

УДК 551.509.5

Численный прогноз сильных осадков в холодный период года на территории Пермского края

Е.В. Пищальникова, Н.А. Калинин, А.Н. Шихов, А.В. Быков

*Пермский государственный национальный исследовательский
университет, г. Пермь, Россия
meteo@psu.ru*

Показана успешность численного прогноза сильных осадков в холодное полугодие по мезомасштабной модели WRF при разных синоптических ситуациях для территории Пермского края. Учет синоптической ситуации позволяет устранить часть неопределенностей выходной продукции, вызванных несовершенством параметризации. В результате получено, что модель WRF успешно рассчитывает количество сильных осадков обложного характера с некоторым завышением сумм при их формировании в центральной части циклона. Модельные суммы осадков на востоке региона всегда выше фактических на 25–50 % при прогнозе сильных снегопадов, сформированных в центральных частях южных и юго-западных циклонов. Модель WRF недооценивает вклад вертикальных движений в районе со сложной орографией при прогнозе сильных снегопадов, сформировавшихся под влиянием холодного фронта и холодного фронта с волнами и в тылу циклона с вторичными холодными фронтами.

Ключевые слова: снегопад, опасное природное явление, модель WRF, численный прогноз, синоптическая ситуация, Пермский край

The success of a numerical forecast of heavy precipitation in the cold half-year for Perm region

E.V. Pischalnikova, N.A. Kalinin, A.N. Shikhov, A.V. Bykov

*Perm State University, Perm, Russia
meteo@psu.ru*

The skill-score of the mesoscale model WRF in the numerical forecast of heavy precipitation of the cold half-year is shown for the Perm region. Consideration of the synoptic situation helps to eliminate some of the uncertainties in output products caused by imperfections in parameterization. As a result, it is concluded that the WRF model successfully calculates the amount of continuous heavy precipitation with some overestimation in the central part of a cyclone. Model precipitation amount in the east of the region is always 25–50% higher than actual one for forecast of heavy snowfalls forming in the central parts of the southern and southwest cyclones. The WRF model underestimates the contribution of orographic vertical movements in the predicted heavy snowfalls caused by cold front and by cold front with waves and in the rear of a cyclone with secondary cold fronts.

Keywords: snowfall, hazardous weather, model WRF, numerical forecast, synoptic situation, Perm region

Численный прогноз осадков является неотъемлемой частью прогностической практики синоптиков на местах. Правильная интерпретация полученного модельного результата зачастую определяет качество оперативного краткосрочного прогноза не только общего назначения, но и опасных природных явлений. Известно, что численные прогнозы осадков сроком до трех суток связаны с крупными синоптическими системами, являются достаточно надежными, особенно в холодный период года (<http://method.meteorf.ru>).

Качество выходной продукции мезомасштабных моделей зависит от параметризации физических процессов и пространственного разрешения [1, 2, 6]. Учет синоптической ситуации, в свою очередь, позволяет устранить часть неопределенностей выходной продукции, вызванных несовершенством параметризации. Для территории Пермского края проведена классификация синоптических процессов, формирующих сильные снегопады, и установлено, что их выпадение происходит при 11 типах синоптических ситуаций [3, 7, 8].

В настоящей работе представлены результаты оправдываемости краткосрочного прогноза осадков при выпадении сильных снегопадов на территории Пермского края при разных синоптических ситуациях за холодные периоды 2012–2015 гг. с использованием модели WRF 3.2.1. В связи с тем, что измерение осадков на метеостанциях производится два раза в сутки (в 3 и 15 ч ВСВ), а выходная продукция модели доступна каждые 3 ч, для сопоставления использовались результаты счета за 15, 27 и 39 ч от срока 0 ч ВСВ. Оценка качества прогнозов осадков выполнена по совокупности параметров, рекомендованных Методическими указаниями [4] и Наставлением [5], и рядом других характеристик.

