

Оценка качества прогноза очень сильного снегопада на Урале с помощью модели WRF

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

Представлены результаты прогноза с использованием модели WRF двух случаев сильного снегопада, отмечавшихся 18 и 23 октября 2014 г. на территории Урала. Рассматривается реализация модели атмосферы WRF-ARW при расчете прогнозов погоды для условий интенсивных обложных осадков в виде снега. Полученные оценки прогноза осадков сравниваются с оценками глобальной модели GFS NCEP. Результаты свидетельствуют о том, что применительно к рассматриваемому процессу обе модели обладают приблизительно одинаковой точностью прогноза количества выпавших осадков.

Ключевые слова: сильный снегопад, краткосрочный прогноз, модель WRF.

1. Введение

На территории России и других северных стран очень сильный снегопад является часто встречающимся опасным явлением погоды. Значительная продолжительность холодного периода, активная циклоническая деятельность на Урале, близость этого региона к арктическим морям и Атлантике создают условия для частых снегопадов. Математические модели атмосферы разного масштаба широко используются для прогноза осадков, в том числе в зимний период [4, 5, 10, 14]. К числу наиболее распространенных инструментов моделирования мезомасштабных атмосферных процессов относится модель WRF. Изучению случаев возникновения опасных явлений погоды в зимний период с помощью модели WRF посвящены работы [11—13, 15, 16]. Для территории России возможности модели WRF исследованы на примере отдельных случаев возникновения осадков в твердом виде [1, 2, 6]. В настоящей статье представлены результаты прогноза двух случаев сильного снегопада, отмечавшихся 18 и 23 октября 2014 г. на территории Урала, с использованием модели WRF.

2. Синоптические условия и погода при сильном снегопаде на Урале

Средняя многолетняя повторяемость случаев опасных снегопадов в октябре на Среднем Урале составляет 17% [9]. По данным наблюдений

* Пермский государственный национальный исследовательский университет; e-mail: kalinin@psu.ru.

стационарной сети метеорологических станций, в октябре 2014 г. на Среднем Урале отмечались снегопады, достигшие критерия опасного природного явления [8]. За полусуточные интервалы выпадало от 20 до 32 мм осажденной воды [7], что составило 40—90% месячной нормы осадков. Установление снежного покрова произошло на 2 недели раньше средних многолетних сроков, а его высота на Среднем Урале достигала 35 см, на Северном Урале — 57 см. Раннее формирование снежного покрова привело к блокированию части сельскохозяйственной техники на полях. Движение транспорта в Перми и Екатеринбурге из-за снегопада было парализовано в течение суток.

Первый случай очень сильного снегопада (18 октября) произошел под влиянием теплого фронта полярной системы, второй (23 октября) — под влиянием фронта окклюзии. Рассмотрим подробнее развитие синоптических процессов.

В первом случае облачная система теплого участка полярного фронта начала оказывать влияние на территорию Урала уже 16 октября, вызвав на юге Пермского края умеренные и сильные снегопады. Приземная линия фронта была ориентирована вдоль 55° с. ш. и от центра циклона в районе Рязани проходила через города Нижний Новгород — Казань — Уфа. Контраст температуры в зоне фронта в соответствии с приземной картой на 0 ч ВСВ 16 октября 2014 г. составил 2°C/100 км, по карте ОТ⁵⁰⁰₁₀₀₀ — 36 гп. дам/1000 км.

Воздушная масса над Пермским краем, сформировавшаяся 16 октября под влиянием южной периферии низкого холодного антициклона, имела максимальную температуру от –5 до 1°C. Воздушная масса теплого сектора западного молодого циклона, прогревшись до 12—17°C, 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°C. В течение следующих суток контраст температуры высотной фронтальной зоны сохранился прежним, в то время как в приземном слое атмосферы контраст в зоне малоподвижного фронта увеличился до 4°C/100 км из-за адвекции холода и радиационного выхолаживания перед фронтом (над Уралом). В связи с этим 17 октября продолжились умеренные и сильные снегопады, зона осадков расширилась и охватила юг Свердловской и север Челябинской области.

