

## ПРОГНОЗ СИЛЬНЫХ СНЕГОПАДОВ НА УРАЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ

**Николай Александрович Калинин**

Scopus ID: 7006661915, WoS Researcher ID: A-4882-2014, SPIN-код: 3209-4166, Author ID: 67236

e-mail: kalinin@psu.ru

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

**Евгения Владимировна Пищальникова**

SPIN-код: 8069-2573, Author ID: 642734

e-mail: sinoptik.perm@yandex.ru;

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

**Андрей Николаевич Шихов**

Scopus ID: 56951126200, WoS Researcher ID: M-9448-2016, Author ID: 707520, SPIN-код: 7964-0040

e-mail: and3131@inbox.ru

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

**Алексей Васильевич Быков**

SPIN-код: 4699-4627, Author ID: 906353

e-mail: blexx256@yandex.ru

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь*

Проведена сравнительная оценка применимости глобальных моделей атмосферы GFS (NCEP, США), GEM (СМC, Канада) и ICON (DWD, Германия), а также мезомасштабной модели WRF-ARW для краткосрочного прогноза сильных снегопадов на Среднем Урале. Всего рассмотрено 57 случаев сильных снегопадов, наблюдавшихся в 2016–2018 гг. Показано, что в целом за рассматриваемый период существенной разницы в качестве прогноза с заблаговременностью 15 и 27 ч по всем моделям не наблюдается. Наименее качественные прогнозы с заблаговременностью 39 ч показала модель WRF. Модель ICON обеспечивает наиболее успешный прогноз сильных снегопадов. Изучено распределение ошибок прогноза в зависимости от сезона. Установлено, что в середине зимы преобладают пропуски явления, а в весенний период – ложные тревоги. Проанализирована зависимость успешности прогноза от синоптической ситуации. Рассмотрена связь между успешностью численного прогноза снегопадов и двумя объективными параметрами: контрастом температуры на изобарической поверхности 850 гПа и общим влагосодержанием воздушной массы в зоне фронта. На данном этапе исследований выявить статистически значимую зависимость успешности прогноза от этих параметров не удалось.

Ключевые слова: сильные снегопады, глобальные модели атмосферы, модель WRF-ARW, краткосрочный прогноз.

## FORECAST OF HEAVY SNOWFALLS IN THE URALS WITH THE USE OF NUMERICAL ATMOSPHERIC MODELS

**Nikolay A. Kalinin**

Scopus ID: 7006661915, WoS Researcher ID: A-4882-2014, Author ID: 67236, SPIN-code: 3209-4166

e-mail: kalinin@psu.ru

*Perm State University, Perm*

**Evgenia V. Pishchalnikova**

SPIN-code: 8069-2573, Author ID: 642734

e-mail: evapopova@rambler.ru

*Perm State University, Perm*

**Andrey N. Shikhov**

e-mail: and3131@inbox.ru;

Scopus ID: 56951126200, WoS Researcher ID: M-9448-2016, SPIN-code: 7964-0040,

Author ID: 707520

Perm State University, Perm

**Alexey V. Bykov**

SPIN-code: 4699-4627, Author ID: 906353

e-mail: blexx256@yandex.ru

Perm State University, Perm

The paper presents a comparative assessment of the applicability of global atmospheric models GFS (NCEP, U.S.), GEM (CMC, Canada) and ICON (DWD, Germany) and also the mesoscale WRF-ARW model for short-term forecasts of heavy snowfalls in the Middle Urals. In total, we studied 57 heavy snowfall events which occurred in 2016–2018. The average accuracy of 15-h and 27-h forecasts of heavy snowfalls with the use of all the models differs non-significantly. At the same time, the average accuracy of 39-h forecasts by the WRF model is significantly lower. The ICON model provides the most correct forecasts of heavy snowfalls. The seasonal distribution of forecast errors was studied. It is shown that omission errors prevail in mid-winter, while false alarm errors are more frequent in early spring. The relationship between forecast accuracy and synoptic-scale environments was investigated. Two atmospheric parameters, such as temperature gradient at 850 hPa level and total precipitable water content were also compared with the accuracy of numerical forecasts. At this stage of the study, it was not possible to prove a statistically significant relationship between the forecast accuracy and these atmospheric parameters.

**К е у в о р д с :** heavy snowfall, global atmospheric models, WRF-ARW model, short-term forecast.

### Введение

Сильные снегопады являются одним из неблагоприятных явлений погоды и наносят значительный ущерб различным отраслям экономики [1, 9, 13]. Для минимизации рисков наступления неблагоприятных последствий прогноз данного явления должен быть успешным и заблаговременным.

В настоящее время основным источником данных для прогноза количества осадков являются результаты расчетов глобальных и региональных гидродинамических моделей. Несмотря на успехи, достигнутые в области совершенствования гидродинамических моделей, качество прогнозов сильных снегопадов зачастую не соответствует запросам потребителей. Для повышения успешности прогнозов осадков в холодный период с использованием глобальных моделей разрабатываются подходы, основанные на расчете дивергенции  $Q$ -вектора и эквивалентно-потенциального вихря в состоянии насыщения в слое от 925 до 700 гПа [2, 17], или вводятся новые параметризации, учитывающие влияние орографии на подсеточном уровне [12]. Использование мезомасштабных моделей атмосферы с учетом характеристик и состояния подстилающей поверхности обеспечивает более детальное воспроизведение полей осадков и в целом более высокую успешность прогноза [7, 16]. Однако систематические ошибки, содержащиеся в начальных данных глобальных моделей (например, смещённость прогнозируемых зон осадков по отношению к фактическим), могут оказывать существенное влияние на качество конечного прогноза, составленного с использованием мезомасштабных моделей [4]. В связи с этим выбор оптимального источника данных глобального численного прогноза, используемого в качестве начальных условий при запуске мезомасштабной модели, остается актуальной задачей. Кроме того, рост пространственного разрешения глобальных моделей атмосферы до 10–25 км позволяет в ряде случаев вообще отказаться от использования мезомасштабных моделей для прогноза сильных осадков в холодный период года.

Помимо выбора модели и ее параметризаций на успешность прогноза сильных снегопадов также влияет синоптическое положение. В работах [3, 4, 7] показано, что мезомасштабная модель WRF и глобальная модель GFS в целом адекватно воспроизводят возникновение крупномасштабных систем зон осадков, однако хуже воспроизводят сильные снегопады конвективного характера в тылу циклонов.

