System) разработана в NCEP (National Centers for Environmental Prediction), США. Модель использует редуцированную широтно-долготную сетку с горизонтальным разрешением около 13 км (Working Group on Numerical Experementation, http://wgne.meteoinfo.ru/nwp-systems-wgne-table/). Прогноз рассчитывается на срок 16 суток, формат выходных данных — GRIB-2. Расчёт прогноза осуществляется четыре раза в сутки. Файлы счёта модели доступны с разрешением 0,25; 0,5; 1 и 2,5° и шагом по времени 1 ч. Выбор данной модели также обусловлен тем, что в открытом доступе размещён архив прогнозов за последние два года.

Модель ПЛАВ (ПолуЛагранжева, основанная на уравнении абсолютного вихря) разработана в Институте вычислительной математики РАН и применяется в Гидрометцентре России в качестве оперативной. Модель использует широтно-долготную сетку с горизонтальным разрешением в Северном полушарии по широте и долготе 0,18×0,225° (Толстых и др., 2017; Tolstykh et al., 2015). Прогноз рассчитывается на срок 10 суток, формат выходных данных — GRIB-1. Расчёт прогноза осуществляется два раза в сутки. Данные счёта модели автоматически поступают на ftp-сервер Пермского государственного национального исследовательского университета.

По выходным данным прогностических моделей производился расчёт физико-статистических параметров (индексов) неустойчивости, по градациям значений которых оценивается вероятность возникновения ОМЯ конвективного характера. Рассчитывались значения следующих индексов неустойчивости: потенциальная доступная энергия неустойчивости (САРЕ), индекс плавучести (LI), энергия противодействия конвекции (CIN), индекс потенциальной неустойчивости (EPI), индекс Вайтинга (К), индекс Томпсона (TI), индекс мезомасштабных конвективных систем (MCS), индекс опасной погоды (SWEAT), относительная завихренность (SRH). Подробное описание этих индексов можно найти в работе (Быков и др., 2017). Для расчёта были использованы выходные данные прогностических моделей GFS и ПЛАВ от 0 ч BCB на срок 27 ч с шагом по времени 3 ч. Расчёт производился только для случаев, в которых складывались условия для развития конвекции. Расчёт значений индексов CIN и SRH по данным модели ПЛАВ не выполнялся. Кроме того, для прогноза МКС в синоптических ситуациях со слабым динамическим фактором был разработан новый комплексный индекс неустойчивости, базирующийся на модификации индекса плавучести (LI). Индекс использует отклонение кривой стратификации от кривой состояния для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя до уровня изотерм 0, -20 и -40 °C. Выбор этих изотерм обусловлен тем, что электризация в кучево-дождевом облаке происходит, если его верхняя граница превышает изотерму -22 °C, а основание располагается ниже изотермы 0 °C (Руководство..., 1993). Если вершина кучеводождевого облака превышает высоту изотермы -40 °C, то можно говорить о глубокой конвекции. Кроме того, в индекс вводится поправка на среднюю относительную влажность в слое тропосферы между изотермами 0 и -10 °C. В итоге индекс для прогноза конвективных ОМЯ вычисляется по формуле:

SEVERE\_INDEX = 
$$RH_{0^{\circ},-10^{\circ}} \frac{MULI_{0-180,0^{\circ}} + MULI_{0-180,-20^{\circ}} + MULI_{0-180,-40^{\circ}}}{3}$$

где RH<sub>0°,-10°</sub> — средняя относительная влажность в слое тропосферы, заключённом между изотермами 0 и -10 °C, MULI<sub>0-180,0°</sub>, MULI<sub>0-180,-20°</sub>, MULI<sub>0-180,-20°</sub> — отклонение кривой стратификации от кривой состояния для частицы воздуха, поднявшейся от наиболее неустойчивого слоя до уровня изотерм 0, -20 и -40 °C. Индекс обращается в ноль в том случае, если уровень конденсации располагается выше изотермы 0 °C либо уровень конвекции располагается ниже изотермы -40 °C, что позволит уменьшить процент ложных тревог по сравнению с индексом плавучести (LI). Отрицательные значения индекса указывают на возможность развития MKC.