Результаты оправдываемости численного прогноза осадков в период выпадения обильных снегопадов при разных синоптических ситуациях

Показатели успешности и ошибки прогноза представлены в таблице. Оправдываемость прогноза осадков, рассчитанная согласно [5] (*OPR*) изменяется от 64 до 96 % и зависит от заблаговременности и типа синоптической ситуации. Самая низкая оправдываемость прогноза осадков при любой заблаговременности наблюдается в центральной части циклона, где модель в основном завышает площадь распространения снегопадов сильной интенсивности. Наиболее сложными случаями для прогнозирования обильных снегопадов являются центры заполняющихся циклонов в процессе их сегментации (рис. 1), когда модельная зона обильных осадков по площади значительно меньше фактической, но по количеству превосходит их на 30–45%. Для центральной части южных циклонов характерно наличие максимума осадков не у вершины фронта, а перед теплым участком, для западных циклонов — перед холодным.

Синоптическая ситуация	N	Показатели успешности прогноза					Ошибки прогноза		
		OPR	T	U	N _{лт}	N _{ля}	δQ	σ _Q	OTN
Теплый фронт в сочетании с центром циклона	50	89,0	н/о	100	3	2	0,5	3,71	9,4
Теплый фронт в сочетании с северной частью циклона	100	79,5	н/о	100	9	18	0,3	2,73	5,9
Тыл циклона с вторичными холодными фронтами	25	90,0	0,00	96	0	1	0,0	1,13	1,5
Центр циклона	50	64,0	0,00	84	10	8	0,4	2,68	8,6
Центр циклона с фронтом окклюзии	25	86,0	н/о	100	1	0	0,1	1,30	3,5

Примечание: N – количество оцениваемых точек; OPR – оправдываемость прогноза осадков по Наставлению [5], %; T – критерий Пирси-Обухова; U – общая оправдываемость прогнозов (процент успешных прогнозов), %; N_{лт} – число ложных тревог; N_{ля} – число пропусков явления; δQ – Абсолютная ошибка прогнозов; σ_Q – среднеквадратичная ошибка прогнозов; OTN – относительная ошибка прогнозов.

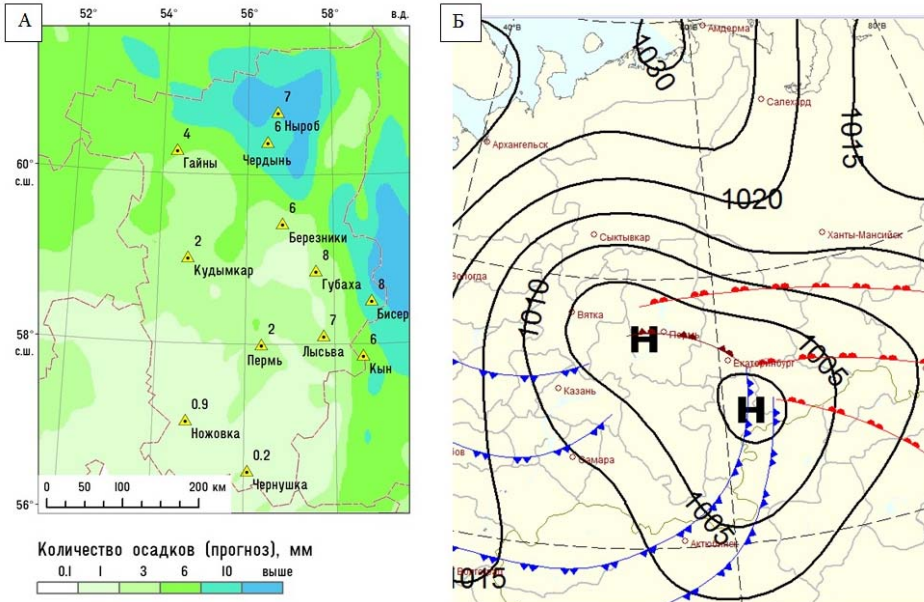


Рис. 1. Распределение осадков в центральной части циклона при его сегментации: фактические и прогностические суммы осадков, мм. Цифры у метеостанций – суммы фактически выпавших осадков за полусутки, цветное поле – суммы прогностических осадков по модели WRF с заблаговременностью 27 ч (а); фрагмент приземной карты с фронтальным анализом от 23.10.2014 г. 0 ч ВСВ (б).

Fig. 1. Distribution of precipitation in the central part of a cyclone being segmented: actual and prognostic amounts of precipitation, mm. Digits near meteorological stations designate real amounts of precipitation observed for a half-day (12 h), areas in color – prognostic amounts of precipitation derived using the WRF model with 27 h projection; a fragment of a near-ground map with front analysis for 0 h UTC 23.10.2014 (b).

