

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.509.5

doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-92-108

**ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ WRF И ИНДЕКСОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
АТМОСФЕРЫ****Николай Александрович Калинин^{1✉}, Богдан Алексеевич Сивков²**¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия²Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем, г. Пермь, Россия¹kalinin@psu.ru[✉], <http://orcid.org/0000-0002-4182-1206>, Scopus Author ID: 7006661915, Author ID: 67236, SPIN-код: 3209-4166, Researcher ID: A-4882-2014²sivckovbogdan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-9696>, Scopus Author ID: 57205329819, Author ID: 907087, SPIN-код: 9072-3998

Аннотация. Рассматриваются возможности использования современных подходов к прогнозу летних осадков разной интенсивности, таких как гидродинамическое моделирование с помощью модели WRF и использование индексов неустойчивости атмосферы (CAPE, CIN, LI), рассчитанных на основе выходных данных счета модели применительно к территории Урала. Значения индексов неустойчивости определялись как в точке расположения метеостанции (по ближайшему к ней узлу сетки), так и путем расчета максимального и среднего значений в буферной зоне метеостанции радиусом 50 км. Проведена оценка качества численного прогноза летних осадков разной интенсивности при шаге сетки 3 и 9 км. Оценены возможности использования индексов неустойчивости при прогнозе осадков разной интенсивности для территории Урала. В качестве проверочного материала послужили данные измерений полусуточных сумм осадков в июле 2020 г. на метеостанциях Пермского края, Свердловской, Челябинской, Курганской областях, республик Удмуртия и Башкортостан. Предложен новый подход для прогноза наличия или отсутствия осадков в пункте прогноза на основе прогностических полей накопленных сумм осадков за 12 ч, который демонстрирует более высокие показатели успешности по сравнению с другими рассмотренными подходами. Результаты исследования свидетельствуют об удовлетворительном качестве прогноза осадков разной интенсивности (кроме очень сильных осадков) с помощью модели WRF. Показано, что увеличение шага расчетной сетки не приводит к повышению качества прогноза осадков. Сформулированы рекомендации по использованию модельных прогнозов в оперативной практике.

Ключевые слова: дожди, WRF-ARW, пространственный шаг сетки, качество прогноза, индексы неустойчивости

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596031.

Для цитирования: Калинин Н.А., Сивков Б.А. Численный прогноз летних осадков разной интенсивности с использованием модели WRF и индексов неустойчивости атмосферы // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 3(62). С. 92–108. doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-92-108.



METEOROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-92-108

NUMERICAL FORECAST OF SUMMER PRECIPITATION OF DIFFERENT INTENSITY USING THE WRF MODEL AND ATMOSPHERIC INSTABILITY INDICESNikolay A. Kalinin¹✉, Bogdan A. Sivkov²¹Perm State University, Perm, Russia²Ural Environmental Research Institute, Perm, Russia¹kalinin@psu.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-4182-1206>, Scopus Author ID: 7006661915, Author ID: 67236, SPIN-code: 3209-4166, Researcher ID: A-4882-2014²sivkovbogdan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-9696>, Scopus Author ID: 57205329819, Author ID: 907087, SPIN-code: 9072-3998

Abstract. The paper studies the possibilities of using modern approaches to forecasting summer precipitation of different intensity such as numerical modeling with the WRF model and the use of atmospheric instability indices (CAPE, CIN, LI) calculated based on the model outputs for the territory of the Urals. The instability indices were determined both at the location of the weather station (at the nearest grid node) and by calculating the maximum and average values in the buffer zone of the weather station with a radius of 50 km. The quality of numerical forecast of summer precipitation of different intensity at a grid step of 3 and 9 km was evaluated. The possibilities of using instability indices in forecasting precipitation of different intensity for the territory of the Urals were assessed. The measurements of 12-h precipitation amount in July 2020 at weather stations located in Perm Territory, in the Sverdlovsk, Chelyabinsk, and Kurgan regions as well as in the republics of Udmurtia and Bashkortostan served as verification material. We propose a new approach for predicting the presence or absence of precipitation at a forecast point based on the forecast fields of 12 h accumulated precipitation amounts, which demonstrates higher success rates compared to other approaches considered. The results of the study indicate a satisfactory quality of the forecast of precipitation of varying intensity (except for very heavy precipitation) with the use of the WRF model. It is shown that increasing the step of the calculation grid does not lead to an increase in the quality of precipitation forecast. Recommendations on the use of model forecasts in operational practice are formulated.

