

ПРОГНОЗ СИЛЬНОГО И ОЧЕНЬ СИЛЬНОГО СНЕГОПАДАНА УРАЛЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ WRF

*Е.В. Пищальникова, Н.А. Калинин, А.Л. Ветров, А.Н. Шихов,
Е.М. Связов, А.В. Быков*

*Пермский государственный национальный исследовательский
университет
meteo@psu.ru*

Введение

Для территории России и других северных стран сильный и очень сильный снегопад является часто встречающимся неблагоприятным и опасным метеорологическим явлением. Значительная продолжительность холодного периода, активная циклоническая деятельность, близость к Арктическим морям и Атлантике, наличие естественного препятствия в виде горного хребта создают благоприятные условия для частых снегопадов на Урале. Математические модели атмосферы различного масштаба широко используются для прогноза осадков, в том числе в холодное полугодие [4, 5, 10, 14]. К числу наиболее распространенных инструментов моделирования мезомасштабных атмосферных процессов относится модель WRF. Изучение случаев возникновения опасных явлений погоды в холодный период года с помощью модели WRF можно найти в работах [11–13, 15, 16]. Для территории России исследованы возможности модели WRF на примере отдельных случаев возникновения осадков в твердом виде [1–3, 6].

В настоящей статье представлены результаты прогноза случаев сильного (6–19 мм/12ч) и очень сильного (20 и более мм/12ч) снегопада, отмечавшегося с 17 по 23 октября 2014 г. и с 7 по 9 октября 2015 г. на территории Урала, с использованием модели WRF разных версий.

Синоптические условия и погода при снегопадах на Урале

Средняя многолетняя повторяемость случаев очень сильных снегопадов в октябре на Среднем Урале составляет 17 % [9], самый ранний случай отмечался 2 октября 1978 г. По данным стационарной сети метеорологических станций, в октябре 2014 и 2015 гг. на Среднем Урале отмечались снегопады, достигшие критерия опасного природного явления [8]. За полусуточные интервалы выпало от 20 до 32 мм осажженной воды [7], что составляет 40–90 % месячной нормы осадков. Установление снежного покрова произошло на 2–3 недели раньше средних многолетних сроков, что привело к блокированию части сельскохозяйственной техники на полях. В период выпадения снегопадов движение транспорта в Перми и Екатеринбурге было парализовано.

Первый случай очень сильного снегопада (18 октября 2014 г.) произошел под влиянием теплого фронта полярной системы, связанной с западным циклоном, находящимся на стадии максимального развития; второй (23 октября 2014 г.) – под влиянием фронта окклюзии, сформировавшегося при сегментации северо-западного циклона; третий (8–9 октября 2015 г.) – под влиянием теплого фронта, связанного с молодым южным циклоном. Рассмотрим развитие синоптических процессов подробнее.

В первом случае облачная система теплого участка полярного фронта начала оказывать влияние на территорию Урала уже 16 октября, вызвав по югу Пермского края умеренные и сильные снегопады. Приземная линия фронта была ориентирована вдоль параллели 55° с. ш. и располагалась от центра циклона в районе Рязани через города Н. Новгород – Казань – Уфа. Контраст в зоне фронта по приземной карте в 0 ч ВСВ 16.10.2014 г. составил 2° С/100 км, по карте OT_{1000}^{500} – 36 гп. дам/1000 км. В это время воздушная масса над Пермским краем, сформированная под влиянием южной периферии низкого холодного антициклона, обладала максимальной температурой воздуха от -5 до 1° С. Воздушная масса теплого сектора западного молодого циклона, прогревшись до 12 – 17° С, смещалась на северо-восток. Ширина переходной зоны между этими воздушными массами составила 200 км, а максимальная температура воздуха в ней изменялась от 2 до 6° С.

Выпадение умеренных и сильных снегопадов 17 октября продолжилось, зона осадков расширилась и охватила юг Свердловской и север Челябинской областей.