Для автоматизации получения выходных данных прогностических моделей и их последующей обработки были написаны сценарии для операционной системы Linux. Расчёт индексов неустойчивости производился автоматически в свободно распространяемом программном комплексе OpenGrADS 2.0.2, предназначенном для визуализации и обработки метеорологических данных. Для OpenGrADS был разработан пакет сценариев, который позволяет автоматически рассчитывать поля значений индексов неустойчивости и выводить их в формат GeoTIFF, пригодный для чтения геоинформационными системами. Расчёты производились под управлением операционной системы Red Hat Enterprise Linux 6 на многопроцессорном вычислительном комплексе с гибридной архитектурой ПГНИУ-Кеплер. Обработка результатов и оценка качества прогноза МКС проводились в свободно распространяемой геоинформационной системе QGIS 2.14.

Для оценки качества прогноза была использована температура верхней границы облачности (ВГО), полученной со спутниковых снимков Terra и Aqua (прибор MODIS). Прогноз считался оправдавшимся, если МКС находилась на расстоянии не более 50 км от ближайшей точки со значением индекса, достигающим порогового уровня (при котором вероятно возникновение ОМЯ конвективного характера). В связи с большим объёмом данных значения индексов рассчитывались только в точках, где индекс Томпсона достигал порогового уровня. В случае, когда точка с максимальным значением индекса Томпсона находилась на расстоянии более 50 км от фактического положения МКС, выбиралась ещё одна точка с максимальным значением МКС. Обоснование выбора индекса Томпсона приведено в работе (Быков и др., 2017). Оценка качества прогнозов производилась по критерию Пирси – Обухова и связанным с ним характеристикам успешности прогноза.

На первом этапе расчётов использовались пороговые значения индексов, рекомендованные их разработчиками. Обзор индексов и их пороговых значений приведён в работе (Быков и др., 2017). Эти значения были получены по результатам тестирования индексов на территории США и Западной Европы и поэтому могут быть непригодны для прогноза по исследуемой территории. С учётом этого для каждого индекса был произведён подбор оптимальных пороговых значений для территории Урала, при которых достигается наибольший процент оправдавшихся прогнозов. Исходные и оптимизированные пороговые значения индексов для моделей GFS и ПЛАВ приведены в *табл. 1* и 2 (см. с. 216).

Индекс			Параметр		
	Пороговое значение	Критерий Пирси – Обухова	Ложная тревога, %	Пропуск, %	Оправдавшиеся прогнозы, %
SB CAPE	2500/1400	-0,04/-0,05	2,7/10,8	64,9/48,6	32,4/40,5
ML CAPE	2500/800	0/-0,22	0/16,2	67,6/48,6	32,4/35,1
MU PBL CAPE	2500/1200	0/-0,01	0/10,8	67,6/48,6	32,4/40,5
MU CAPE	2500/1400	-0,04/-0,01	2,7/13,5	64,9/46	32,4/40,5
SB CIN	-200/-200	0,12/0,12	27/27	2,7/2,7	70,3/70,3
SB LI	-6/-1	-0,01/-0,08	5,4/32,4	56,8/5,4	37,9/62,2
ML LI	-6/-0,5	-0,08/-0,08	2,7/32,4	67,6/5,4	29,7/62,2
MU PBL LI	-6/-1,5	-0,12/-0,04	5,4/29,7	64,9/8,1	29,7/62,2
EPI	0/0	0,06/0,06	18,9/18,9	43,2/43,2	37,8/37,8
К	35/30	-0,22/-0,04	16,2/32,4	29,7/2,7	54,1/64,9
MCS	0/0	-0,04/-0,04	5,4/5,4	59,5/59,5	35,1/35,1
SRH	150/150	0,11/0,11	5,4/5,4	48,6/48,6	45,9/45,9
SWEAT	250/190	0,06/0,22	16,2/16,2	29,7/18,9	54,1/64,9
TI	40/32	0,03/-0,04	8,1/32,4	48,6/2,7	43,2/64,9
SEVERE	0/0	-0,15/-0,15	29,7/29,7	16,2/16,2	54,1/54,1

*Таблица 1*. Оценка успешности прогноза МКС по модели GFS до и после подбора пороговых значений: в числителе — значение до подбора, в знаменателе — после подбора

*Таблица 2*. Оценка успешности прогноза МКС по модели ПЛАВ до и после подбора пороговых значений: в числителе — значение до подбора, в знаменателе — после подбора