С учетом вышеизложенного в настоящем исследовании решались две основные задачи. Во-первых, на примере 57 случаев произведена оценка достоверности прогноза сильных снегопадов на Урале по данным глобальных численных моделей атмосферы GEM, GFS и ICON, а также мезомасштабной модели WRF за 2016–2018 гг. Во-вторых, изучено влияние типа синоптического положения, а также двух объективных количественных параметров — контраста температуры воздуха на изобарической поверхности 850 гПа в зоне фронта и общего влагосодержания воздушной массы — на качество модельного прогноза снегопадов.

### Материалы и методы исследования

В настоящей работе использовались прогнозы осадков холодного периода по трем глобальным моделям атмосферы (GEM, GFS и ICON), выходные данные которых публикуются на серверах национальных метеослужб. Краткие сведения о данных моделях с соответствующими ссылками приведены в табл. 1. Более подробные сведения можно найти в обзоре [11]. Также использовались прогнозы мезомасштабной модели WRF с динамическим ядром ARW версии 3.8.1 [15]. Программный комплекс модели WRF установлен на многопроцессорном вычислительном комплексе «ПГНИУ-Кеплер», состоящем из 8 вычислительных узлов iDataPlex DX360 M4 на базе процессоров Intel Xeon E5 и видеокарт NVidia Tesla K20. Используемые настройки модели приведены в табл. 2.

Выходная продукция всех моделей была получена в коде GRIB2 с помощью скриптов, обеспечивающих загрузку данных с серверов национальных метеослужб по заданному списку переменных (в данном случае – количество осадков). Для раскодирования данных и проведения вычислений использовалось программное обеспечение NDFD tkDegrib 2.02 и ArcGis 10 (ESRI, США). Выходные данные моделей ICON и GFS не требуют раскодирования и могут непосредственно использоваться в ArcGis. При расчетах использовались выходные данные моделей от 0 ч Всемирного скоординированного времени (BCV) на сроки 3, 15, 27 и 39 ч для того, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения количества осадков на метеостанциях. Расчет производился путем определения разности накопленных сумм осадков по модели за текущий и предшествующий сроки (3, 15, 27, 39 ч от времени запуска).

В соответствии с Наставлением [6] в качестве критерия сильного снегопада было принято значение  $\geq 6$  мм/12 ч. В качестве проверочных данных использованы измерения полусуточных сумм осадков на 48 метеостанциях, расположенных на территории Пермского края, Свердловской области и Республики Удмуртия. Расчеты проведены за период с января 2016 по январь 2018 г., в течение которого наблюдалось 57 случаев с сильными снегопадами.

Определение значений температуры на изобарической поверхности 850 гПа ( $^{\circ}\text{C}/500$  км) и общего влагосодержания воздушной массы в зоне фронта (мм) производилось с использованием данных реанализа по модели CFS (NCEP, США). Данные реанализа CFS имеют пространственное разрешение  $0,5^{\circ}$  и временное – 6 ч. Для определения синоптического положения и стадий развития циклона использовались данные о приземном давлении, геопотенциальной высоте и температуре воздуха на основных изобарических поверхностях (850, 700, 500, 300 гПа). Для оценки контраста температуры в зоне фронта привлекались данные о температуре на изобарической поверхности 850 гПа.

Оценка качества прогноза сильного снегопада выполнена по совокупности характеристик, рекомендованных РД 52.27.284–91 [5].

Таблица 1

Краткие сведения об использованных глобальных моделях атмосферы

Название модели	Разработчик (страна)	Шаг расчетной сетки	Количество вертикальных уровней	Шаг сетки, на которой использовалась информация	Ссылка на источник данных
GFS	National Center for Environmental Prediction (NCEP), США	13 км	64	$0,25^{\circ}$	<a href="http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod">http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod</a>
GEM	Canadian Meteorological Center (CMC), Канада	$0,14^{\circ}$	120	$0,24^{\circ}$	<a href="http://dd.weatheroffice.gc.ca/model_gem_global/25km/grib2/lat_lon/">http://dd.weatheroffice.gc.ca/model_gem_global/25km/grib2/lat_lon/</a>
ICON*	Deutscher Wetterdienst (DWD), Германия	13 км	90	$0,125^{\circ}$	<a href="http://ftp-outgoing2.dwd.de/gds/ICON/grib/europe/">http://ftp-outgoing2.dwd.de/gds/ICON/grib/europe/</a>

\*Данные получены с февраля 2017 г.

Таблица 2

Настройки модели WRF, используемые в исследовании

<i>Характеристика модели</i>	<i>Принятая настройка</i>
Шаг сетки	7,2 км
Число узлов	600×600
Число вертикальных уровней	42
Модель рельефа	U.S. Geological Survey (USGS) DEM (30s)
Срок запуска модели	0 ч ВСВ, с предварительным усвоением данных объективного анализа за 12 ч
Заблаговременность прогноза	15, 27 и 39 ч
Временной шаг вывода данных	1 ч
Динамическое ядро	Advanced Research WRF (ARW), non-hydrostatic
Шаг интегрирования по времени	36 с
Начальные и граничные условия	Прогноз GFS с шагом сетки 0,5°
Микрофизика облачности	Схема Томпсона
Планетарный пограничный слой	Схема университета Yonsei
Подстилающая поверхность	Модель Noah
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)
Приземный слой	Схема Монины-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия
Конвекция	Прямое моделирование (без параметризации)

### Результаты и их обсуждение

Синоптическая классификация случаев сильных снегопадов включала определение района возникновения циклона, стадии его развития и синоптической ситуации. Ранее в работе [8] была проведена синоптическая классификация случаев очень сильного снегопада для территории Пермского края за 1979–2013 гг. В настоящей работе данная классификация была модифицирована с учетом имеющейся выборки случаев.

По району возникновения было выявлено 5 типов циклонов (их траектории смещения и среднее положение осей высотных фронтальных зон представлены на рис. 1), при которых отмечался сильный снег: северо-западный, западный, юго-западный, южный и местный. В контексте данного исследования под местным циклоном понимался вихрь, сформировавшийся в районе исследования или в непосредственной близости от его границ на расстоянии не более 300 км.