Теплый фронт на приземной карте в 0 ч ВСВ 18.10.2014 г. (рис. 1) был ориентирован от центра циклона, находящегося в стадии максимального развития в районе Казани, вдоль южной границы Пермского края через Челябинскую область на Казахстан.

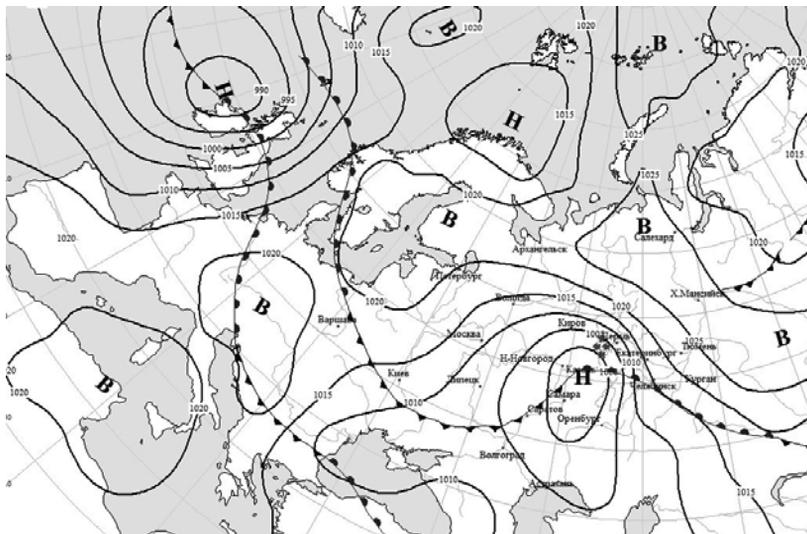


Рис. 1. Анализ приземный от 00 ч ВСВ 18.10.2014 г.

Интенсивная адвекция тепла и влаги, а также расходимость изогипс в средней тропосфере обусловили падение давления у земли перед теплым фронтом на территории Урала (барическая тенденция достигала $-4,2$ гПа/3ч). Рост барических и температурных градиентов привел к приземному фронтогенезу 18 октября и, как следствие, увеличению интенсивности осадков, что, в свою очередь, привело к формированию очень сильного снегопада.

Во втором случае на приземной карте в 12 ч ВСВ 22.10.2014 г. циклон, образовавшийся на полярном фронте 20 октября в районе Хельсинки ($p_0 = 994,1$ гПа, барическая тенденция $-1,3$ гПа/3ч), располагался у западного склона Уральских гор, находясь в стадии

заполнения ($p_0 = 993,4$ гПа, барическая тенденция $0,3$ гПа/3ч). Циклон смещался со скоростью более 30 км/ч по ведущему потоку с северо-запада на юго-восток. Максимального развития циклон достиг утром 22 октября в районе Казани (минимальное давление в центре $989,9$ гПа). При этом циклонический вихрь развился до изобарической поверхности 500 гПа.

При приближении к Уральскому горному хребту в передней части циклона (над северными районами Пермского края) вследствие конвергенции потока начался рост давления (барическая тенденция в 18 ч ВСВ 22.10.2014 г. достигла $2,9$ гПа/3ч). Далее по мере перемещения циклона началось падение давления на подветренном склоне хребта на территории Свердловской и Челябинской областей (барическая тенденция изменялась от $-0,8$ до $-2,0$ гПа/3ч), вследствие чего на приземной карте в 0 ч ВСВ 23.10.2014 г. (рис. 2) образовалось два центра пониженного давления: один у наветренного склона (вблизи Кудымкара), другой – у подветренной стороны хребта (около Челябинска), т. е. произошла сегментация циклона.