Индекс			Параметр		
	Пороговое значение	Критерий Пирси – Обухова	Ложная тревога, %	Пропуски, %	Оправдавшиеся прогнозы, %
SB CAPE	2500/500	0,11/0,15	0/28,6	51/10,2	49/61,2
ML CAPE	2500/300	0/0,29	0/24,5	57,1/8,2	42,9/67,3
MU PBL CAPE	2500/700	0/0,17	0/18,4	57,1/22,4	42,9/59,2
MU CAPE	2500/500	0,11/0,31	0/26,5	51/4,1	49/69,4
SB LI	-6/-2	0,06/0,18	2/24,5	51/14,3	50/61,2
ML LI	-6/-1	0,04/0,27	0/26,7	55,1/6,1	44,9/67,3
MU PBL LI	-6/-2,5	0,1/0,18	0/16,3	51/24,5	49/59,2
EPI	0/0	0,18/0,18	12,2/12,2	30,6/30,6	57,1/57,1
К	35/34	-0,15/-0,15	14,3/14,3	46,9/47	38,8/38,8
MCS	0/0	0,07/0,07	0/0	53,1/46,9	46,9/46,9
SWEAT	250/210	0,04/0,07	12,2/12,2	38,8/36,7	49/51
TI	40/33	-0,04/0,14	6,1/30,6	51/8,2	42,9/61,2
SEVERE	0/0	0,18/0,18	30,6/30,6	6,1/6,1	63,3/63,3

При использовании прогнозов модели ПЛАВ подбор оптимальных пороговых значений позволил существенно повысить значения критерия Пирси – Обухова для ряда индексов (ML CAPE, MU PBL CAPE, MU CAPE, SB LI, ML LI). При этом количество оправдавшихся прогнозов возросло на 10–20%. При использовании прогнозов модели GFS повысить успешность прогноза с помощью проведённой оптимизации удалось только для индекса SWEAT. Для остальных индексов существенно повысить качество прогноза не удалось: процент оправдавшихся прогнозов увеличился на 10-20%, но значения критерия Пирси-Обухова остались неудовлетворительными.

Оптимизированные пороговые значения большинства индексов оказались по модулю существенно ниже, чем рекомендованные разработчиками. Это позволило многократно сократить количество пропусков явлений (в ряде случаев — в 10 раз и более). При этом значительно возросло также число ложных тревог, но рост процента ложных тревог оказался меньше, чем сокращение процента пропусков явлений.

В целом качество прогноза MKC по модели GFS оценивается как неудовлетворительное. Также стоит отметить, что в четырёх случаях модель GFS неточно воспроизвела синоптическую ситуацию и положение зоны активной конвекции, что отразилось на качестве прогноза MKC при помощи индексов неустойчивости. Наиболее подходящими для прогноза MKC по модели GFS оказались индексы CIN и SWEAT (см. *табл. 1*), так как они дают наибольший процент оправдавшихся прогнозов и обладают наибольшими значениями критерия Пирси – Обухова. Также сравнительно высокий процент оправдавшихся прогнозов имеют индексы Томпсона и Вайтинга, но при этом они дают большой процент ложных тревог, что отражается в низких значениях критерия Пирса–Обухова. Разработанный индекс опасной погоды оказался неподходящим для прогноза MKC по данным модели GFS.

По модели ПЛАВ качество прогноза МКС оказалось лучше, чем по GFS, так как модель ПЛАВ только в одном случае (31.07.2016) не воспроизвела текущую синоптическую ситуацию. По модели ПЛАВ наилучшие значения критерия Пирси – Обухова отмечены у различных разновидностей индексов САРЕ и LI (см. *табл. 2*), но полученные пороговые значения оказались довольно низкими. Высокие значения критерия Пирси – Обухова отмечены также у индекса EPI, но он даёт значительный процент пропусков МКС. Кроме того, высокими значениями критерия Пирси – Обухова обладают индекс Томпсона и разработанный индекс опасной погоды. Наиболее мощные МКС развивались при значениях разработанного индекса опасной погоды –3 и ниже. Для разработанного индекса характерен низкий процент неоправдавшихся прогнозов и относительно высокий процент ложных тревог. Пример применения разработанного индекса представлен на *рис. 1*.