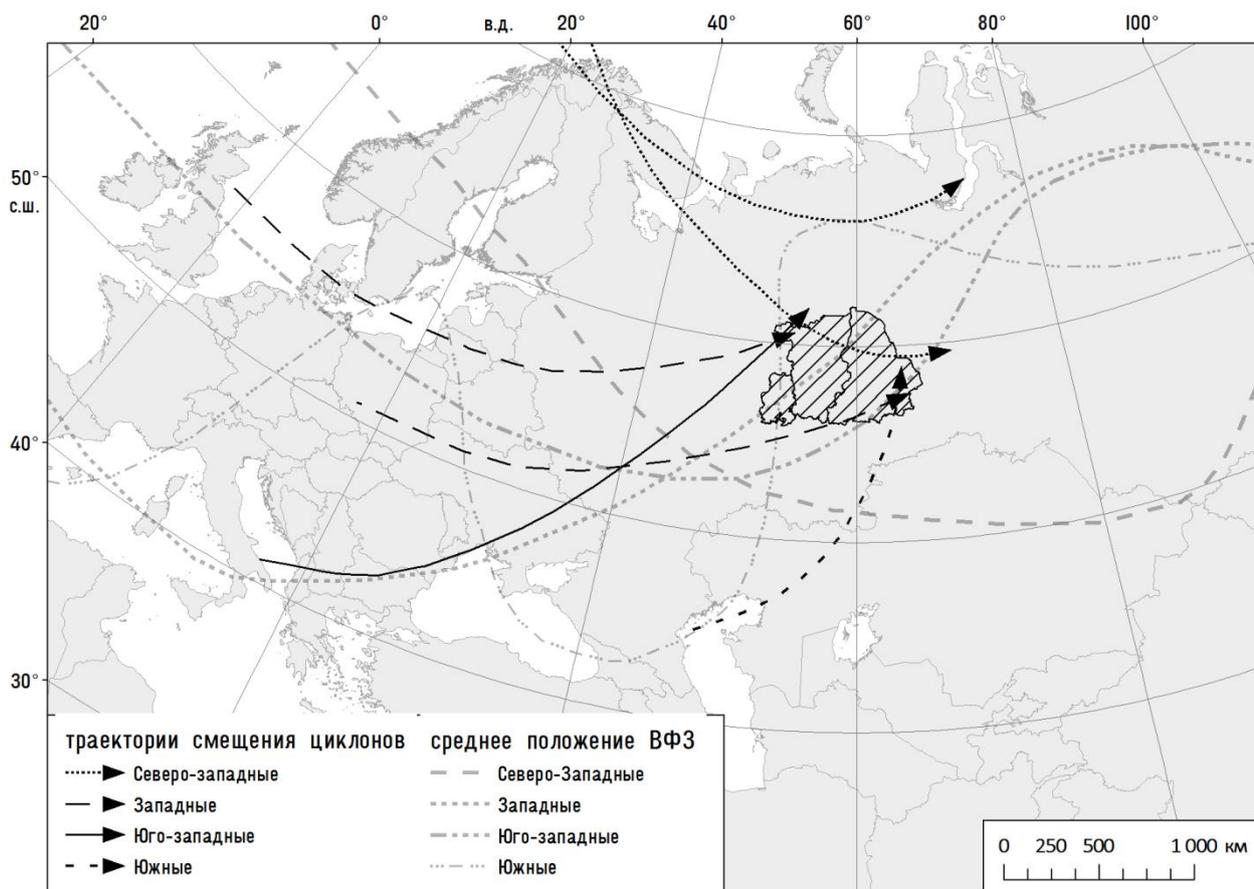


Рис. 1. Среднее положение осей высотных фронтальных зон и траектории смещения циклонов при выпадении сильных снегопадов на Среднем Урале

Кроме того, 8,8% рассмотренных случаев сильного снегопада не были связаны с влиянием циклонов и их фронтальных систем, а возникли на западной периферии антициклона (рис. 2в).

Наиболее часто сильные снегопады на Среднем Урале наблюдались при смещении западных или северо-западных циклонов (соответственно 39,1 и 28,3% от числа случаев, обусловленных влиянием циклонов), 17,4% случаев возникло под влиянием местных циклонов. С южными и юго-западными циклонами связано 8,7 и 6,5% случаев соответственно (рис. 2а).

В тех случаях, когда сильный снегопад формировался под влиянием циклона или его фронтальных систем, была определена также стадия развития барического образования. Более половины случаев сильного снегопада наблюдалось в циклонах на стадии заполнения (рис. 2б), хотя известно, что на заключительной стадии развития циклонического вихря фронтальная облачность в нем размывается, а интенсивность осадков уменьшается [10]. Вероятно, большое число случаев сильных снегопадов в заполняющихся циклонах объясняется тем, что в зимний период большинство циклонов, смещающихся с Атлантики или Западной Европы, достигает территории Среднего Урала уже на стадии заполнения. На стадию максимального развития приходится 21,7% случаев сильного снегопада, 13% случаев связано с влиянием молодого циклона и его фронтальных систем. Реже всего (8,7% случаев) образование сильных снегопадов происходит на начальной стадии развития циклона.

В результате классификации случаев сильного снегопада в зависимости от синоптического положения за 2016–2018 гг. (рис. 2в) было выделено 8 типов, характерных для данного явления, что несколько меньше, чем в работе [8], где рассматривалось 11 типов синоптических ситуаций.

В подавляющем большинстве случаев сильные снегопады связаны с тремя типами синоптического положения: теплый фронт, фронт окклюзии и волна на холодном фронте. На них в сумме приходится около 60% общего числа случаев, что хорошо согласуется с синоптической практикой [10], согласно которой наиболее интенсивные осадки обычно имеют фронтальную природу. В 12,3% случаев сильный снегопад формируется под влиянием малоподвижного фронта. Вклад остальных выделенных типов синоптического положения составляет 28,1%.

Общая оценка успешности прогнозов дана как за весь рассматриваемый период (2016–2018 гг.), так и за период получения данных по модели ICON (с февраля 2017 г.) (табл. 3). В целом за рассматриваемый период существенной разницы в качестве прогнозов по всем моделям не наблюдалось. Модель ICON обеспечивает получение наиболее успешных прогнозов сильных снегопадов при среднем значении критерия Пирса-Обухова 0,49 и долей успешных прогнозов 92%.