В большинстве случаев модель WRF завышает количество осадков на одну градацию для метеостанций, расположенных в восточном районе Пермского края, имеющем горный рельеф. Несовпадение результатов на одну градацию оценивается как 50 %, что приводит в итоге к самому низкому качеству прогноза.

Величина критерия Пирса-Обухова (T), характеризующего успешность совпадения прогностических и фактических зон осадков, рассчитанного для территории Пермского края, изменялась от 0 до 0,88. В некоторых случаях из-за отсутствия прогностических и фактических зон, свободных от осадков, величина критерия не определялась (н/о). Уровень оценок показал, что близкие к идеальным ($T > 0,7$) прогнозы с заблаговременностью 15 и 27 ч были составлены только для условий обильных снегопадов на теплом фронте.

На качество прогноза оказывает влияние и ориентация фронтальной системы. Обильные снегопады, обусловленные широтно ориентированными теплыми фронтами, связанными, как правило, с западными и юго-западными циклонами, имеют лучшую предсказуемость. В этих случаях перед приземной линией фронта отмечается широкая зона сильных снегопадов, охватывающая большую часть территории Пермского края и успешно прогнозируемая.

При меридиональной ориентации теплого участка фронта, связанного с западными и северо-западными циклонами, смещающимися вдоль побережья северных морей, прогноз осложняется тем, что снегопады наблюдаются с обеих сторон приземной линии фронта (рис. 2). Во всех случаях прогностическая область сильных снегопадов значительно меньше фактической. При этом ширина зоны осадков сильной интенсивности определяется глубиной ложбины (давление не более 1025 гПа, барическая тенденция -3 гПа/3 ч и менее) и кривизной изобар (значение лапласиана приземного давления более 6 гПа/(500 км)²).

Общая оправдываемость прогнозов (или процент успешных прогнозов) (U) значительно выше оправдываемости, рассчитанной согласно [5], и составляет более 78 %, так как учитывает только факт наличия осадков без их количества. Самый высокий процент успешных прогнозов сильных осадков наблюдается при заблаговременности 15 ч. При этом самый низкий процент отмечен при выпадении снегопадов в центре циклона. Наиболее предсказуемые зоны сильных осадков наблюдаются при прохождении через территорию Пермского края молодых южных и юго-западных циклонов с глубиной 995 гПа и менее.

Число ложных тревог ($N_{лт}$) и пропусков явления ($N_{пр}$) в большей степени зависит от типа синоптической ситуации, чем от заблаговременности. Ложные тревоги рассматриваемого явления, главным образом, связаны с южными и юго-западными циклонами, пропуски явления – с западными. Максимальное число ложных тревог отмечается при теплом фронте. Но если учесть, что при данной синоптической ситуации чаще отмечаются

обширные снегопады, следовательно, наблюдается и самое большое количество оцениваемых точек (N).