Рис. 1. Прогноз МКС 12.07.2016 по данным модели ПЛАВ на 9:00 ВСВ: температура ВГО по данным спутника Aqua (прибор MODIS) 9:20 ВСВ (*a*); прогностическое поле значений индекса опасной погоды (*б*); прогностическое поле значений индекса плавучести LI (*в*)

Заметно, что поле его отрицательных значений занимает меньшую площадь, чем у Lifted Index, что указывает на снижение числа ложных тревог.

Таким образом, у отечественной модели ПЛАВ отмечено более высокое качество прогноза MKC, чем у GFS. На данных этой модели наилучшее качество прогноза MKC в ситуациях без значительного динамического фактора развития конвекции отмечено с индексами Томпсона, MU CAPE и разработанного индекса опасной погоды, в то время как для модели GFS наилучшее качество прогноза достигается с применением индексов Томпсона, Вайтинга и CIN. Для прогноза MKC по обеим моделям в ситуациях со значительным динамическим фактором рекомендуется использовать индекс SWEAT.

### Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением модели WRF

Моделирование возникновения и эволюции МКС производилось с помощью модели WRF (Weather Research and Forecasting), детальное описание которой приведено в работе (Skamarock et al., 2008). Расчёты выполнены с использованием модели WRF версии 3.8.1 с динамическими ядрами ARW (Advanced Research WRF) и NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). В настоящее время модели WRF-ARW и WRF-NMM представляют собой по существу отдельные прогностические системы, требующие самостоятельной процедуры установки, хотя в них имеется достаточно много общих элементов (Вельтищев, Жупанов, 2010). Одной из целей проведённого исследования было сравнение воспроизводимости процессов формирования и эволюции МКС с помощью этих моделей.

Программные комплексы моделей WRF-ARW и WRF-NMM установлены на многопроцессорном вычислительном комплексе с гибридной архитектурой ПГНИУ-Кеплер, состоящем из восьми вычислительных узлов iDataPlex DX360 M4 на базе процессоров Intel Xeon E5-2680 и видеокарт NVidia Tesla K20. Принятые настройки модели WRF приведены ниже. Модель запускалась в режиме прямого моделирования глубокой конвекции, что предполагает возможность воспроизведения эволюции MKC и связанных с ними OЯ (сильных ливней, шквалов и града). В качестве проверочного материала для оценки прогнозов MKC по мезомасштабным моделям обычно используются данные допплеровских радиолокаторов (ДМРЛ), а сама оценка выполняется с применением объектно-ориентированного подхода (Вельтищев, Жупанов, 2010; Вельтищев и др., 2011; Davies et al., 2006).

Шаг сетки	.3 км/0,0191×0,0189°
Число узлов	.600×600/380×750
Число вертикальных уровней	.42/42
Модель рельефа.	.U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
Срок прогноза	.27 ч, от 0 ч ВСВ, с предварительным усвоением
	данных объективного анализа за 12 ч
Временной шаг вывода данных	.1ч
Динамическое ядро	.ARW/NMM
Шаг интегрирования по времени	.18 c/6 c
Начальные и граничные условия	. Прогноз GFS с шагом сетки 0,5°
Микрофизика облачности	. Схема Томпсона
Планетарный пограничный слой	. Схема университета Yonsei/Схема
	Меллора-Ямады-Янича (Еta)
Подстилающая поверхность	. Модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	. Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)/Схема
	GFDL (Eta)
Приземный слой	. Схема Монина – Обухова с вязким подслоем
	Карлсона – Боланда и стандартными функциями
	подобия
Конвекция	.Прямое моделирование (без параметризации)

#### Принятые настройки модели WRF

Примечание: в числителе — WRF-ARW, в знаменателе — WRF-NMM.

Объектно-ориентированный подход предполагает сопоставление фактического (определяемого обычно по данным ДМРЛ) и прогностического положения МКС и зон развития ОЯ. Поскольку большая часть исследуемой территории не попадает в зону наблюдения ДМРЛ, установленных в Ижевске и Кирове, для верификации результатов моделирования были использованы спутниковые данные Terra/Aqua MODIS о температуре ВГО. Процедура верификации на основе упрощённого объектно-ориентированного подхода в основных чертах описана в работах (Шихов, Быков, 2016; Kalinin et al., 2017). В качестве критериев оценки учитывалось расстояние между фактическим и модельным положением МКС в момент получения спутникового снимка (ошибка по положению), а также значение температуры ВГО по данным MODIS и по модели (*табл. 3*).