Keywords: rains, WRF-ARW, model grid step, forecast quality, instability indices

Acknowledgements: the reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research and Perm Territory, project No. 20-45-596031.

For citation: Kalinin N.A., Sivkov B.A. (2022). Numerical forecast of summer precipitation of different intensity using the WRF model and atmospheric instability indices. *Geographical Bulletin*. No. 3(62). Pp. 92–108. doi: 10.17072/2079-7877-2022-3-92-108.

Введение

На сегодняшний день основным инструментом при подготовке краткосрочных прогнозов погоды являются гидродинамические модели атмосферы. В мире разработано достаточное количество глобальных и мезомасштабных моделей. Среди глобальных моделей можно выделить такие модели, как ECMWF (Европа), UKMO (Великобритания), GFS и CFS (США), GEM (Канада), ПЛАВ (Россия), ICON (Германия), GSM (Япония), ARPEGE (Франция), CMA (Китай). К мезомасштабным можно отнести модели MM5, WRF и RAMS (США), COSMO (Германия), ALADIN (Франция), HIRLAM (Швеция, Норвегия, Дания, Исландия, Нидерланды, Ирландия, Испания, Эстония и Литва), GRAPES_Meso (Китай).

Наиболее популярными в России мезомасштабными моделями являются модель COSMO и модель WRF. Модель COSMO развивается и поддерживается Европейским консорциумом по мезомасштабному моделированию. В консорциум входят метеослужбы Германии, Италии, России, Греции, Румынии и ряд других европейских государств.

*Метеорология**Калинин Н.А., Сивков Б.А.*

Модель WRF разработана Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR) совместно с университетом Пенсильвании. Она отличается тем, что исходный код модели находится в свободном доступе, и она без ограничений может быть установлена на разные вычислительные платформы.

В Гидрометцентре России модель WRF применяется с горизонтальным разрешением от 3 до 20 км [6; 7; 10; 11], а модель COSMO – от 1 до 14 км [3; 8; 13; 18]. В качестве начальных данных для мезомасштабных моделей используются выходные данные глобальных моделей.

Непрерывное развитие гидродинамического моделирования, а также большое разнообразие моделей требуют проведения исследований, позволяющих определить возможности моделей прогнозировать погоду, сравнить их между собой для выбора наилучших решений. Исследования проводятся как с помощью глобальных моделей [1; 4; 20; 21; 26], так и мезомасштабных [2; 5; 7; 8; 10; 12; 14; 19]. Так, в Гидрометцентре России проводятся оперативные испытания численных прогнозов, в частности, осадков разной интенсивности, по четырем глобальным моделям: ПЛАН, GFS, ICON, GSM, а также по двум мезомасштабным моделям: COSMO-RU (с шагом 7 и 13 км) и WRF [3]. Результаты оценки 12-часовых сумм осадков показывают, что прогноз слабых, умеренных и сильных осадков (≥ 6 мм/12 ч – снег или ≥ 15 мм/12 ч – дождь и смешанные осадки) можно считать удовлетворительным для летнего периода и хорошими для зимнего. При этом качество прогнозов зимних осадков выше, чем летних. Что касается прогноза очень сильных осадков (≥ 20 мм/12 ч – снег или ≥ 50 мм/12 ч – дождь и смешанные осадки), то ни одна из моделей не смогла их спрогнозировать. Поэтому повышение точности прогноза сильных и очень сильных осадков является одной из наиболее значимых проблем в краткосрочном прогнозировании погоды.