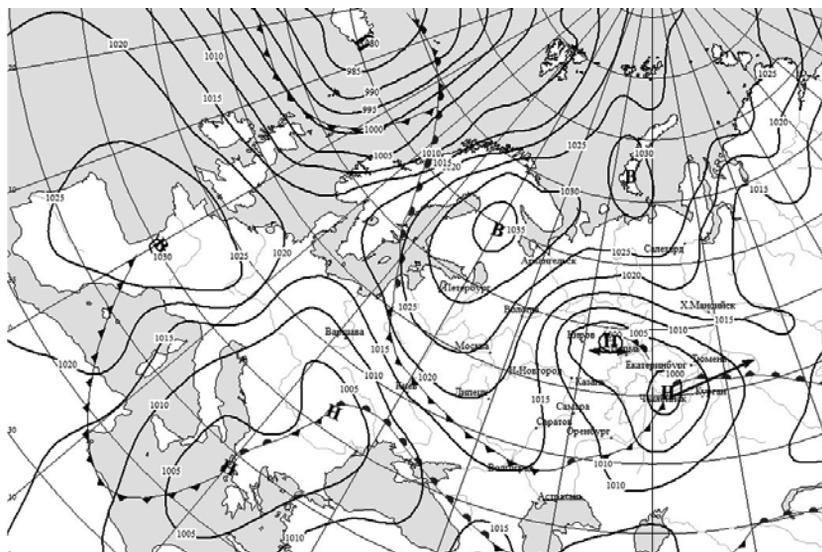


Рис. 2. Анализ приземный от 00 ч ВСВ 23.10.2014 г.

Дальнейшее развитие получил циклон, расположенный над Южным Уралом, который продолжил движение на северо-восток, а над Уральским Прикамьем центр быстро исчез. Над Средним Уралом сформировалась орографическая окклюзия, основной температурный контраст оказался перед фронтом окклюзии над северными районами Свердловской области (на приземной карте в 0 ч ВСВ 23.10.2014 г. достигал $2,1^{\circ}\text{C}/100\text{км}$). Усиление северного ветра до 13 м/с и адвекция холода вдоль восточного склона Уральских гор привели к обострению фронта, интенсивность обложных снегопадов увеличилась до 15–20 мм/12ч. Высота снежного покрова 23–24 октября на севере Свердловской области достигла 57 см.

В третьем случае облачная система теплого фронта начала оказывать влияние на территорию Урала днем 7 октября, вызвав по югу Свердловской области умеренные и сильные снегопады. Приземная линия фронта была ориентирована с юго-запада на северо-восток и располагалась от центра циклона ($p_0 = 1000,3$ гПа) в районе Волгограда через города Стерлитамак – Челябинск – Тюмень. Контраст в зоне фронта по приземной карте в 12 ч ВСВ 7.10.2015 г. составил $7^{\circ}\text{C}/100\text{км}$, по карте $OT_{1000}^{500} - 38$ гп. дам/1000км.

В последующие сутки южный циклон смещался согласно ведущему потоку со скоростью 53 км/ч, интенсивно углублялся, и днем 8 октября центр циклонического образования находился над крайним югом Пермского края ($p_0 = 985,6$ гПа). Связанный с данным циклоном теплый фронт смещался значительно медленнее (9 км/ч) и на приземной карте в 12 ч ВСВ 8.10.2015 г. (рис. 3) был ориентирован от центра циклона вблизи Чернушки через Нижний Тагил на Ханты-Мансийск. Величина барической тенденции перед приземной линией фронта достигала $-5,2$ гПа/3ч. Контраст в зоне фронта у земли сохранялся прежним, а в средней тропосфере увеличился до 40 гп. дам/1000км. За счет тропосферного фронтотенеза и орографических вертикальных движений, определяемых местоположением метеостанций, интенсивность обложных снегопадов увеличилась, что привело к формированию очень сильного снегопада в горных районах Пермского края и Свердловской области. В следующие 12 часов территория Урала по-прежнему оставалась под влиянием облачной системы малоподвижного полярного

фронта с начавшимся процессом окклюдирования и центральной части циклона, достигшего стадии максимального развития. В результате интенсивные упорядоченные восходящие движения, связанные с центром барического образования, и близость точки окклюзии сыграли основную роль в формировании очень сильного снегопада 9.10.2015 г. на севере Свердловской области.