Дата	Время	Минимальная температу- pa BГО, °C (WRF-ARW/ WRF-NMM)	Минимальная температура ВГО, °С (MODIS)	Максимальная отражаемость, DBz (WRF-ARW/ WRF-NMM)	Расстояние меж- ду фактическим и модельным по- ложением MKC (WRF-ARW/ WRF-NMM)	Общая оценка успешности прогноза
07.06.2016	08:50	-60/-60	-61	54/56	100/90	0,5/0,5
07.06.2016	16:35	-58/-59	-59	46/46	-/115	0/0,5
07.06.2016	18:15	-58/-58	-56	41/46	-/125	0/0,5
20.06.2016	08:05	-68/-64	-63	65/60	15/40	1/0,5
20.06.2016	09:55	-64/-63	-65	57/57	0/60	1/0,5
23.06.2016	08:50	-52/-54	-55	51/55	45/20	0,5/1
11.07.2016	08:35	—56/нет данных	-57	54/нет данных	125/нет данных	0,5/нет данных
12.07.2016	07:30	-58/-56	-59	56/52	60/100	0,5/0,5
12.07.2016	09:20	-58/-54	-58	55	70/40	0,5/0
13.07.2016	10:00	-56/-52	-53	53/54	65/70	0,5/0,5
17.07.2016	17:25	-47/-51	-52	49/57	-/70	0/0,5
01.08.2016	08:55	-62/-63	-65	57/68	100/40	0,5/0,5
01.08.2016	16:45	-63/-62	-66	57/57	70/-	0,5/0
04.08.2016	09:25	-/-49	-63	—/48	-/10	0/0
11.08.2016	09:30	-54/-57	-61	25/57	10/70	0/0,5
12.08.2016	18:00	-61/-57	-61	60/58	100/50	0,5/1
14.08.2016	21:50	_/_	-64	_/_	_/_	0/0
24.08.2016	22:30	-59/-	-58	53/46	110/-	0,5/0
04.09.2016	18:05	-48/-52	-57	47/50	35/100	0,5/0,5

Таблица 3. Оценка успешности прогноза МКС по модели WRF

Примечание: прочерк означает отсутствие явления по модели.

На основе этих критериев была дана общая оценка качества прогноза (0 — не оправдался; 0,5 — частично оправдался; 1 — оправдался). Оценка «1» ставилась в том случае, если фактическое (по данным MODIS) и прогностическое (по модели WRF) положение MKC различалось не более чем на 50 км, а время их прохождения — не более чем на 1 ч и при этом значения температуры ВГО различались несущественно. Оценка «0,5» ставилась в том случае, если модель воспроизводила формирование МКС с существенными расхождениями по времени прохождения (1–3 ч) или по пространственному положению (до 150 км). Также прогноз считался частично оправдавшимся, если смещение по времени и положению отсутствовало, но наблюдались существенные различия по температуре ВГО (более 5 °C). Прогноз считался не оправдавшимся (оценка «0»), если модель вообще не воспроизводила развитие конвекции

в районе формирования МКС либо смещения по времени и пространственному положению были неприемлемыми (более 150 км по пространству и более 3 ч по времени).

В целом из *табл. 3* следует, что успешность прогноза МКС по моделям WRF-ARW и WRF-NMM различается незначительно. Обе модели не воспроизводят развитие глубокой конвекции во внутримассовых ситуациях, когда отсутствует выраженная сходимость воздушных течений. Аналогичные результаты были получены и в работе (Kalinin et al., 2017). Более надёжные прогнозы получены в случаях, когда МКС формировались на хорошо выраженных атмосферных фронтах и на фоне высокого общего влагосодержания атмосферы (например, 20.06.2016, 12.08.2016). Также обе модели существенно завышают площадь облачности верхнего яруса, образующейся при развитии МКС. В большей степени этот недостаток характерен для модели NMM (*puc. 2*).