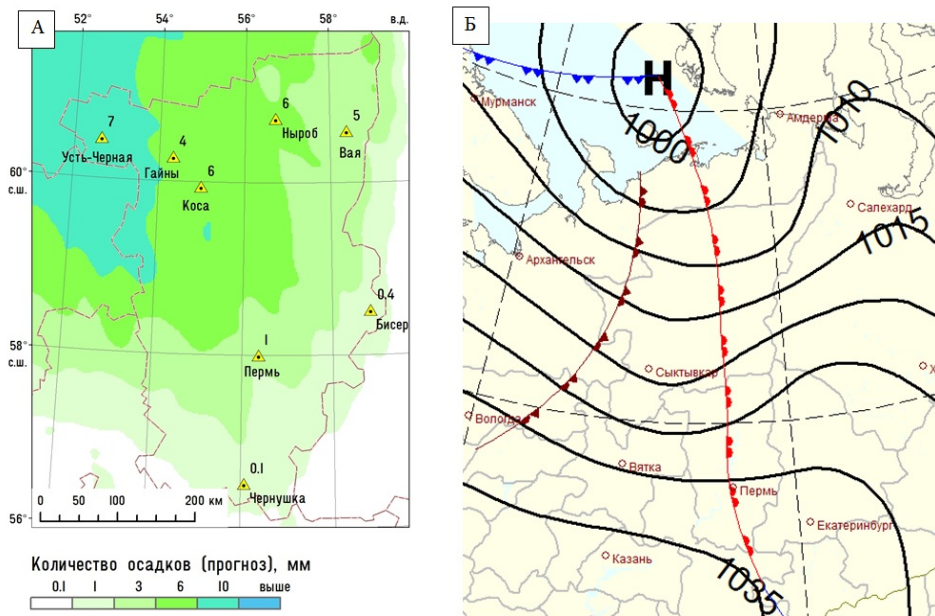


Рис. 2. Распределение осадков под влиянием меридионально расположенного теплого фронта: фактические и прогностические суммы осадков, мм. Цифры у метеостанций – суммы фактически выпавших осадков за полусутки, цветное поле – суммы прогностических осадков по модели WRF с заблаговременностью 15 ч (а); фрагмент приземной карты с фронтальным анализом от 22.11.2012 г. 12 ч ВСВ (б).

Fig. 2. Distribution of precipitation under the influence of a longitude-oriented warm front: actual and prognostic amounts of precipitation, mm. Digits near meteorological stations designate real amounts of precipitation observed for a half-day (12 h), areas in color – prognostic amounts of precipitation derived using the WRF model with 15 h projection; a fragment of a near-ground map with frontal analysis for 12:00 h UTC 22.11.2012 (б).

Для сравнения необходимо воспользоваться относительной величиной. Наибольшая частота ложных тревог наблюдается при прогнозе осадков для заблаговременности 15 ч в условиях теплого сектора (28 %) и центральной части циклона (20 %), для 27 ч – в центре циклона (11 %) и на холодном фронте с волнами (10 %), для 39 ч – в центре циклона (20 %).

В условиях теплого сектора модельная зона сильных снегопадов охватывает большую часть территории края и ориентирована с северо-запада на юго-восток (рис. 3). Прогностические значения интенсивности осадков варьируют от 6,0 до 8,4 мм/12 ч. Фактически сильные снегопады были локализованы в двух областях: на северо-западе Пермского края и местами в горном восточном районе.

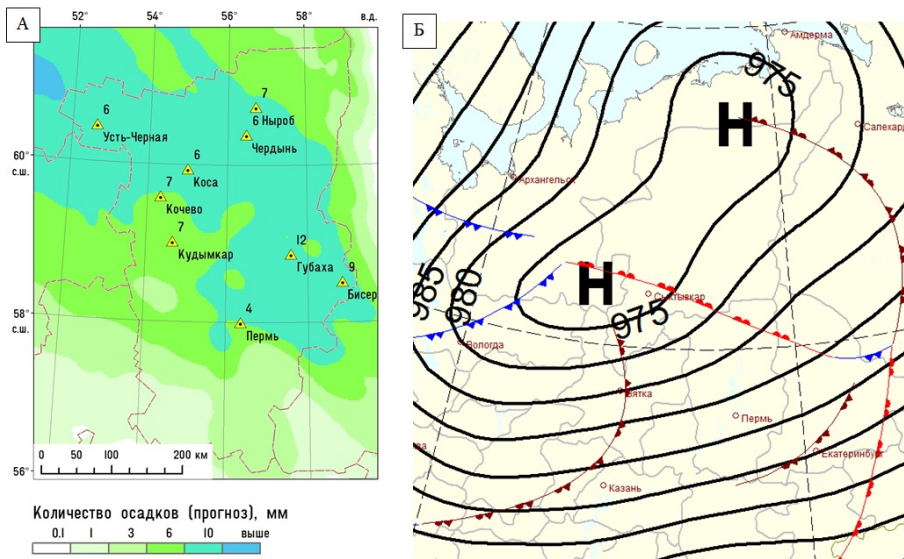


Рис. 3. Распределение осадков под влиянием теплого сектора циклона: фактические и прогностические суммы осадков, мм. Цифры у метеостанций – суммы фактически выпавших осадков за полусутки, цветное поле – суммы прогностических осадков по модели WRF с заблаговременностью 15 ч (а); фрагмент приземной карты с фронтальным анализом от 13.12.2013 г. 12 ч ВСВ (б).