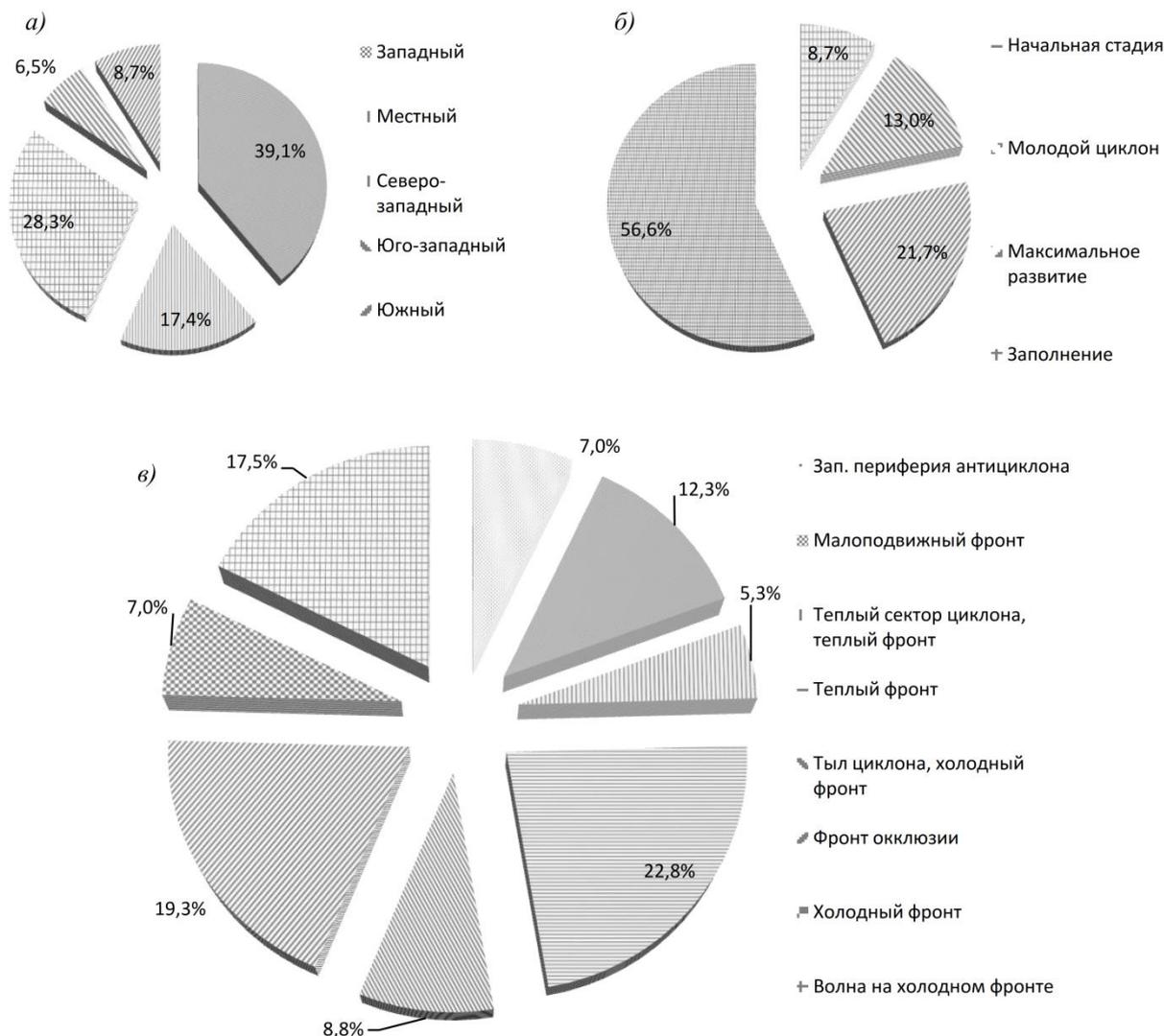


Рис. 2. Классификация случаев сильного снегопада в зависимости от: а – района возникновения циклона, б – стадии его развития; в – синоптического положения

Из табл. 4, где приведены показатели успешности численного прогноза сильных снегопадов за весь рассматриваемый период в зависимости от заблаговременности, следует, что в целом за рассматриваемый период существенной разницы в качестве прогнозов с заблаговременностью 15 и 27 ч по всем моделям не наблюдается. Прогнозы с заблаговременностью 39 ч в целом по всем моделям имеют более низкую оправдываемость, причем наименее качественные прогнозы при этой заблаговременности показывает модель WRF. Однако в связи с тем, что объем выборки в зависимости от заблаговременности прогноза изменялся от 6 до 30, данные, представленные в табл. 4, можно считать предварительными.

Определение влияния синоптического положения на качество прогноза сильных снегопадов по моделям GFS, GEM и WRF позволяет оценить необходимость применения в оперативной практике той или иной модели в зависимости от наблюдающейся синоптической ситуации. Для оценки качества прогнозов сильного снегопада ( $\geq 6$  мм/12 ч) использовались две основные характеристики: критерий Пирса-Обухова ( $T$ ) и общая оправдываемость прогноза сильного снегопада ( $U$ ). Их значения при разных типах синоптического положения приведены в табл. 5.

Таблица 3

Показатели успешности численного прогноза сильных снегопадов за весь рассматриваемый период (в числителе) и за период получения данных по модели ICON (в знаменателе)

Показатель успешности прогноза	Гидродинамическая модель			
	GEM	GFS	WRF	ICON
Критерий Пирса-Обухова	0,42/0,39	0,43/0,47	0,40/0,45	0,49
Доля успешных прогнозов, %	90/91	90/91	89/91	92
Оправдываемость прогноза наличия явления, %	52/46	54/52	51/52	56
Предупрежденность явления, %	49/45	49/53	47/50	54

Таблица 4

Показатели успешности численного прогноза сильных снегопадов за весь рассматриваемый период в зависимости от заблаговременности (15, 27 и 39 ч соответственно)

Показатель успешности прогноза	Гидродинамическая модель			
	GEM	GFS	WRF	ICON
Критерий Пирса-Обухова	0,40/0,50/0,28	0,44/0,47/0,29	0,44/0,43/-0,01	0,62/0,39/0,42
Доля успешных прогнозов, %	90/90/90	91/88/92	90/88/85	93/92/91
Оправдываемость прогноза наличия явления, %	44/66/30	49/55/52	49/62/11	61/52/50
Предупрежденность явления, %	47/56/35	49/56/32	51/50/6	67/43/48

Таблица 5

Успешность прогнозов сильного снегопада в зависимости от синоптического положения по критерию Пирса-Обухова ( $T$ ) и общей оправдываемости прогноза ( $U$ )

Тип синоптического положения	Число прогнозов	Критерий Пирса-Обухова, $T$			Число успешных прогнозов ( $U$ ), %		
		GEM	GFS	WRF	GEM	GFS	WRF
Западная периферия Антициклона	4	0,38	0,39	0,60	89	92	97
Малоподвижный фронт	7	0,35	0,43	0,32	90	93	91
Теплый сектор, теплый фронт	4	0,11	0,39	0,22	96	96	86
Теплый фронт	13	0,57	0,57	0,54	89	87	86
Тыл циклона, холодный фронт	7	0,36	0,48	0,30	92	92	92
Фронт окклюзии	10	0,42	0,40	0,36	88	86	85
Холодный фронт	4	0,43	0,75	0,84	86	91	92
Холодный фронт с волной	14	0,40	0,32	0,38	92	91	93
Все типы	63	0,42	0,43	0,40	90	90	90

При рассмотрении всех типов синоптического положения в целом существенной разницы в качестве прогноза по обоим критериям не наблюдается. Общая оправдываемость прогноза для всех моделей составила 90%. Критерий Пирса-Обухова равен 0,40–0,43, причем лучшее воспроизведение сильных снегопадов достигается при использовании данных модели GFS.