Рис. 2. Прогноз МКС 12.08.2016 на 18:00 ВСВ: прогностическое поле значений индекса опасной погоды по модели ПЛАВ (*a*); температура ВГО по данным спутника Aqua (прибор MODIS) (*b*); прогностическое поле температуры ВГО по моделям WRF-NMM (*b*) и WRF-ARW (*c*); прогностическое поле радиолокационной отражаемости по моделям WRF-NMM (*d*) и WRF-ARW (*e*)

Относительно оценки прогноза самих ОМЯ (*табл. 4*) стоит отметить существенное различие между моделями ARW и NMM по характеру ошибок (пропусков и ложных тревог). Так, для модели WRF-ARW более характерны ошибки пропуска явления (пять из девяти рассматриваемых случаев). Модель NMM даёт меньшее число пропусков, но значительно завышает количество ливневых осадков и допускает большое число ложных тревог по сильным ливням, что соответствует оценкам, приведённым в работах (Вельтищев, Жупанов, 2010; Вельтищев и др., 2011). Осреднённое по территории количество конвективных осадков по модели NMM во всех рассматриваемых случаях было в 1,5–2,2 раза больше, чем по модели ARW. Что касается прогноза шквалов, то для оценки его надёжности имеющейся выборки было недостаточно.

Дата, время	Характеристика ОЯ или КНЯ	Максимальное количество осад- ков по модели в радиусе 100 км (ARW/NMM, мм)	Максимальная скорость шква- ла по модели в радиусе 100 км (ARW/NMM, м/с)	Ошибка по положе- нию места возникнове- ния ОЯ, км	Ошибка по време- ни возник- новения ОЯ, ч	Общая оценка успеш- ности прогноза
20.06.2016, 18:00—21:00 ч ВСВ	МС Верещагино: очень сильный дождь 61 мм, шквал 20 м/с	12/55	_/_	-/30	-/3	0/0,5
12.07.2016, 12:00 ч ВСВ	MC Чернушка: шквал 24 м/с, ливень 29 мм/1 ч, град 10 мм	47/30	15/15	40/70	1/2	0,5/0,5
17.07.2016, 15:00—21:00 ч ВСВ	MC Кунгур: очень сильный дождь 51 мм/6 ч	20/68	_/_	-/30	-/3	0/0,5
31.07.2016, 12:00 ч ВСВ	МС Кочево: сильный ливень (46 мм/52 мин)	99/70	13/13	20/67	0/1	1/0,5
01.08.2016, 09:00—15:00 ч ВСВ	MC Кочево: шквал 22 м/с, ливень 27 мм	28/86	-/17	40/70	3/0	0/1
04.08.2016, 10:00 ч ВСВ	МС Чермоз: шквал 25 м/с, ливень 23 мм	_/_	_/_	_/_	_/_	0/0
11.08.2016, 12:00 ч ВСВ	MC Оханск: сильный ливень (45 мм/1 ч)	27/117	18/14	85/5	3/0	0/1
12.08.2016, 15:00—18:00 ч ВСВ	МС Чердынь: сильный ливень (32 мм/1 ч)	52/70	18/16	30/40	0/0	1/0,5
28.08.2016, МС Пермь	Град диаметром 14 мм, ливень 19 мм, шквал (около 20 м/с по косвенным признакам)	10/25	15/19	-/50	1/1	0/0,5

Таблица 4. Оценка качества прогноза конвективных ОМЯ моделью WRF

Примечание: прочерк означает отсутствие явления по модели.

#### Заключение

Анализ результатов прогноза мезомасштабных конвективных систем на территории Пермского края в 2016 г. позволяет сделать следующие выводы.

Среди рассмотренных глобальных моделей наилучшим качеством прогноза МКС в тёплый период года обладает отечественная модель ПЛАВ, так как ошибки воспроизведения синоптической ситуации данной моделью встречаются реже, чем у GFS. Совместно с этой моделью для синоптических ситуаций с незначительным динамическим фактором следует применять различные виды индекса плавучести LI (в особенности ML LI), индекс САРЕ (энергии неустойчивости), индекс Томпсона, а также разработанный индекс опасной погоды, который основан на индексе плавучести для наиболее неустойчивого перемешанного слоя MU PBL LI и улучшает его качество. В дальнейшем предполагается усовершенствовать разработанный индекс заменой наиболее неустойчивого слоя на перемешанный слой, а также учесть в индексе динамический фактор; данные исследования будут проведены на выборке случаев из тёплого сезона 2017 г.