Результаты численного моделирования используются не только для непосредственного прогноза осадков, но и расчета характеристик осадков другими методами. Так, результаты моделирования глобальных и мезомасштабных моделей используются для расчета индексов неустойчивости [5; 10; 22]. Индексы неустойчивости могут применяться для прогноза конвективной облачности, сильных осадков и других конвективных явлений [4; 5; 9; 10; 23–25]. Такие индексы описывают процессы конвекции не напрямую, а косвенно. Их сущность состоит в том, что на основе данных о скорости и направлении ветра, влажности и температуры воздуха на определенных высотах или изобарических поверхностях рассчитываются характеристики, по которым определяется вероятность возникновения того или иного конвективного явления. Для каждого индекса устанавливаются критерии, превышение которых указывает на высокую вероятность возникновения конвективного явления.

Цель данного исследования – определить возможности использования современных подходов к прогнозу летних осадков разной интенсивности, таких как гидродинамическое моделирование с помощью модели WRF и использование индексов неустойчивости атмосферы, рассчитанных на основе выходных данных счета модели применительно к территории Урала.

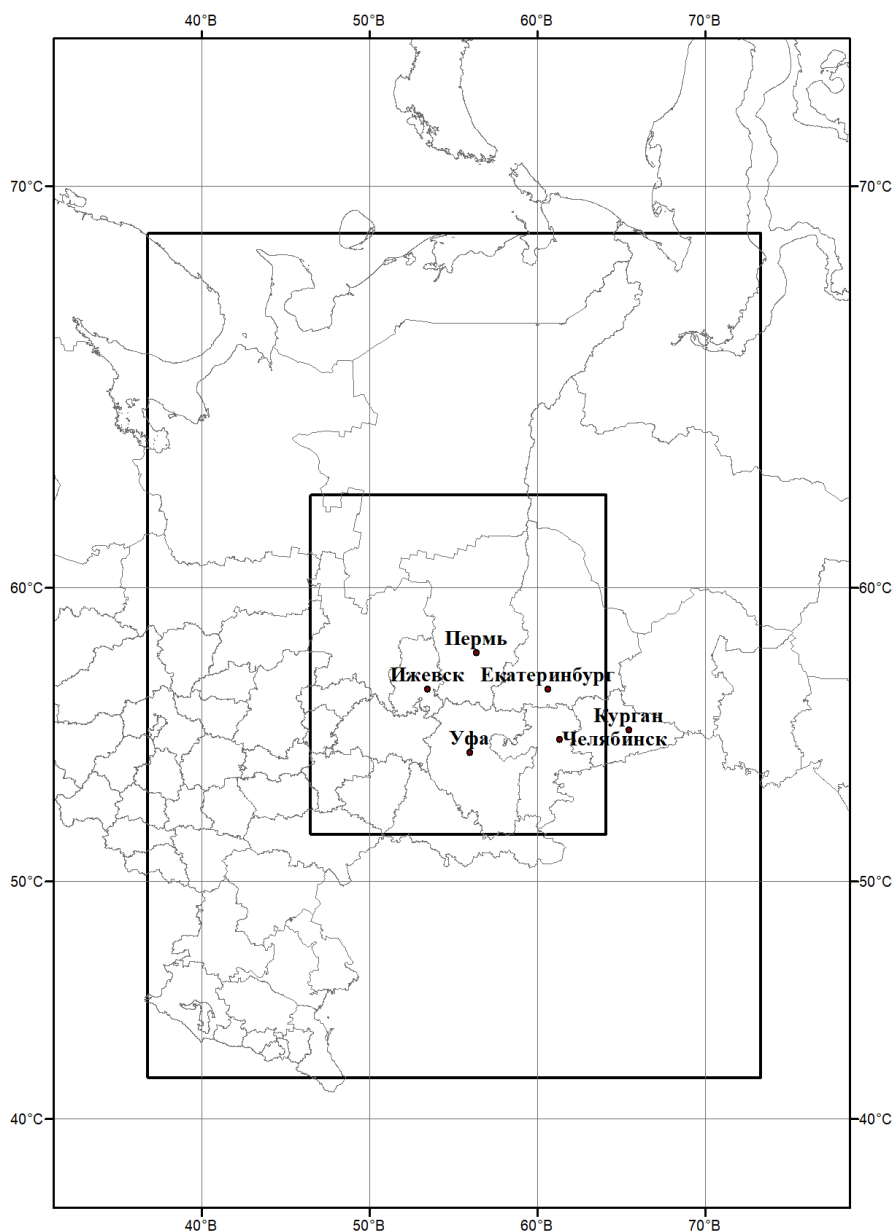
Методика исследования и исходные данные

В настоящей работе для прогноза осадков применялась модель WRF-ARW. В качестве начальных данных и граничных условий были использованы результаты расчетов глобальной модели GFS с шагом сетки $0,25^\circ$ и шагом по времени 1 ч. Запуск счета модели WRF начинался от 0 ч всемирного скоординированного времени (BCB) текущих суток. Первые 12 ч расчетов прогностические данные модели GFS заменялись данными объективного анализа, т.е. проводилась процедура предварительного усвоения данных, которая фактически является анализом наблюдаемых полей метеорологических величин. Эта процедура позволяет избежать ошибок в расчете, которые приводят к ухудшению

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

качества воспроизведения метеорологических величин в течение нескольких часов от начала прогноза, а также сформировать более точные начальные условия для прогноза [14]. Таким образом, прогноз начинает считаться от срока 12 ч ВСВ, а максимальная заблаговременность прогноза составляет 39 ч.

Запуск модели проводился на двух сетках: внешней и вложенной. Внешняя сетка имеет шаг равный 9 км с количеством узлов 333×333 , а вложенная – 3 км с количеством узлов 400×400 . Временной шаг вывода данных составил 1 ч, с выдачей полей метеовеличин на двух сетках. Схематичное расположение сеток представлено на рисунке.



Расположение внешней и вложенной сеток расчета относительно области исследования

Fig. 1. Location of the external and nested calculation grid relative to the study area