Fig. 3. Distribution of precipitation under the influence of the warm sector of a cyclone actual and prognostic amounts of precipitation, mm. Digits near meteorological stations designate real amounts of precipitation observed for a half-day (12 h), areas in color – prognostic amounts of precipitation derived using the WRF model with 15 h projection; a fragment of a near-ground map with frontal analysis for 12:00 h UTC 13.12.2013 (б).

При прогнозе сильных снегопадов, сформированных под влиянием центральных частей южных и юго-западных циклонов, модель WRF всегда завышает сумму осадков по востоку Пермского края (для метеостанций Лысьва, Кын, Губаха) на 25–50 %.

Прогностическая область сильных осадков в холодное полугодие при прохождении холодного фронта с волнами через территорию исследования совпадает с фактической зоной только при условии малых скоростей смещения основного фронта и вершин волновых возмущений вдоль него. Если холодный фронт с волнами смещается со скоростью 10 м/с и более, то модель WRF связывает очаг сильных снегопадов с вершиной волны, в то время как фактическая зона осадков располагается перед теплым участком.

Пропуски явления чаще отмечаются при прогнозе сильных снегопадов, связанных с холодным фронтом (16 и 28 % при заблаговременности

15 и 39 ч соответственно) и с теплым сектором циклона (28 % при прогнозе на 27 ч), что весьма закономерно. При обоих типах синоптических ситуаций мезомасштабная модель представляет распределение сильных снегопадов «пятнами» (рис. 4).

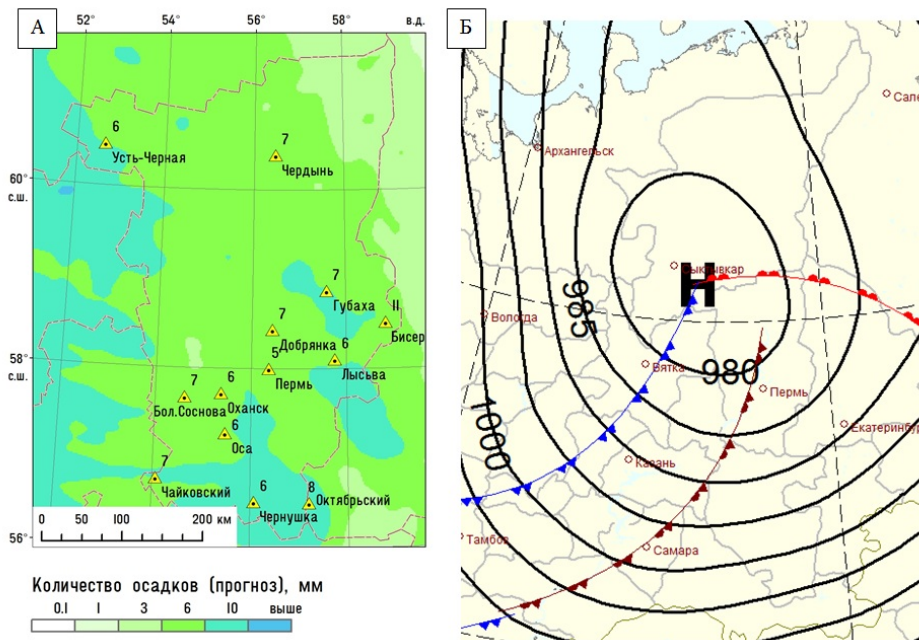


Рис. 4. Распределение осадков под влиянием теплого сектора циклона: фактические и прогностические суммы осадков, мм. Цифры у метеостанций – суммы фактически выпавших осадков за полусутки, цветное поле – суммы прогностических осадков по модели WRF с заблаговременностью 27 ч (а); фрагмент приземной карты с фронтальным анализом от 18.11.2013 г. 0 ч ВСВ.

Fig. 4. Distribution of precipitation under the influence of the warm sector of a cyclone actual and prognostic amounts of precipitation, mm. Digits near meteorological stations designate real amounts of precipitation observed for a half-day (12 h), areas in color – prognostic amounts of precipitation derived using the WRF model with 27 h projection; a fragment of a near-ground map with frontal analysis for 0 h UTC 18.11.2013 (б).

Абсолютная (δQ) и среднеквадратичная (σ_Q) ошибки прогнозов невелики при всех синоптических ситуациях и находятся в пределах 0,0–1,3 и 0,97–4,12 мм соответственно. Наименьшие значения ошибок отмечаются при прогнозе на 27 ч.