Фундаментальной причиной, объясняющей более высокое качество прогноза МКС по модели ПЛАВ, является то, что данная модель адаптирована для территории России, а GFS — для территории США. В связи с этим можно предположить, что отечественная модель также более успешно воспроизводит синоптическое положение и метеорологические явления в другие периоды года.

Модель WRF с динамическими ядрами ARW и NMM в большинстве случаев воспроизводит MKC со смещением по времени или по пространству, что можно объяснить начальными условиями (ошибками в данных модели GFS). Кроме того, во внутримассовых ситуациях MKC зачастую не воспроизводятся вообще. Тем не менее в ряде случаев модель WRF, в особенности с динамическим ядром ARW, успешно воспроизводит формирование и эволюцию MKC и может применяться для сверхкраткосрочного прогноза с точностью по времени  $\pm 1-2$  ч.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории перспективных численных методов в моделях атмосферы Гидрометцентра России и лично Толстых Михаилу Андреевичу за предоставленные данные счёта модели ПЛАВ. Также авторы выражают благодарность сотрудникам научно-образовательного центра «Параллельные и распределённые вычисления» Пермского государственного национального исследовательского университета и лично Ветрову Андрею Леонидовичу за предоставленные вычислительные ресурсы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-45-590823 р\_а и 17-45-590850 р\_а).

#### Литература

- 1. *Быков А. В., Ветров А. Л., Калинин Н. А.* Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 363. С. 101–119.
- 2. Вельтищев Н. Ф., Степаненко В. М. Мезометеорологические процессы. М., 2006. 101 с.
- 3. Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // 80 лет Гидрометцентру России: сб. ст. 2010. С. 94–135.
- 4. Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д., Павлюков Ю. Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18.
- 5. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–37.
- 6. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 264 с.

- 7. Толстых М.А., Шашкин В.В., Фадеев Р.Ю., Шляева А.В., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Богословский Н.Н., Гойман Г.С., Махнорылова С.В., Юрова А.Ю. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. М.: Триада-ЛТД, 2017. 166 с.
- 8. Шихов А. Н., Быков А. В. Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 137–148.
- 9. *Davis C.A., Brown B., Bullock R.* Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Application to convective rain systems // Monthly Weather Review. 2006. V. 134(7). P. 1785–1795.
- 10. *Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V.* Forecasting mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data // Russian Meteorology and Hydrology. 2017. V. 42. Iss. 1. P. 9–18.
- 11. Skamarock W., Klemp J., Dudhia J., Gill D., Barker D., Duda M.G., Huang X.-Y, Wang W., Powers J.G. A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note -475+STR. Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research Boulder, 2008. 113 p.
- Tolstykh M.A., Volodin E. M., Kostrykin S. V., Fadeev R. Y., Shashkin V. V., Bogoslovskii N. N., Vilfand R. M., Kiktev D. B., Krasjuk T. V., Mizyak V. G., Shlyaeva A. V., Geleyn J.-F., Ezau I. N., Yurova A. Y. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40. Iss. 6. P. 374–382.

## Mesoscale convective systems forecast using global and mesoscale atmospheric models

#### A.V. Bykov, A.N. Shikhov

Perm State University, Perm 614990, Russia E-mail: bykovav@psu.ru

The article is devoted to the evaluation of forecast of mesoscale convective systems (MCS) with hazardous weather events (squalls, large hail and heavy rainfall) according to the global and mesoscale atmospheric models data. Two approaches are implemented to perform this evaluation. They are the forecast based on the instability indices calculated from the GFS and SLAV global atmospheric models output, and explicit (cloud-resolving) modeling of the deep convection using WRF-ARW and WRF-NMM mesoscale models. New instability index is developed for MCS forecast on the global atmospheric models output data. This index is based on the Lifted Index (LI) modification. Terra/Aqua MODIS satellite images and ground-based weather station data are used to estimate the reliability of MCS and hazardous weather events forecasts respectively. It is shown, that the SLAV model forecasts are more reliable in comparison with GFS forecasts, according to comparison of simulated areas of maximum convective instability with satellite-observed MCS position. The estimation of the cloudresolving MCS forecasts by the WRF-ARW and WRF-NMM models shows that the simulated MCS spatial position often did not coincide with the MODIS-observed position. This could be associated with errors in initial conditions (GFS forecast data). Besides, the WRF model does not reproduce the MCS which were formed in the absence of a dynamic (frontal) convection. It should be noted that WRF-NMM model significantly overestimates the convective precipitation intensity and the areas with heavy showers (> 30 mm/h). Because of this, the amount of correct forecasts is increasing; however, the commission error is also rising.