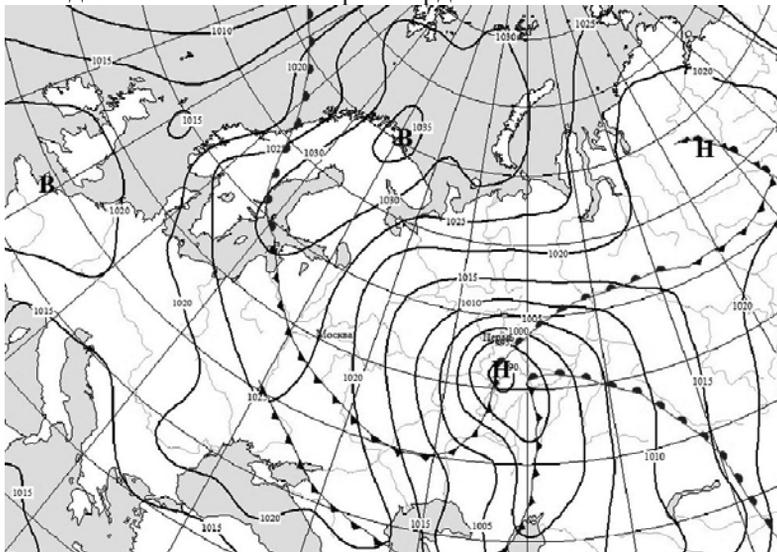


Рис. 3. Анализ приземный от 12 ч ВСВ 8.10.2015 г.

Результаты численного прогноза снегопадов разной интенсивности

В работе представлены результаты оценки численного прогноза осадков разной интенсивности по модели WRF, установленной на вычислительном кластере «ПГУ-Тесла» научно-образовательного центра «Параллельные и распределенные вычисления», двух версий: 3.2.1 и 3.6.1.

Модель WRF версии 3.2.1. Расчет выполнялся на 32 вертикальных уровнях, период моделирования составлял 48 ч, временной шаг вывода данных – 3 ч, пространственное разрешение модели – 10 км (200×200 точек).

Схемы параметризации подсеточных процессов:

- микрофизика облачности – схема Томпсона;
- длинноволновая радиация – схема RRTM;
- коротковолновая радиация – схема Дудья;
- приземный слой – схема Меллора-Ямады-Янича;
- подстилающая поверхность и почва – схема NOAH;
- пограничный слой – схема университета Енсей;
- конвекция – схема Грелла-Девени.

Модель WRF версии 3.6.1. Данная версия была установлена с целью настройки и адаптации модели к условиям Среднего Урала и дальнейшего переноса ее на вычислительный кластер с гибридной архитектурой «ПГНИУ-Кеплер» научно-образовательного центра «Параллельные и распределенные вычисления». Настройки модели отличаются от прежней версии следующим: число вертикальных уровней доведено до 42, пространственное разрешение составило 9 км (224×224 точек) и 4 км (400×400 точек), временной шаг вывода данных – 1 ч. Изменена схема параметризации приземного слоя на схему Монино-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия, которая рекомендована руководством по экспликации модели. Вместо параметризации конвекции производилось ее прямое моделирование, а сама модель переведена в негидростатический режим.

В качестве исходных данных для обеих версий модели использовался прогноз модели GFS и реанализ климатической модели CFS в коде GRIB2. Для дальнейшего анализа использовались результаты счета на срок 15, 27 и 39 ч от начала прогноза, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения выпавших осадков на метеостанциях.

Для оценки достоверности прогноза осадков по модели были использованы данные с 53 метеостанций, расположенных на территории Пермского края, Республики Удмуртия, Свердловской и Кировской областей. Сравнение модельных и фактических значений сумм осадков проводилось на полусуточном интервале. Модельные значения осадков для каждой метеостанции были получены путем интерполяции между узлами модельной сетки.