Согласно критерию Пирса-Обухова наилучшее качество прогнозов наблюдалось при сильных снегопадах, обусловленных смещением фронтов: теплого и холодного. В случае теплого фронта величина  $T$  изменялась в пределах 0,54–0,57, а при снегопадах на холодном фронте – от 0,43 до 0,84 для разных моделей. Хуже всего моделями прогнозировался сильный снегопад при сочетании теплого сектора с теплым фронтом. В такой ситуации величина  $T$  для модели GEM равна 0,11, а для модели GFS – 0,39. При остальных типах синоптического положения успешность прогнозов по критерию Пирса-Обухова близка к средней, изменяясь в пределах от 0,30 до 0,48. Исключение составляют случаи сильных снегопадов на западной периферии антициклона, которые успешно прогнозируются моделью WRF ( $T = 0,60$ ).

Рассмотрим вопрос о влиянии объективных количественных параметров, характеризующих выраженность атмосферного фронта – контраста температуры на изобарической поверхности 850 гПа ( $^{\circ}\text{C}/500 \text{ км}$ ) и общего влагосодержания воздушной массы в зоне фронта (мм) на успешность прогноза сильного снегопада по моделям GEM, GFS и WRF. Для оценки степени выраженности линейной связи между этими показателями и величиной критерия Пирса-Обухова были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, а также коэффициенты линейной корреляции Пирсона, значения которых представлены в табл. 6. Из приведенных данных следует, что статистически значимая линейная связь между объективными характеристиками атмосферного фронта и величиной критерия Пирса-Обухова отсутствует или является слабовыраженной. Отмечается слабая линейная зависимость между рассматриваемыми объективными параметрами и качеством прогноза по моделям GEM и WRF. Для модели GFS коэффициенты корреляции Пирсона незначимы как для контраста температуры, так и для общего влагосодержания воздушной массы. Таким образом, рассматриваемая гипотеза о повышении успешности прогноза сильных снегопадов с увеличением контраста температуры и влагосодержания на атмосферном фронте на данном этапе не может быть принята, хотя продолжение исследований в этом направлении, связанное, например, с увеличением объема выборки, с нашей точки зрения, является целесообразным.

Таблица 6

Оценка зависимости величины критерия Пирса-Обухова от контраста температуры на  $AT_{850}$  и общего влагосодержания воздушной массы в зоне фронта

<i>Коэффициенты корреляции Спирмена/Пирсона</i>		
<i>Модель</i>	<i>Контраст температуры на <math>AT_{850}</math>, <math>^{\circ}\text{C}/500 \text{ км}</math></i>	<i>Общее влагосодержание воздушной массы, мм</i>
GEM	0,29/ <b>0,31</b>	0,24/ <b>0,30</b>
GFS	0,24/0,23	0,25/0,26
WRF	0,27/ <b>0,29</b>	0,34/ <b>0,35</b>

Примечание: жирным шрифтом выделены коэффициенты корреляции Пирсона, превышающие критическое значение, равное 0,27 для рассматриваемого объема выборки (57 случаев) при уровне значимости, равном 0,05.

Влияние сезонного фактора на качество прогнозов по моделям GEM, GFS и WRF учитывалось путем определения для каждого случая ошибок двух типов: ложная тревога и пропуск явления (ошибки первого и второго рода соответственно). Далее вычислялась разность между количеством ошибок первого и второго рода. На рис. 3 представлены значения этой разности за каждый месяц исследуемого периода. Все рассматриваемые модели имеют тенденцию к завышению суммарного количества осадков в холодный период, в основном в его второй половине (февраль–март). В целом количество ложных тревог превышает число пропусков явления (в меньшей степени это характерно для модели WRF), причем в середине зимнего сезона преобладают пропуски явления, а в весенний период – ложные тревоги. Аналогичные выводы были ранее получены для модели WRF в применении к прогнозу осадков за весь холодный период [14].

Далее нами была рассмотрена возможность воспроизведения сильных снегопадов при наиболее распространенных типах синоптического положения. На рис. 4 представлены прогностические суммы осадков с 3 ч ВСВ 8.11.2016 г. до 3 ч ВСВ 9.11.2016 г.

В этот период территория Южного и Среднего Урала находилась под влиянием фронтальных систем западного циклона (рис. 1), который был на стадии заполнения и смещался на восток со скоростью 35–45 км/ч при росте давления в его центре с 1002 до 1009 гПа. В первой половине периода сильный снегопад образовался в районе теплого фронта и в дальнейшем продолжился уже под влиянием холодного фронта и сформировавшегося на нем волнового возмущения. На фронтах наблюдались большие контрасты температуры воздуха, достигавшие на изобарической поверхности 850 гПа 10–14 $^{\circ}\text{C}/500 \text{ км}$ . Общее влагосодержание воздушной массы в зоне фронтов также было очень высоким и достигало 12–16 мм.

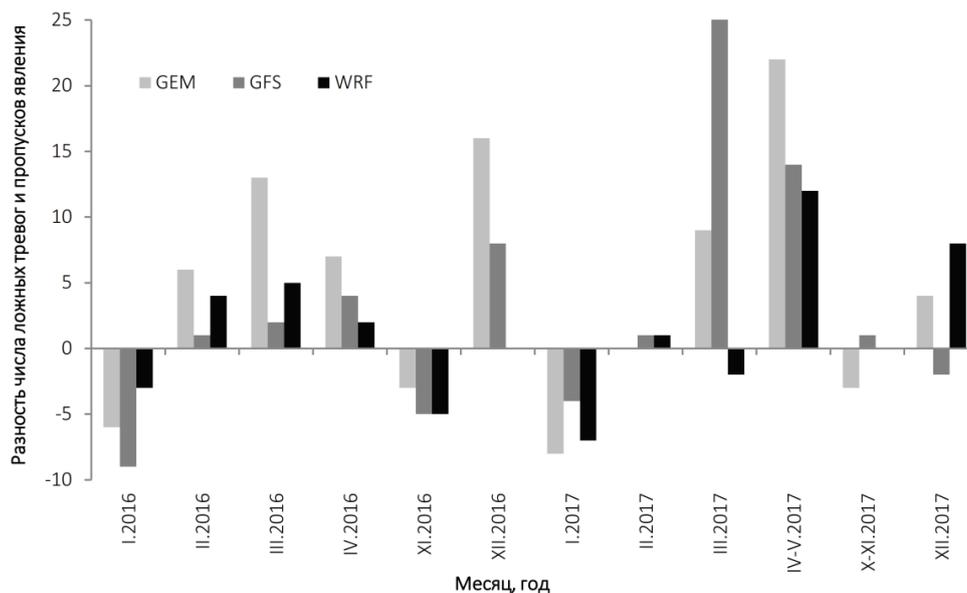


Рис. 3. Соотношение числа пропусков и ложных тревог при прогнозе сильных снегопадов по моделям GFS, GEM, WRF (суммы за месяц)