При моделировании на обеих сетках использовались следующие параметризации физических процессов:

- микрофизика – схема Томпсона;

Метеорология

Калинин Н.А., Сивков Б.А.

- длинноволновая и коротковолновая радиации – схема GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory);
- приземный слой – схема Монины-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия;
- подстилающая поверхность и почва – модель NOAH;
- пограничный слой – схема Меллора-Ямады-Янича;
- конвекция – прямое моделирование (без параметризации).

Визуализация выходных данных модели WRF осуществлялась с использованием программы OpenGrADS, с помощью которой поля метеорологических величин и параметров сохранялись в растровом формате GeoTIFF, который позволяет проводить пространственный анализ в таких геоинформационных системах, как ArcGIS и QGIS.

Для выполнения работы были использованы выходные поля накопленных сумм осадков за 12 ч. Данные о сумме осадков извлекались в сроки 3 ч ВСВ (ночные осадки) и 15 ч ВСВ (дневные осадки). Заблаговременность прогноза выпадения ночных и дневных осадков составила 15 и 27 ч соответственно.

Для оценки возможности использования индексов неустойчивости для прогноза осадков летнего периода на территории Урала в рамках данной работы были взяты три наиболее популярных индекса, основанные на методе частицы: CAPE, CIN, LI. Величина индексов была рассчитана по выходным данным модели WRF по сеткам с шагом 3 и 9 км и на сроки 3 и 15 ч ВСВ.

Верификация прогнозов проводилась на основе данных измерений полусуточных сумм осадков в июле 2020 г. на метеостанциях, расположенных на территориях Пермского края, Свердловской, Челябинской, Курганской областей, республик Удмуртия и Башкортостан (всего 127 метеостанций). В этот месяц наблюдались дни как с выпадением осадков, так и с их отсутствием. Кроме того, отмечались осадки в категории опасного и неблагоприятного явления (14 случаев с ОЯ и 20 случаев с НГЯ).

Качество прогноза осадков оценивалось согласно РД 52.27.284-91 [16], в соответствии с которым оценка проводится по факту наличия (отсутствия) и количеству осадков с использованием показателей успешности. Для вычисления показателей успешности прогноза составляется таблица сопряженности (табл. 1), где n_{11} – число случаев, когда осадки и прогнозировались, и наблюдались; n_{12} – число случаев, когда осадки прогнозировались, но не наблюдались; n_{10} – число случаев, когда прогнозировались осадки; n_{21} – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие осадков, а они наблюдались; n_{22} – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие осадков, и они не наблюдались; n_{20} – число случаев, когда прогнозировалось отсутствие осадков; n_{01} – число случаев с осадками; n_{02} – число случаев без осадков; n_{00} – общее количество прогнозов.