Сопоставление оправдываемости снегопадов на основе модели WRF разных версий по Наставлению [8] (табл. 1) позволяет

отметить небольшое повышение качества прогностических данных. Существенно лучше модель WRF версии 3.6.1 стала рассчитывать сумму осадков с заблаговременностью 15 ч. Так, средняя оправдываемость с 77 % увеличилась до 80%. При времени интегрирования на 15 и 27 ч средняя оправдываемость снегопадов увеличилась незначительно.

Также модель адекватно воспроизводит области, где наблюдались осадки наибольшей интенсивности (рис. 4). Однако максимальное количество осадков по модели WRF новой версии оказывается существенно больше (32,3 мм/12ч), чем по старой версии модели (25,3 мм/12ч), что можно объяснить более детальным описанием орографии района эксперимента.

Оценка успешности прогноза сильных и очень сильных снегопадов была выполнена на основе следующих характеристик: критерия Пирси-Обухова, общей оправдываемости прогноза, числа ложных тревог и пропусков явления, абсолютной и относительной ошибках (табл. 1). Эти данные показывают, что новая версия мезомасштабной модели лучше прогнозирует рассматриваемое неблагоприятное и опасное природное явление. Величина критерия Пирси-Обухова в большинстве случаев равна или больше 0,75, что свидетельствует о практической значимости прогностических данных, полученных на основе модели WRF версии 3.6.1. Процент успешных прогнозов значительно увеличился и составляет более 94.

Переход к новой версии модели позволил более точно рассчитывать сумму осадков при выпадении сильных и очень сильных снегопадов на Среднем Урале, что проявилось в уменьшении ошибок (абсолютной и относительной) и числе пропусков явления. Однако необходимо отметить, что существенно возросло число ложных тревог, т. е. модель завышает суммы осадков, прогнозируя сильный снегопад, в то время как фактически наблюдается небольшой или умеренный снег.

В рамках новой версии модели есть возможность производить

расчет сумм осадков с разным шагом по пространству. В качестве эксперимента случай продолжительного сильного и очень сильного снегопада, зафиксированного 8–9 октября 2015 г., был спрогнозирован с помощью модели WRF с разным пространственным шагом (рис. 5).

Таблица 1

Успешность прогноза снегопадов на основе модели WRF разных версий (3.2.1/3.6.1)

Дата составления прогноза от 0 ч ВСВ	Заблаговременность, ч	Показатели успешности численного прогноза						Оправданность по Наставлению [8], %
		Пирси-Обухов	Процент успешных прогнозов	Число ложных тревог	Число пропусков явления	Абсолютная ошибка, мм	Относительная ошибка, %	
17.10.2014	27	0,75/0,86	85/89	2/7	5/3	2,2 /1,3	32/19	95/87
	39	0,68/0,96	76/98	2/5	6/4	2,1/1,6	28/22	93/81
18.10.2014	15	0,58/–	80/–	2/–	4/–	2,4/–	35/–	78/–
	27	0,38/–	83/–	5/–	3/–	3,3/–	29/–	79/–
	39	0,07/–	70/–	1/–	13/–	4,1/–	25/–	75/–
22.10.2014	15	0,58/0,29	80/96	5/10	4/3	2,1/0,6	42/11	75/80
	27	0,93/0,0	78/98	1/3	9/7	1,8/0,6	40/13	75/81
	39	0,67/1,0	89/92	2/1	3/3	1,8/0,7	48/17	79/88
Среднее	15	0,58/0,29	80/96	4/10	4/3	2,3/0,6	39/11	77/80
	27	0,69/0,43	82/94	3/7	6/5	2,4/1,0	34/11	83/84
	39	0,47/0,98	78/95	2/3	7/4	2,7/1,2	34/20	82/85

Различий в локализации осадков максимальной интенсивности не оказалось. Очень сильный снегопад с наибольшей интенсивностью прогнозировался и отмечался на метеостанции Кушва: по факту выпало 24 мм осажденной воды за 12 ч, прогностические значения осадков на основе модели WRF составили 24,3 и 26,5 мм/12 ч с шагом по пространству 9 и 4 км соответственно.