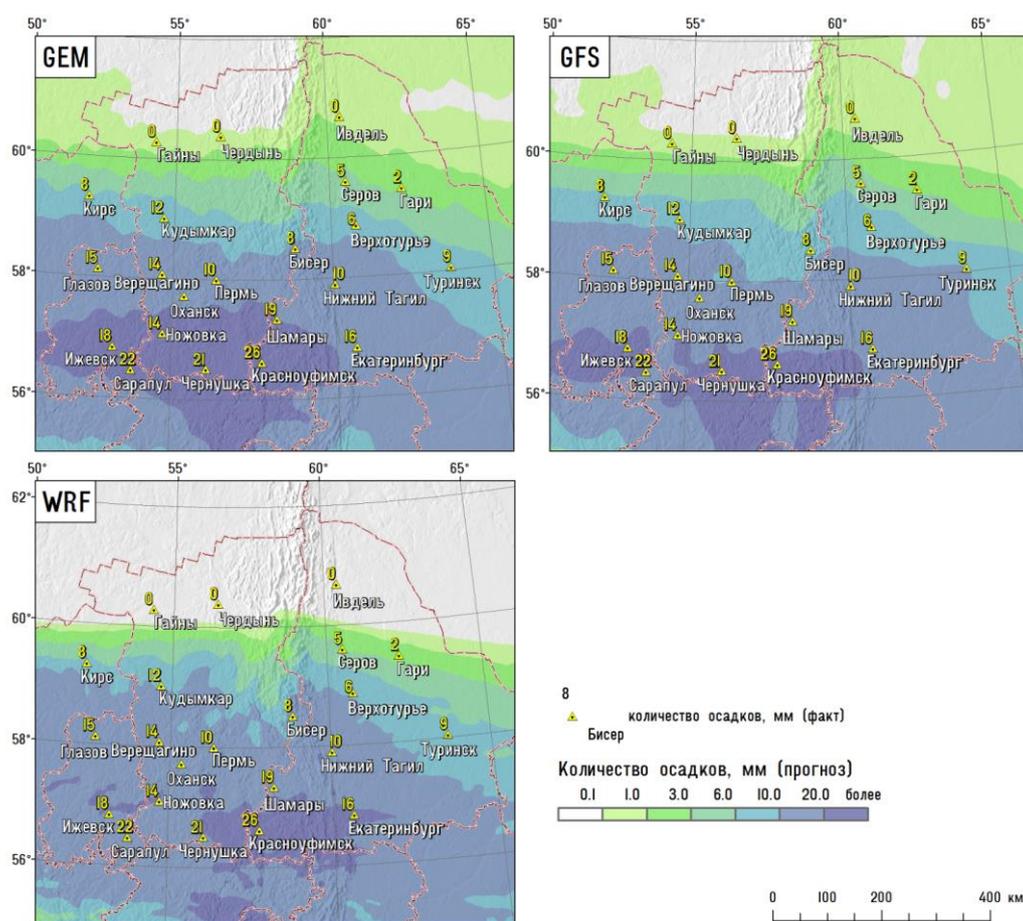


Рис. 4. Сравнение воспроизводимости случаев сильных снегопадов по моделям GEM, GFS и WRF 8–9 ноября 2016 г.

Как было показано выше, сильные снегопады под влиянием теплого фронта в целом воспроизводятся моделями лучше всего. В данном примере качество прогноза также было очень высоким. Величина  $T$  изменялась от 0,89 для модели WRF до 0,96 для моделей GEM и GFS, что

означает практически идеальное воспроизведение сильного снегопада всеми моделями. Во второй половине периода, когда сильный снегопад был обусловлен уже влиянием волны на холодном фронте, величина  $T$  для рассматриваемых моделей составила 0,63–0,74, притом, что лучше всего сильный снегопад был спрогнозирован с помощью модели GFS. Таким образом, качество прогноза оказалось значительно выше, чем в среднем при данном типе синоптического положения. Вполне вероятно, что повышение качества прогноза по сравнению со средним значением в данной ситуации обусловлено сильными контрастами температуры и большим влагосодержанием воздушной массы в зоне фронта. Из рис. 4 следует, что наблюдается практически полное соответствие прогностических и фактических сумм осадков. Все модели точно спрогнозировали размеры и ориентацию зоны осадков, а также область с наибольшим количеством выпавших осадков, расположенную на юго-западе Свердловской области и крайнем юге Пермского края. В этой зоне количество осадков за 12 ч достигло критерия опасного явления (20 мм/12 ч), а суточное количество осадков на отдельных станциях – 26 мм.