Теплый фронт на приземной карте за 0 ч ВСВ 18 октября был ориентирован от центра циклона, находящегося в стадии максимального развития в районе Казани, вдоль южной границы Пермского края через Челябинскую область на Казахстан. 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/3 ч). Увеличение барических (5 гПа/100 км) и температурных (5°C/100 км) градиентов привело 18 октября к приземному фронтогенезу и, как следствие, к увеличению интенсивности осадков, что, в свою очередь, вызвало очень сильный снегопад.

Во втором случае на приземной карте за 12 ч ВСВ 22 октября 2014 г. циклон, образовавшийся на полярном фронте 20 октября в районе Хельсинки ($p_0 = 994,1$ гПа, барическая тенденция –1,3 гПа/3 ч), располагался у

западного склона Уральских гор, находясь в стадии заполнения ($p_0 = 993,4$ гПа, барическая тенденция $0,3$ гПа/3 ч). Циклон смещался со скоростью более 30 км/ч по ведущему потоку с северо-запада на юго-восток. Максимальное развитие циклона наблюдалось утром 22 октября в районе Казани (минимальное давление в центре $989,9$ гПа). При этом циклонический вихрь прослеживался до изобарической поверхности 500 гПа.

По мере приближения циклона к Уральскому горному хребту в передней его части (над северными районами Пермского края) вследствие конвергенции потока отмечалось увеличение давления (барическая тенденция в 18 ч ВСВ 22 октября достигла $2,9$ гПа/3 ч). Далее в процессе 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/3 ч), вследствие чего на приземной карте за 0 ч ВСВ 23 октября образовалось два центра пониженного давления — один у наветренного (вблизи Кудымкара), другой у подветренного склона хребта (около Челябинска), т. е. произошла сегментация циклона. Дальнейшее развитие получил циклон, расположенный над Южным Уралом, который продолжил движение на северо-восток, при этом над Уральским Прикамьем центр пониженного давления быстро исчез. Над Средним Уралом сформировалась орографическая окклюзия (на изобарической поверхности 850 гПа температура воздуха в гребне тепла изменялась от -6 до -8°C), основной контраст температуры оказался перед фронтом окклюзии над северными районами Свердловской области (на приземной карте за 0 ч ВСВ 23 октября он достигал $2,1^\circ\text{C}/100$ 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 $15\text{—}20$ мм за 12 ч. Высота снежного покрова 23—24 октября на севере Свердловской области достигла 57 см.

По данным Гидрометцентра России, над первым естественным синоптическим районом с 16 по 20 октября 2014 г. развивался естественный синоптический период (е. с. п.), состоящий из двух элементарных синоптических процессов (э. с. п.) — 16—18 и 19—20 октября, а естественный синоптический период с 21 по 24 октября состоял из двух э. с. п. — 21—22 и 23—24 октября. При этом по классификации синоптических процессов, предложенной А. Л. Кацем, в обоих е. с. п. развивался меридиональный макропроцесс формы 3, который характеризуется преимущественно отрицательными аномалиями среднесуточной температуры воздуха на Среднем Урале [3].

3. Результаты численного прогноза сильного снегопада

Прогнозы по модели WRF V3.2.1 составлялись с использованием динамического ядра ARW на срок 48 ч от 0 ч ВСВ текущих суток. Модель запускала с шагом 10 км по пространству и 60 с по времени с выдачей данных через каждые 3 ч. Для дальнейшего анализа использовали результаты расчета на срок 15 , 27 и 39 ч от начала прогноза, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения на метеорологических станциях количества выпавших осадков.

При моделировании использовались следующие параметризации физических процессов:

- микрофизика облачности — схема Томпсона;
- потоки длинноволновой радиации — схема RRTM (Rapid Radiative Transfer Model);
- потоки коротковолновой радиации — схема Дудья;
- приземный слой — схема Мони́на — Обухова с вязким подслоем Карлсона — Боланда и стандартными функциями подобия;
- подстилающая поверхность и почва — схема NOAH;
- пограничный слой — схема Университета Енсей.