Таблица 1

Таблица сопряженности для прогноза осадков
Conjugacy table for precipitation forecast

Прогноз	Наблюдалось		Сумма
	осадки	без осадков	
Осадки	n_{11}	n_{12}	n_{10}
Без осадков	n_{21}	n_{22}	n_{20}
Сумма	n_{01}	n_{02}	n_{00}

По данным таблицы сопряженности были рассчитаны следующие показатели успешности прогноза факта наличия (отсутствия) осадков: общая оправдываемость прогноза U , оправдываемость прогноза наличия осадков U_o (отсутствия осадков $U_{\bar{o}}$), предупрежденность прогноза наличия P_o (отсутствия $P_{\bar{o}}$) осадков, критерий Пирса-Обухова

Метеорология

Калинин Н.А., Сивков Б.А.

T (при идеальном прогнозе $T = 1$, при абсолютно некорректном прогнозе $T = -1$), сумма $U_o + P_o$ и $U_{\delta o} + P_{\delta o}$ (значение более 130% свидетельствует об удовлетворительном качестве прогноза), критерий надежности Н.А. Багрова H (чем выше значения H , тем лучше качество прогноза) [16], показатель ложных тревог FAR (лучший результат соответствует $FAR = 0$, а наихудший отмечается при $FAR = 1$) [15], показатель GSS (при $GSS = 0$ результат моделирования осадков считается случайным, идеальным прогноз осадков считается, когда $GSS = 1$) [15].

Для оценки точности прогноза количества осадков рассчитывались средняя абсолютная ошибка прогноза δQ и средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза δ [16].

Для оценки успешности прогноза осадков с помощью индексов применялась методика, представленная в [17], только вместо прогнозируемого количества осадков были использованы прогнозируемые значения индекса. Также градации 0,01–0,2 и 0,3–2 мм были объединены в одну, так как такую разницу уловить с помощью индексов невозможно. В табл. 2 представлена оправдываемость прогноза количества осадков в пункте прогноза.

Общая оправдываемость P по всей территории рассчитывается по формуле

$$P = \frac{N_{100} \cdot 100 + N_{50} \cdot 50 + N_0 \cdot 0}{N},$$

где N_{100} , N_{50} , N_0 – количество метеостанций, в которых прогноз оправдался на 100, 50 и 0% соответственно; N – общее количество метеостанций.

Таблица 2

Оправдываемость прогноза количества осадков в пункте прогноза (%)
Accuracy of the of precipitation forecast at the forecast point (%)

Прогноз	Фактическое количество осадков, мм				
	Без осадков	0,01–2	3–14	15–49	≥50
CAPE, Дж/кг					
<100	100	50	0	0	0
101–1000	50	100	50	0	0
1001–2500	0	50	100	50	0
2501–3500	0	0	50	100	50
>3500	0	0	0	50	100
CIN, Дж/кг					
< –200	100	50	0	0	0
–101...–200	50	100	50	0	0
–51...–100	0	50	100	50	0
–16...–50	0	0	50	100	50
–15...0	0	0	0	50	100
LI, °C					
>3	100	50	0	0	0
0,1...3	50	100	50	0	0
–3...0	0	50	100	50	0
–3,1...–6	0	0	50	100	50
< –6	0	0	0	50	100

Наличие или отсутствие осадков, прогностические значения сумм осадков на метеостанции, а также значения индексов неустойчивости определялись тремя способами: 1) в точке расположения метеостанции (по ближайшему к ней узлу сетки); 2) по максимальному значению узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 км; 3) по среднему значению, которое рассчитывалось по данным всех узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 км.

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

Дополнительно для определения факта выпадения осадков или их отсутствия был реализован еще один способ. Выпадение осадков на метеостанции прогнозировалось, если количество узлов сетки со значением более 0,1 мм/12 ч превышало 50% от всех узлов, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 км. Если таких узлов было менее 50%, то принималось, что на метеостанции прогнозируется отсутствие осадков. Далее этот метод условно будет называться «по соотношению узлов сетки».