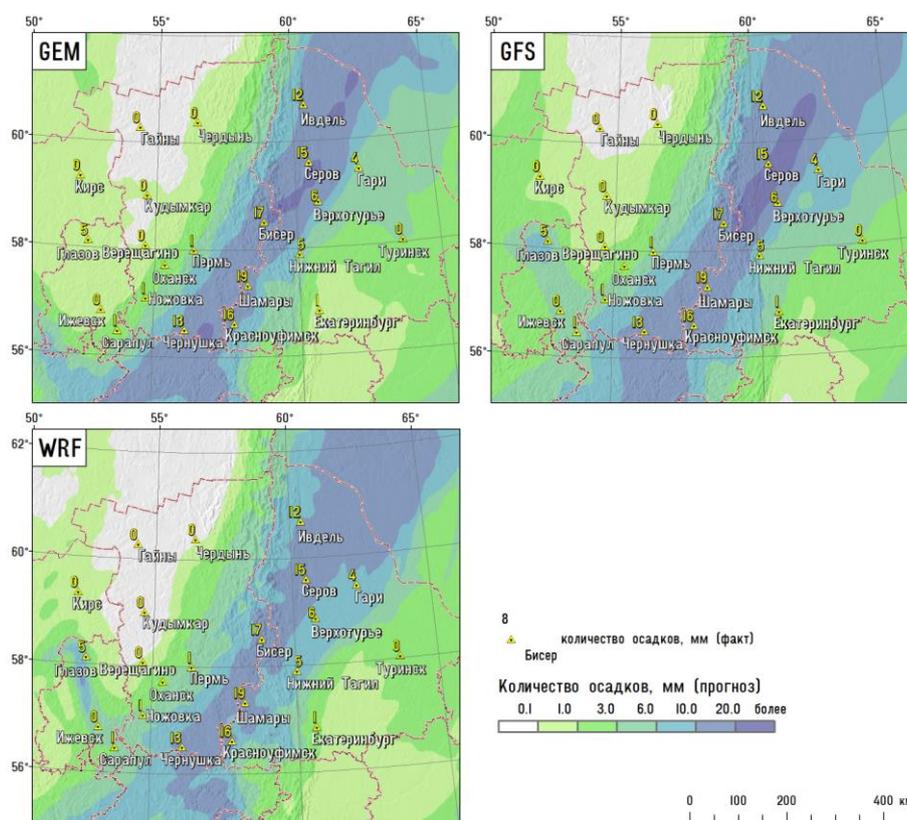


Рис. 5. Сравнение воспроизводимости случаев сильных снегопадов по моделям GEM, GFS и WRF 19–20 марта 2016 г.

На рис. 5 представлены прогностические суммы осадков за сутки с 3 ч ВСВ 19.03.2016 г. до 3 ч ВСВ 20.03.2016 г. В этот промежуток времени погоду на Среднем Урале определял местный молодой циклон, развившийся из волнового возмущения на холодном фронте в начале рассматриваемого периода. Циклон интенсивно углублялся и смещался в Западную Сибирь, а падение давления в его центре происходило со скоростью 2–3 гПа/3 ч. Контраст температуры в районе фронтов на изобарической поверхности 850 гПа составлял 9°C/500 км, а общее влагосодержание воздушной массы было сравнительно низким (6–7 мм). В начале периода сильный снегопад начался под воздействием волны на холодном фронте, а в конце периода продолжился уже под влиянием холодного фронта и тыловой части циклона.

Качество прогнозов в рассматриваемом случае было высоким, особенно в первой половине периода. Критерий Пирса-Обухова изменяется 0,78 (модель GEM) до 0,95 (модель WRF). Во второй половине периода, когда сильный снегопад продолжился под влиянием холодного фронта и тыловой части циклона, качество прогноза заметно ухудшилось у модели WRF, для которой критерий Пирса-Обухова составил 0,40. Для моделей GEM и GFS величина  $T$  равнялась 0,85.

При рассмотрении полей прогностических и фактических сумм осадков (рис. 5) можно заметить, что в целом моделями были правильно спрогнозированы положение и размеры зоны с сильными снегопадами. Однако на рис. 5 хорошо заметно завышение количества прогностических осадков в весенний период, наиболее выраженное для моделей GEM и GFS. Этот вывод также подтверждается соотношением ошибок первого и второго рода. В данном случае для всех моделей, кроме WRF, число ложных тревог было больше, чем число пропусков явления.

### Заключение

В работе проведена синоптическая классификация случаев сильного снегопада на территории Среднего Урала. Показано, что наибольшее число случаев сильного снегопада связано с западными и северо-западными циклонами. При анализе типов синоптического положения, способствующих формированию сильного снегопада, было установлено, что данное явление в большинстве случаев связано с тремя типами ситуаций: теплый фронт, фронт окклюзии и волна на холодном фронте. При рассмотрении влияния стадии развития циклона на формирование сильного снегопада выявлено, что более половины случаев приходится на стадию заполнения циклона.

Оценка качества прогноза сильных снегопадов с использованием гидродинамических моделей GEM, GFS, WRF и ICON позволила сформулировать следующие выводы:

1. В целом за весь рассматриваемый период существенной разницы в качестве прогноза по моделям GEM, GFS и WRF не наблюдается. Критерий Пирса-Обухова для всех моделей равен 0,40–0,43.

2. Модель ICON (период получения данных с февраля 2017 г.) обеспечивает получение наиболее успешных прогнозов сильных снегопадов при среднем значении критерия Пирса-Обухова 0,49 и долей успешных прогнозов 92%.

3. В целом за рассматриваемый период существенной разницы в качестве прогнозов с заблаговременностью 15 и 27 ч по всем моделям не наблюдается. Прогнозы с заблаговременностью 39 ч в целом по всем моделям имеют более низкую оправдываемость, причем наименее качественные прогнозы при этой заблаговременности показывает модель WRF. Однако в связи с тем, что объем выборки в зависимости от заблаговременности прогноза изменялся от 6 до 30, полученные данные можно считать предварительными.

4. Согласно критерию Пирса-Обухова наилучшее качество прогнозов наблюдается при сильных снегопадах, обусловленных смещением теплого и холодного фронтов, а самое низкое качество прогнозов отмечается при сочетании теплого сектора с теплым фронтом.

5. На данном этапе исследований сделать однозначный вывод о наличии статистически значимой связи между качеством прогноза по всем рассматриваемым моделям и объективными параметрами, такими как контраст температуры в зоне фронта и общее влагосодержание воздушной массы, не представляется возможным, хотя продолжение исследований в этом направлении, связанное, например, с увеличением объема выборки, с нашей точки зрения, является целесообразным.

6. Все рассматриваемые модели имеют тенденцию к завышению количества осадков в холодный период в основном в его второй половине (февраль–март). Количество ошибок первого рода (ложных тревог) превышает число пропусков явления. В меньшей степени это характерно для модели WRF. При этом в середине зимнего сезона преобладают пропуски явления, а в весенний период – ложные тревоги.

Для демонстрации выявленных закономерностей на конкретных примерах в работе приведено синоптическое описание двух случаев сильных снегопадов на Среднем Урале (19–20 марта 2016 г. и 8–9 ноября 2016 г.), дополненное результатами оценки качества прогноза по моделям GEM, GFS и WRF.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра коллективного пользования высокопроизводительными вычислительными ресурсами Пермского государственного национального исследовательского университета за предоставленные вычислительные ресурсы, а также С.В. Костареву за помощь в проведении расчетов.