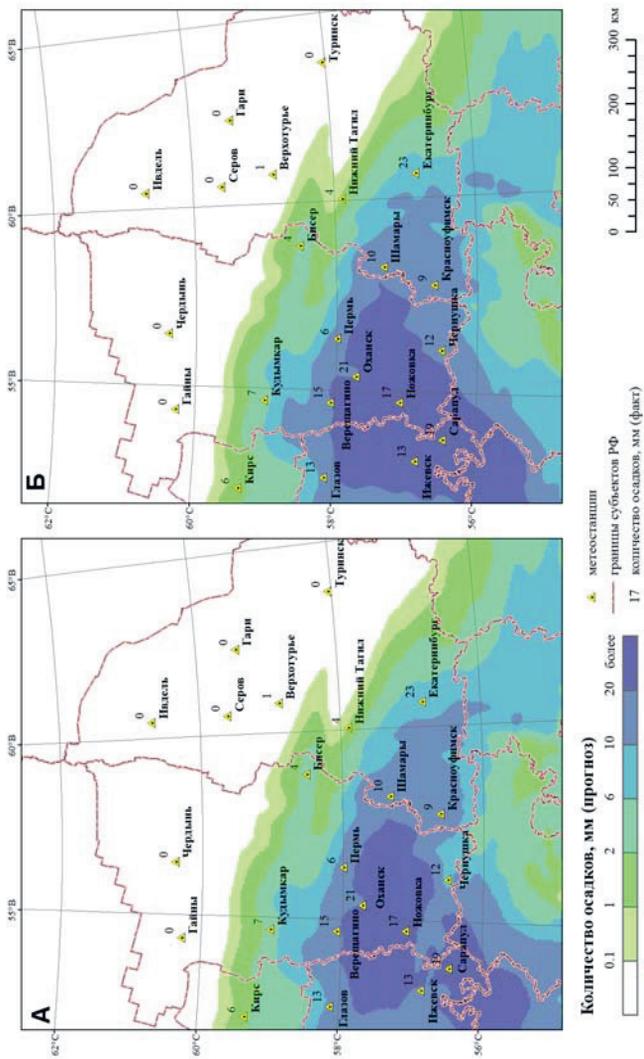


Рис. 4. Фактические и прогностические суммы осадков 18.10.2014 г.

Цифры у метеостанций – суммы фактически выпавших осадков за полусутки, мм.

Цветные поля – суммы прогностических осадков по модели WRF: версия 3.2.1 (а), версия 3.6.1. (б).