Относительная ошибка прогнозов (OTM) находится в широком интервале от 0,2 до 37,5 %. Наибольшие значения отмечаются при прогнозе сильных снегопадов с заблаговременностью 15 ч.

В условиях тыловой части циклона с вторичными холодными фронтами и центра циклона с фронтом окклюзии ошибка составляет более 35 %. В первом случае модельные значения сумм осадков оказались меньше фактических, а сильный снегопад, который был отмечен в горном восточном районе, модель воспроизвела севернее на 150 км. При этом модель весьма успешно воспроизвела развитие вынужденной конвекции, сформировавшей вторичные холодные фронты, и учла влияние орографии (рис. 5).

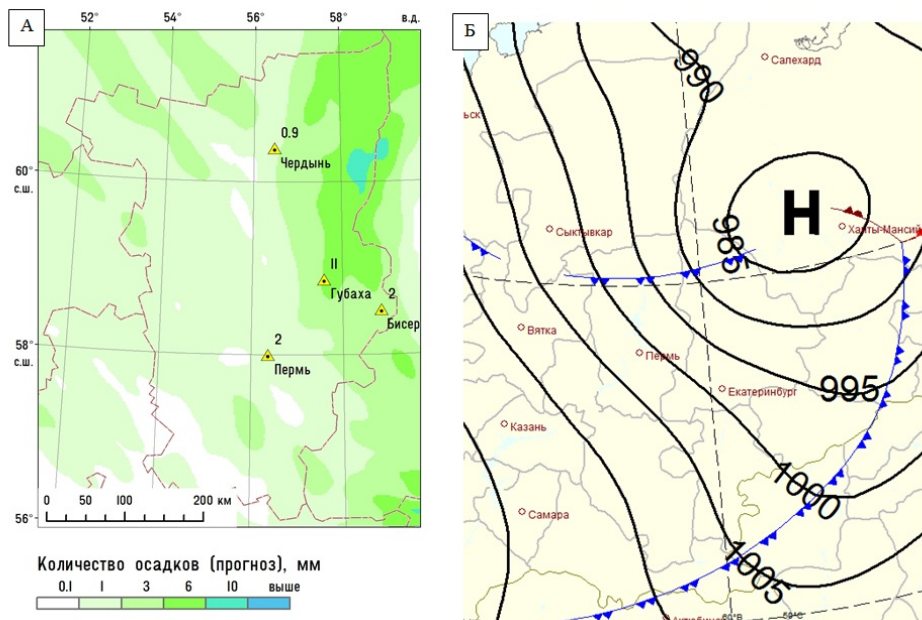


Рис. 5. Распределение осадков в тыловой части циклона с вторичными холодными фронтами: фактические и прогностические суммы осадков, мм. Цифры у метеостанций – суммы фактически выпавших осадков за полусутки, цветное поле – суммы прогностических осадков по модели WRF с заблаговременностью 15 ч (а); фрагмент приземной карты с фронтальным анализом от 14.10.2013 г. 12 ч UTC (б).

Fig. 5. Distribution of precipitation in the rear side of a cyclone with secondary cold fronts: actual and prognostic amounts of precipitation, mm. Digits near meteorological stations designate real amounts of precipitation observed for a half-day (12 h), areas in color – prognostic amounts of precipitation derived using the WRF model with 15 h projection; a fragment of a near-ground map with frontal analysis for 12:00 h UTC 14.10.2013 (б).

Во втором случае прогностические значения оказались больше фактических. Модельная зона сильных осадков занимает северные районы Пермского края и хорошо согласуется с положением приземного центра заполняющегося циклона и фронта окклюзии. По факту сильный снегопад отмечен локально на крайнем севере региона и, вероятнее всего, был

обусловлен влиянием местных условий, формирующих дополнительные вертикальные движения, способствующие усилению интенсивности осадков.

Заключение

Применение модели WRF в оперативной синоптической практике для прогноза сильных снегопадов на территории Пермского края возможно с учетом следующих выводов:

1. Модель WRF успешно рассчитывает количество сильных осадков обложного характера с некоторым завышением сумм при их формировании в центральной части циклона.