**Библиографический список**

1. Бедрицкий А.И., Коршунов А.А., Шаймарданов М.З. Влияние опасных гидрометеорологических явлений на устойчивое развитие экономики России // Метеорология и гидрология. 2017. № 7. С. 59–67.
2. Калинин Е.Д., Юсупов Ю.И. Метод прогноза сильных конвективных осадков в холодный период года // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 19–28.
3. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь, 2015. 308 с.
4. Калинин Н.А., Ветров А.Л., Пищальникова 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.
5. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД № 52.27.284-91. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 149 с.
6. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 62 с.
7. Пищальникова 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. № 359. с. 58–72.
8. Пищальникова Е.В. Синоптическая классификация очень сильных снегопадов в Пермском крае // Географический вестник. 2017. № 1(40). С. 85–92.
9. Пищальникова Е.В., Калинин Н.А. Условия формирования и прогноз обильных снегопадов в Пермском крае. Пермь, 2016. 168 с.
10. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 702 с.
11. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 359. С. 5–33.
12. Choi H.J. and Hong S.Y. An updated subgrid orographic parameterization for global atmospheric forecast models // J. of Geoph. Res. 2015. Vol. 120 (24). P. 445–457.
13. Fargey S., Henson W., Hanesiak J. and Goodson R. Characterization of an unexpected snowfall event in Iqaluit, Nunavut, and surrounding area during the Storm Studies in the Arctic field project // J. of Geoph. Res. 2014. Vol. 119 (9). P. 5492–5511.
14. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin // J. of Geograph. Sci. 2018 Vol. 28 (2). P. 221–237.
15. Skamarock W.C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008. 125 p.
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. and Atmos. Physics. 2011. Vol. 113 (1). P. 11–25.
17. Wetzel S.W. and Martin J.E. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation // Wea. Forecasting. 2001. Vol. 16. P. 156–167.

**References**

1. Bedritskii, A. I., Korshunov, A.A., Shaymardanov, M.Z. (2017) Influence of the dangerous hydrometeorological phenomena on sustainable development of economy of Russia, *Meteorology and Hydrology*, no. 7, pp. 59–67.
2. Kalinin, E.D., Yusupov, Yu.I. (2013) A method of forecasting the heavy convective precipitation zones during the cold season, *Meteorology and Hydrology*, no. 4, pp. 19–28.
3. Kalinin, N.A. (2015), *Monitiring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennykh shirotakh* [Monitoring, modeling and forecast of the state of atmosphere in midlatitudes]. Perm State University, Perm, Russia.
4. Kalinin, N.A., Vetrov, A.L., Pishchalnikova, E.V., Sviyazov, E.M., Shikhov, A.N. (2016) Estimating the accuracy of the very heavy snowfall forecast in the Urals by the WRF model, *Meteorology and Hydrology*, no. 3, pp. 55–62.

5. *Guideline. Carrying out production (expedition) tests of new and advanced methods of hydro-meteorological and heliogeophysical forecasts* (1991), RD No. 52.27.284-91, Leningrad, Gidrometeoizdat, Russia.
6. *Manual on short-term weather forecasts of general purpose. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet)* (2009), Obninsk, IS-SOTsIN, Russia.
7. Pishchalnikova, E.V., Kalinin, N.A., Vetrov, A.L., Shikhov, A.N., Sviyazov, E.M., Bykov A.V. (2016) The forecast of the strong and very much the heavy snowfall in the Urals on the basis of the WRF model, *Proceedings of Hydrometeorological center of Russia*, no. 359, pp. 58–72.
8. Pishchalnikova E.V. (2017) Synoptic classification very much the heavy snowfalls in Perm Krai, *Geographical bulletin*, no. 1(40), pp. 85–92.
9. Pishchalnikova, E.V., Kalinin, N.A. *Conditions of formation and the forecast of heavy snowfalls in Perm Krai* (2016), Perm University, Perm, Russia.
10. *Guide to short-term weather forecasts* (1986), part. 1, Leningrad, Gidrometeoizdat, Russia.
11. Tolstykh, M.A. Global models of the atmosphere: the current state and prospects of development (2016), *Proceedings of Hydrometeorological center of Russia*, no. 359, pp. 5–33.
12. Choi H.J. and Hong S.Y. (2015) An updated subgrid orographic parameterization for global atmospheric forecast models, *J. of Geoph. Res.*, vol. 120(24), pp. 445–457.
13. Fargey S., Henson W., Hanesiak J. and Goodson R. (2014) Characterization of an unexpected snowfall event in Iqaluit, Nunavut, and surrounding area during the Storm Studies in the Arctic field project, *J. of Geoph. Res.*, vol. 119 (9), pp. 5492–5511.
14. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. (2018) A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin, *J. of Geograph. Sci.*, vol. 28(2), pp. 221–237.
15. Skamarock W.C. et al. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008.
16. Wang H., Yu E. and Yang S. (2011) An exceptionally heavy snowfall in Northeast china: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model, *Meteorol. and Atmos. Physics*, vol. 113(1), pp. 11–25.
17. Wetzel S.W. and Martin J.E. (2001) An operational ingredients-based methodology for forecasting mid-latitude winter season precipitation, *Wea. Forecasting*, vol. 16, pp. 156–167.

Поступила в редакцию: 17.09.2018

#### Сведения об авторах

##### **Калинин Николай Александрович**

доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы, Пермский государственный национальный исследовательский университет; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: kalinin@psu.ru

##### **Пищальникова Евгения Владимировна**

кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы, Пермский государственный национальный исследовательский университет; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: sinoptik.perm@yandex.ru

##### **Шихов Андрей Николаевич**

кандидат географических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет; Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: and3131@inbox.ru

#### About the authors

##### **Nikolay A. Kalinin**

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Meteorology and Atmosphere Protection, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

e-mail: kalinin@psu.ru

##### **Evgenia V. Pishchalnikova**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Meteorology and Atmosphere Protection, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

##### **Andrey N. Shikhov**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

**Быков Алексей Васильевич**

кандидат географических наук, аспирант  
кафедры метеорологии и охраны атмосферы,  
Пермский государственный национальный  
исследовательский университет;  
Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

e-mail: blexx256@yandex.ru

**Alexey V. Bykov**

Candidate of Geographical Sciences, Postgraduate  
Student, Department of Meteorology and  
Atmosphere Protection, Perm State University;  
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

**Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:**

*Калинин Н.А., Пищальникова Е.В., Шихов А.Н., Быков А.В.* Прогноз сильных снегопадов на Урале с использованием численных моделей атмосферы // Географический вестник = Geographical bulletin. 2019. №1(48). С. 93–106. doi 10.17072/2079-7877-2019-1-93-106

**Please cite this article in English as:**

*Kalinin N.A., Pishchalnikova E.V., Shikhov A.N., Bykov A.V.* Forecast of heavy snowfalls in the Urals with the use of numerical atmospheric models // Geographical bulletin. 2019. №1(48). P. 93–106. doi 10.17072/2079-7877-2019-1-93-106