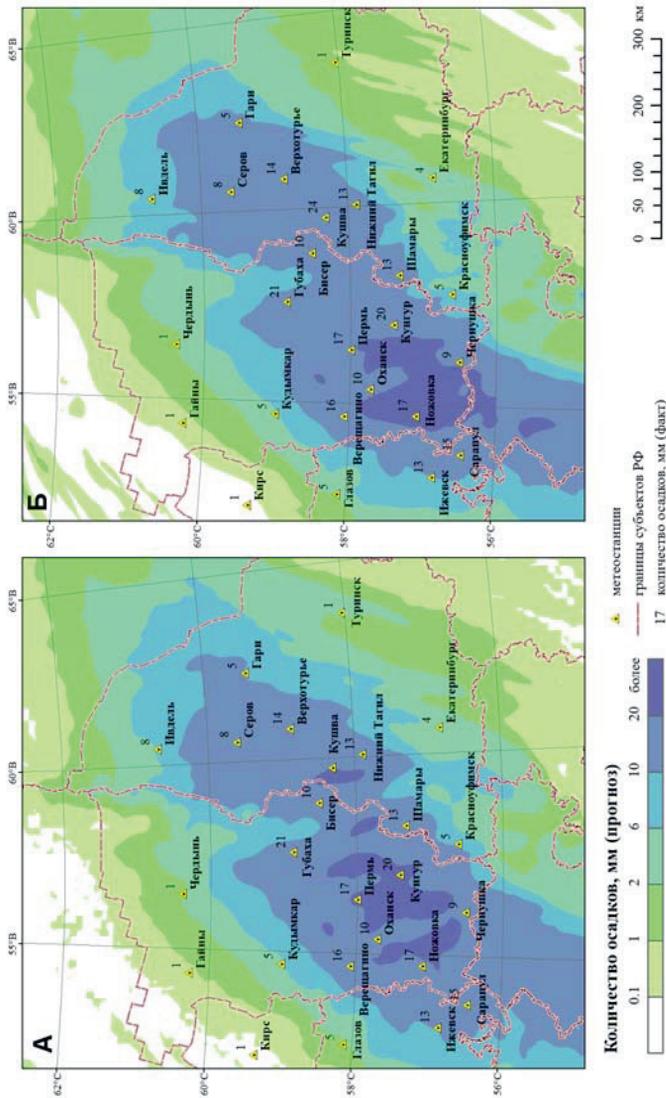


Рис. 5. Фактические и прогнозные суммы осадков 8.10.2015 г.

Цифры у метеостанций – суммы фактически выпавших осадков за полусутки, мм. Цветные поля – суммы прогнозируемых осадков по модели WRF версия 3.6.1 с шагом по пространству: 9 км (а), 4 км (б).

Средняя оправдываемость прогноза сильных и очень сильных снегопадов с помощью модели WRF новой версии составляет от 83 до 89 % в зависимости от заблаговременности (табл. 2).

Таблица 2

Успешность прогноза снегопадов на основе модели WRF версии 3.6.1 с разным шагом по пространству (9 км/4 км)

Дата составления прогноза от 0 ч ВСВ	Заблаговременность, ч	Показатели успешности численного прогноза					Оправдываемость по наставлению [8], %
		Процент успешных прогнозов	Число ложных тревог	Число пропусков явления	Абсолютная ошибка, мм	Относительная ошибка, %	
07.10.2015	15	98/96	4/4	1/0	0,3/0,2	9/10	93/90
	27	89/89	1/0	3/3	0,3/0,2	19/3	80/86
	39	100/100	4/5	1/3	1,1/0,7	12/33	90/88
08.10.2015	15	100/100	12/11	1/2	2,0/1,5	23/33	79/84
	27	100/100	5/7	4/5	0,2/0,7	3/52	86/81
	39	98/-	1/-	1/-	0,3/-	18/-	88/-
Средняя	15	99/98	8/8	1/1	1,1/0,9	16/22	86/87
	27	95/95	3/4	4/4	0,3/0,5	11/28	83/84
	39	99/100	3/5	1/3	0,7/0,7	15/33	89/88

Повышения качества прогноза при переходе на меньший шаг по пространству не наблюдалось: все показатели успешности численного прогноза осадков оказались соизмеримы, а относительная ошибка даже увеличилась. Таким образом, можно сделать первые выводы, что прогноз сильных и очень сильных снегопадов, обусловленных теплым фронтом в сочетании с центральной частью циклона, с помощью новой версии мезомасштабной модели WRF рекомендуется проводить с шагом по пространству 9 км.

Заключение

С 17 по 23 октября 2014 г. через территорию Урала прошли два циклонических вихря западного и северо-западного типа,

которые принесли холодную погоду с сильными снегопадами. С 7 по 9 октября 2015 г. Уральский регион находился под влиянием южного активно углубляющегося циклона, который обусловил сильные снегопады с метелями. За обозначенные периоды на отдельных станциях выпало до 60 мм осадков в виде снега в водном эквиваленте.

Оценка процесса формирования обложных осадков с помощью модели WRF разных версий показала, что при разных настройках модель адекватно воспроизводит возникновение крупномасштабных зон осадков с некоторым их количественным завышением. Отмечено улучшение оправдываемости прогноза снегопадов от перехода к новой версии мезомасштабной модели до 3 %. Таким образом, переход на новую версию модели WRF имеют большую практическую значимость, так как позволяет выпускать более точный прогноз интенсивных осадков в холодное время года.