**Keywords:** global atmospheric models, mesoscale atmospheric models, MODIS data, severe weather events, mesoscale convective systems, Perm krai

Accepted: 07.03.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-213-224

#### References

 Bykov A. V., Vetrov A. L., Kalinin N. A., Prognoz opasnykh konvektivnykh yavlenii v Permskom krae s ispol'zovaniem global'nykh prognosticheskikh modelei (Forecast of hazardous convective events in the Perm Krai using global forecast models), *Trudy Gidromettsentra Rossii*, 2017, Vol. 363, pp. 101–119.

- 2. Vel'tishchev N. F., Stepanenko V. M., *Mezometeorologicheskie protsessy* (Mesoscale meteorological processes), Moscow, 2006, 101 p.
- 3. Vel'tishchev N. F., Zhupanov V. D., Chislennye prognozy pogody po negidrostaticheskim modelyam obshchego pol'zovaniya WRF-ARW i WRF-NMM (Numerical weather forecasts by non-hydrostatic open-source models WRF-ARW and WRF-NMM), In: *80 let Gidromettsentru Rossii* (80 years to the Hydrometeorological Center of Russia), 2010, pp. 94–135.
- 4. Vel'tishchev N. F., Zhupanov V. D., Pavlyukov Yu. B., Kratkosrochnyi prognoz sil'nykh osadkov i vetra s pomoshch'yu razreshayushchikh konvektsiyu modelei WRF (Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, No. 1, pp. 5–18.
- 5. Gubenko I. M., Rubinshtein K. G., Analiz rezul'tatov rascheta grozovoi aktivnosti s pomoshch'yu indeksov neustoichivosti atmosfery po dannym chislennoi modeli WRF-ARW (Analysis of the results of thunderstorm forecasting based on atmospheric instability indices using the WRF-ARW numerical model data), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2015, No. 1, pp. 27–37.
- 6. Rukovodstvo po proizvodstvu nablyudenii i primeneniyu informatsii s neavtomatizirovannykh radiolokatorov MRL-1, MRL-2, MRL-5 (Manual for the production of observations and the application of information from non-automated radars MRL-1, MRL-2 and MRL-5), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993, 264 p.
- Tolstykh M.A., Shashkin V.V., Fadeev R.Yu., Shlyaeva A.V., Mizyak V.G., Rogutov V.S., Bogoslovskii N.N., Goiman G.S., Makhnorylova S.V., Yurova A.Yu., *Sistema modelirovaniya atmosfery dlya besshovnogo prognoza* (The atmospheric modeling system for coupled forecast), Moscow: Triada-LTD, 2017, 166 p.
- Shikhov A. N., Bykov A. V., Otsenka kachestva prognoza mezomasshtabnykh konvektivnykh sistem na Zapadnom Urale s pomoshch'yu modeli WRF i sputnikovykh dannykh MODIS (Assessment of forecast quality of mesoscale convective systems in Western Urals region using WRF model and MODIS satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 137–148.
- 9. Davis C.A., Brown B., Bullock R., Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Application to convective rain systems, *Monthly Weather Review*, 2006, Vol. 134(7), pp. 1785–1795.
- 10. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Bykov A.V., Forecasting mesoscale convective systems in the Urals using the WRF model and remote sensing data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2017, Vol. 42, Issue 1, pp. 9–18.
- 11. Skamarock W., Klemp J., Dudhia J., Gill D., Barker D., Duda M.G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J.G., *A description of the Advanced Research WRF Version 3*, NCAR Technical Note -475+STR, National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA, 2008, 113 p.
- Tolstykh M. A., Volodin E. M., Kostrykin S. V., Fadeev R. Y., Shashkin V. V., Bogoslovskii N. N., Vilfand R. M., Kiktev D. B., Krasjuk T. V., Mizyak V. G., Shlyaeva A. V., Geleyn J.-F., Ezau I. N., Yurova A. Y., Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, Vol. 40, Issue 6, pp. 374–382.