2. Модельные суммы осадков на востоке Пермского края всегда выше фактических на 25–50 % при прогнозе сильных снегопадов, сформированных в центральных частях южных и юго-западных циклонов.

3. Менее надежные прогнозы сильных снегопадов наблюдаются при их выпадении под влиянием холодного фронта и холодного фронта с волнами и в тылу циклона с вторичными холодными фронтами. При этих синоптических ситуациях модель WRF недооценивает вклад вертикальных движений в районе со сложной орографией.

4. Прогнозы сильных снегопадов, выпавших в центре заполняющихся циклонов в процессе их сегментации, оказались низкого качества.

5. Численные эксперименты по прогнозу осадков с помощью модели WRF в холодный период года необходимо продолжить для установления оптимального пространственного разрешения применительно к восточному району Пермского края, имеющему горный рельеф.

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

Список литературы

1. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2015. 308 с.
2. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Пицальникова Е.В., Связов Е.М., Шихов А.Н. Оценка качества прогноза очень сильного снегопада на Урале с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 55-62.
3. Калинин Н.А., Попова Е.В. Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15 – 16 марта 2013 года // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2013. № 32. С. 7-16.
4. Методические указания. РД № 52.27.284-91. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Комитет Гидрометеорологии при Кабинете министров СССР. М., 1991. 149 с.
5. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724-2009. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 62 с.
6. Пицальникова Е.В., Калинин Н.А., Ветров А.Л., Шихов А.Н., Связов Е.М., Быков А.В. Прогноз сильного и очень сильного снегопада на Урале на основе модели WRF // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 58-72.

7. Пищальникова Е.В. Синоптическая классификация очень сильных снегопадов в Пермском крае // Географический вестник. 2017. № 1(40). С. 85-92.
8. Пищальникова Е.В., Калинин Н.А. Условия формирования и прогноз обильных снегопадов в Пермском крае. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 168 с.

References

1. Kalinin N.A. Monitoring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennyh shirotah [Monitoring, simulation and atmospheric conditions forecasting in temperate latitudes]. Perm: Perm State Univ. Publ., 2015, 308 p. [in Russ.].
2. Kalinin N.A., Vetrov A.L., Pishchal'nikova E.V., Sviyazov E.M., Shikhov A.N. Estimating the accuracy of the very heavy snowfall forecast in the Urals by the WRF model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016, vol. 41, no. 3, pp. 193-198. DOI: 10.3103/S1068373916030043.
3. Kalinin N.A., Popova E. V. Chislennyj prognoz opasnyh i neblagopriyatnyh snegopadov v Permskom krae 15-16 marta 2013 goda. [The numerical forecast of the dangerous and unfavorable snowfalls in the Perm Region 15–16 March 2013]. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal]. 2013, vol. 32, pp. 7-16 [in Russ.].
4. Metodicheskie ukazaniya. RD № 52.27.284-91. *Provedenie proizvodstvennyh (operativnyh) ispytaniy novyh i usovershenstvovannyh metodov gidrometeorologicheskikh i geliogeofi-zicheskikh prognozov.* Moscow, 1991, 149 p. [in Russ.].
5. *Nastavlenie po kratkosrochnym prognozam pogody obshchego naznacheniya.* RD 52.27.724-2009. Moscow; Obninsk: IG-SOCIN, 2009, 62 p. [in Russ.].
6. Pischalnikova E.V., Kalinin N.A., Vetrov A.L., Shikhov A.N., Sviyazov E.M., Bykov A.V. Prognoz sil'nogo i ochen' sil'nogo snegopada na Urale na osnove modeli WRF [Forecast of heavy and very heavy snowfall in the Urals based on the model WRF]. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], 2016, vol. 359, pp. 58-72 [in Russ.].
7. Pischalnikova E.V. Synoptic classification of very heavy snowfalls in the Perm region. *Geograficheskii vestnik* [Geographical bulletin], 2017, vol. 1, no. 40, pp. 85–92. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-85-92 [in Russ.].
8. Pischalnikova E.V., Kalinin N.A. Usloviya formirovaniya i prognoz obil'nyh snegopadov v Permskom krae [The conditions of formation and the forecast of heavy snowfalls in Perm region]. Perm: Perm State Univ. Publ., 2016, 168 p. [in Russ.].

Поступила в редакцию 21.11.2017 г.
Received by the editor 21.11.2017.