Численные эксперименты прогноза сумм осадков при разных синоптических ситуациях и с разным пространственным разрешением необходимо продолжить для установления оптимальных настроек модели WRF применительно к территории Урала.

Авторы благодарят директора Научно-образовательного центра «Параллельные и распределенные вычисления» Пермского государственного национального исследовательского университета А.Г. Деменева за предоставленные вычислительные мощности для реализации счета модели WRF.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-35-00410 мол_a).

Список используемых источников

1. *Бычкова В.И., Рубинштейн К.Г.* Предварительные результаты испытания алгоритма краткосрочного прогноза метелей // *Метеорология и гидрология.* – 2013. – № 6. – С. 30–42.
2. *Гончуков Л.В., Ламаш Б.Е.* Численный прогноз опасных явлений погоды по северу Приморского края // *Вестник Дальневосточного отделения РАН.* – 2010. – № 6. – С. 17–23.

3. Калинин Н.А., Попова Е.В. Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15–16 марта 2013 года // Учен. зап. РГГМУ. – СПб: Изд. РГГМУ, 2013. – № 32. – С. 7–17.

4. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Связов Е.М., Попова Е.В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 9. – С. 21–30.

5. Макитас А.П., Рубинштейн К.Г., Бычкова В.И., Игнатов Р.Ю., Шутилин С.В. Предварительная оценка качества воспроизведения метеорологических параметров в Арктическом районе полярной версией модели WRF // Труды Гидрометцентра России. – 2010. – Вып. 344. – С. 144–156.

6. Мартынова Ю.В., Заринов Р.Б., Крупчатников В.Н., Петров А.П. Оценка качества прогноза динамики атмосферы в Сибирском регионе мезомасштабной моделью WRF-ARW // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 7. – С. 14–24.

7. Метеорологический ежемесячник. Ч. 2. Вып. 9. № 10. – Екатеринбург, 2014.

8. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724-2009. – Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. – 50 с.

9. Пищальникова Е.В. Динамика опасных снегопадов в Пермском крае за период 1969–2013 гг. // Вестник Удмуртского ун-та. Серия 6. Биология. Науки о земле. – 2014. – Вып. 3. – С. 119–124.

10. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. Мезомасштабная модель COSMO-RU07 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник № 39 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2012. — С. 15–48.

11. Торопов П.А., Шестакова А.А. Оценка качества моделирования новороссийской боры с помощью модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 7. – С. 38–51.

12. Ширяев М.В., Рубинштейн К.Г. Прогноз категорий опасности метеорологических явлений // Труды Гидрометцентра России. – 2012. – Вып. 347. – С. 144–158.

13. Gascón E., Sanchez J.L., Charalambous D., Fernández-González S., Lopez L., Garcia-Ortega E., Merino A. Numerical diagnosis of a heavy snowfall event in the center of the Iberian Peninsula // Atmos. Res. – 2015. – Vol. 153. – P. 250–263.

14. Mailhot J., Milbrandt J.A., Giguère A., McTaggart-Cowan R., Erfani A., Denis B., Glazer A., Vallée M. An Experimental High-Resolution Forecast

System During the Vancouver 2010 Winter Olympic and Paralympic Games // Pure and Applied Geophys. – 2014. – Vol. 171, Is. 1–2. – P. 209–229.

15. *Milrad S.M., Gyakum J.R., Lombardo K., Atallah E.H.* On the dynamics, thermodynamics, and forecast model evaluation of two snow-burst events in Southern Alberta // Wea. Forecasting. – 2014. – Vol. 29. – No. 3. – P. 725–749.

16. *Wang H., Yu E., Yang S.* An exceptionally heavy snowfall in North-east china: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model // Meteorol. and Atmos. Phys. – 2011. – Vol. 113, Is. 1. – P. 11–25.

Поступила в редакцию 23.01.2016 г.