Для оценки достоверности прогноза осадков по модели были использованы данные 46 метеорологических станций, расположенных на территории Пермского края, Республики Удмуртия, Свердловской и Кировской областей. Сравнение модельных и фактических значений количества осадков проводилось на полусуточном интервале. Модельные значения осадков для каждой станции были получены путем интерполяции между узлами модельной сетки.

Сильные снегопады, наблюдавшиеся с 16 по 24 октября 2014 г. на Урале, были обусловлены процессами синоптического масштаба, поэтому для определения эффективности работы мезомасштабной модели WRF-ARW, кроме традиционных подходов, основанных на расчете оправдываемости прогноза твердых осадков по Наставлению [8] и определении абсолютной ошибки прогноза, в качестве дополнительного критерия использовалась глобальная модель GFS NCEP (США), прогностические поля которой были представлены данными в узлах регулярной сетки $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что незначительное улучшение качества прогнозов при переходе от модели GFS к мезомасштабной модели отмечается только по абсолютным ошибкам. Оценка успешности прогнозов по Наставлению [8] в модели GFS оказалась даже несколько выше. Отсутствие оценок успешности прогнозов ко-

Таблица 1

**Оценка успешности прогнозов количества осадков
по расчетам двух моделей**

Дата начала счета модели в октябре 2014 г.	Успешность по Наставлению [8], %			Абсолютная ошибка, мм		
	с 3 до 15 ч ВСВ текущих суток	с 15 ч текущих суток до 3 ч ВСВ следующих суток	с 3 до 15 ч ВСВ следующих суток	с 3 до 15 ч ВСВ текущих суток	с 15 ч текущих суток до 3 ч ВСВ следующих суток	с 3 до 15 ч ВСВ следующих суток
15	—	—	91/93	—	—	0,6/0,6
16	92/93	98/96	93/92	0,5/0,8	0,2/0,2	0,1/0,3
17	91/90	78/79	74/80	0,2/0,4	3,3/4,2	4,1/3,5
18	77/83	66/68	74/76	2,8/2,3	1,9/2,4	2,8/2,5
19	79/79	—	—	2,1/2,1	—	—
21	—	—	79/75	—	—	1,8/2,8
22	77/80	77/80	69/75	2,1/2,1	2,1/1,9	1,8/1,8
23	74/82	85/79	81/74	2,1/1,6	1,0/1,2	0,7/1,0
24	80/78	—	—	0,7/0,9	—	—
Среднее значение	81/84	81/80	80/81	1,5/1,4	1,7/2,0	1,7/1,8

Примечание. Числитель — модель WRF, знаменатель — модель GFS.

Таблица 2

**Оценка прогноза сильного снегопада (6—19 мм/12 ч)
по расчетам двух моделей**

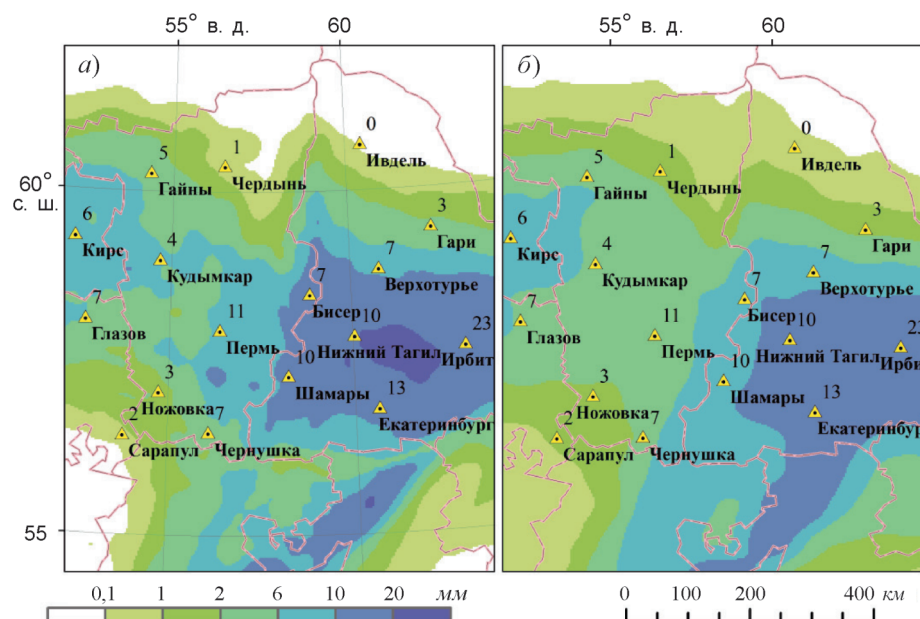
Срок прогноза		Время интегрирования модели, ч	Критерий Пирса — Обухова	Успешность прогноза, %	Число пропусков явления	Число ложных тревог
дата, октябрь 2014 г.	ч ВСВ					
16	15	15	0,95/0,95	96/96	0/0	2/2
16	15	39	0,95/0,78	96/96	0/1	2/1
17	3	27	—	98/98	1/1	0/0
18	3	27	0,73/0,79	85/87	5/2	2/4
18	15	15	0,58/0,73	80/85	4/6	5/1
18	15	39	0,68/0,76	76/83	6/5	5/3
19	3	27	0,38/0,18	83/78	3/4	5/6
19	15	15	0,27/0,08	74/70	7/12	5/2
19	15	39	0,07/–0,03	70/67	13/14	1/0
22	15	15	0,58/0,58	80/78	4/3	5/7
22	15	39	0,49/0,45	78/70	6/3	4/11
23	3	27	0,49/0,50	78/78	9/8	1/2
23	15	15	0,79/0,88	93/96	2/1	1/1
23	15	39	0,67/0,73	89/93	3/3	2/0
24	3	27	0,93/0,64	93/96	0/1	3/1
24	15	15	0,00/0,00	96/96	2/2	0/0
24	15	39	0,00/0,00	96/96	2/2	0/0

Примечание. Числитель — модель WRF, знаменатель — модель GFS.

личества осадков в отдельные 12-часовые временные интервалы связано с тем, что в эти периоды явление не прогнозировалось и не наблюдалось.

Расчет оправдываемости прогноза сильных снегопадов (количество осадков за 12 ч — от 6 до 19 мм [8]) был выполнен на основе следующих характеристик: критерия Пирса — Обухова, общей оправдываемости прогноза, оправдываемости прогноза наличия или отсутствия явления, числа ложных тревог и пропусков явления (табл. 2). Эти данные показывают, что как глобальная, так и мезомасштабная модель в большинстве случаев адекватно воспроизводят крупномасштабное поле осадков. Модели также адекватно воспроизводят области, где наблюдались осадки наибольшей интенсивности (рисунок). Однако максимальное количество осадков по данным модели WRF оказывается существенно больше, чем по данным глобальной модели, что можно объяснить более детальным описанием топографии района эксперимента в мезомасштабной модели.

Прогноз сильных снегопадов по модели WRF, оцененный с помощью критерия Пирса — Обухова, имеет большую достоверность, чем по глобальной модели: его среднее значение по расчетам модели WRF составляет 0,50, по глобальной модели — 0,47. Критерий Пирса — Обухова за 17 октября не рассчитывался из-за того, что явление прогнозировалось по обеим моделям, но не наблюдалось. Достоверность прогноза осадков по Наставлению [8] и расчетам двух моделей в большинстве случаев различается не более чем на 5% (табл. 2). При этом как у глобальной, так и у мезомасштабной модели число ошибок пропусков явления оказывается несколько больше, чем ложных тревог (61/39% для модели WRF и 62/38%



Фактические и прогностические суммы осадков за 18 октября 2014 г.

Цифры у названия метеостанций — сумма фактически выпавших осадков, мм. Цветные поля — сумма прогностических осадков. а — расчет по модели WRF, б — расчет по модели GFS.

для модели GFS). При этом обнаруживается явная зависимость достоверности прогноза по моделям WRF и GFS от особенностей синоптического положения. Так, наименьшая общая оправдываемость прогноза была отмечена 19 октября, когда сильные снегопады наблюдались в тыловой части циклона и имели ливневый характер. Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что достоверность прогнозов очень сильного снега, который был зафиксирован на шести станциях, по модели WRF выше, чем по модели GFS.

4. Заключение

С 16 по 24 октября 2014 г. через территорию Урала прошли два циклонических вихря, которые принесли холодную погоду с сильными снегопадами. За этот период на отдельных станциях было зафиксировано до 60 мм осадков в виде снега в водном эквиваленте. Оценка процесса формирования обложных осадков с помощью моделей WRF-ARW и GFS показала, что обе модели адекватно воспроизводят возникновение крупномасштабных систем зон осадков. Существенного улучшения качества прогноза от перехода к мезомасштабной модели, кроме случаев выпадения очень сильного снега (20 мм/12 ч), не выявлено. Обе модели хуже прогнозируют осадки в тыловой части циклона. Для подобного случая в 15 ч ВСВ 19 октября 2014 г. при времени интегрировании 39 ч критерий Пирса — Обухова для расчетов по моделям WRF и GFS составил 0,07 и -0,03 соответственно.

Таблица 3

Оценка прогноза очень сильного снегопада (20 мм/12 ч)

Метеорологическая станция	Время интегрирования модели, ч	Срок наблюдений		Количество осадков, мм	
		дата, октябрь 2014 г.	ч ВСВ	фактическое	расчет по модели WRF/GFS
Оханск	27	18	3	21	21,2/18,0
Кунгур	27	18	3	21	24,5/22,5
Большая Соснова	27	18	3	20	30,1/19,1
Невьянск	15	18	15	28	19,3/15,6
Невьянск	39	18	15	28	22,4/20,5
Ирбит	15	18	15	23	16,3/13,5
Ирбит	39	18	15	23	15,5/14,1
Гари	15	23	15	20	17,6/14,8
Гари	39	23	15	20	17,1/16,1

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 в рамках государственного задания на научные исследования (проект № 271), а также при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-96000-р-Урал-а).

Литература

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. Связь аномалий среднесуточной температуры воздуха в г. Перми с формами атмосферной циркуляции Каца. — Ученые записки Казанского гос. ун-та. Серия Естественные науки, 2012, т. 154, кн. 1, с. 224—231.
4. Калинин Н. А., Ветров А. Л., Свизов Е. М., Попова Е. В. Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF. — Метеорология и гидрология, 2013, № 9, с. 21—30.
5. Макштас А. П., Рубинштейн К. Г., Бычкова В. И. и др. 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., Зарипов 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. — Екатеринбург, 2014, ч. 2, вып. 9, № 10.
8. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. /Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Руководящий документ 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, 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 “Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов”. — М., Обнинск, ИГ-СОЦИН, 2012, № 39, 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., et al.** Numerical diagnosis of a heavy snowfall event in the center of the Iberian Peninsula. — Atmos. Res., 2015, vol. 153, pp. 250—263.
- 14. Mailhot J., Milbrandt J. A., Giguère A., et al.** An experimental high-resolution forecast system during the Vancouver 2010 Winter Olympic and Paralympic Games. — Pure and Appl. Geophys., 2014, vol. 171, No. 1—2, pp. 209—229.
- 15. Milrad S. M., Gyakum J. R., Lombardo K., and 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, pp. 725—749.
- 16. Wang H., Yu E., and Yang S.** An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model. — Meteorol. Atmos. Phys., 2011, vol. 113, No. 1, pp. 11—25.

Поступила
14 V 2015

ESTIMATING THE ACCURACY OF VERY HEAVY SNOWFALL FORECAST IN THE URALS BY THE WRF MODEL

N. A. Kalinin, A. L. Vetrov, E. V. Pishchal'nikova,
E. M. Sviyazov, and A. N. Shikhov

The results of the forecast of two heavy snowfalls registered on October 18 and 23, 2014 in the Urals region using the WRF model are presented. The application of WRF-ARW atmospheric model to the computation of weather forecasts for the conditions of heavy widespread precipitation in the form of snow is considered. The obtained estimates of precipitation forecast are compared with the estimates of GFS NCEP global model. The results demonstrate that both models have approximately the same accuracy of precipitation forecast in the context of the process under consideration.