Результаты и их обсуждение

В табл. 3 и 4 представлены таблицы сопряженности на сроки 3 и 15 ч ВСВ для сетки с шагом 3 и 9 км.

Таблица 3

Таблица сопряженности для прогнозов на срок 3/15 ч ВСВ на сетке с шагом 3 км
Conjugacy tables for 3/15 h UTC forecasts on a grid with a step of 3 km

Способ измерения	Прогноз	Наблюдалось		Сумма
		осадки	без осадков	
В точке расположения метеостанции	Осадки	429/678	310/591	739/1269
	Без осадков	206/111	1767/1216	1973/1327
	Сумма	635/789	2077/1807	2712/2596
Максимальное значение в радиусе 50 км	Осадки	621/778	1332/1474	1953/2252
	Без осадков	9/6	726/314	735/320
	Сумма	630/784	2058/1788	2688/2572
Среднее значение в радиусе 50 км	Осадки	579/750	707/1131	1286/1881
	Без осадков	51/35	1351/657	1402/691
	Сумма	630/784	2058/1788	2688/2572
По соотношению узлов сетки	Осадки	427/702	251/592	678/1294
	Без осадков	203/82	1807/1196	2010/1278
	Сумма	630/784	2058/1788	2688/2572

Таблица 4

Таблица сопряженности для прогнозов на срок 3/15 ч ВСВ на сетке с шагом 9 км
Conjugacy tables for 3/15 h UTC forecasts on a grid with a step of 9 km

Способ измерения	Прогноз	Наблюдалось		Сумма
		осадки	без осадков	
В точке расположения метеостанции	Осадки	499/704	522/610	1021/1314
	Без осадков	183/131	1844/1473	2027/1604
	Сумма	682/835	2366/2083	3048/2918
Максимальное значение в радиусе 50 км	Осадки	659/818	1463/1377	2122/2195
	Без осадков	23/17	903/706	926/723
	Сумма	682/835	2366/2083	3048/2918
Среднее значение в радиусе 50 км	Осадки	618/798	878/975	1496/1773
	Без осадков	64/37	1488/1108	1552/1145
	Сумма	682/835	2366/2083	3048/2918
По соотношению узлов сетки	Осадки	466/697	330/468	796/1165
	Без осадков	216/138	2036/1615	2252/1753
	Сумма	682/835	2366/2083	3048/2918

Следует отметить, что общее количество прогнозов, составленное по сетке с шагом 9 км, превышает количество прогнозов по сетке с шагом 3 км ввиду того, что расчетная область во втором случае была меньше, и не все метеостанции вошли в нее. Расчетная область более крупной сетки имела большие размеры и все заявленные метеостанции в нее были включены. Суммарное число случаев для разных способов измерения также немного

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

отличается. Это связано с тем, что некоторые метеостанции расположены на границе расчётной области и для них правильно определить количество осадков возможно только в точке расположения метеостанции по ближайшему к ней узлу сетки. Поэтому количество осадков и факт их наличия или отсутствия по трем другим методам не определялись и такие метеостанции не учитывались.

По данным таблиц сопряженности были рассчитаны показатели успешности модельных прогнозов осадков с разной заблаговременностью, которые были получены на сетках с шагом 3 и 9 км. Результаты расчета представлены в табл. 5.

Рассмотрим показатели успешности более детально. В зависимости от заблаговременности прогноза и способа расчета количества осадков общая оправдываемость U изменялась от 50 до 83%. При этом в срок 3 ч ВСВ общая оправдываемость прогнозов оказывается выше, чем в срок 15 ч ВСВ. Наиболее высокая общая оправдываемость прогнозов в оба срока отмечается для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции.

Таблица 5

Показатели успешности модельных прогнозов разной заблаговременности, полученные на сетке с шагом 3/9 км
Success rates of model forecasts with different lead times obtained on a grid with a step of 3/9 km

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 км		По соотношению узлов сетки	
	3	15	3	15	3	15	3	15
U , %	81/77	73/75	50/51	42/52	72/69	55/65	83/82	74/79
U_o , %	58/49	53/54	32/31	35/37	45/41	40/45	63/59	54/60
$U_{\text{до}}$, %	90/91	92/92	99/98	98/98	96/96	95/97	90/90	94/92
P_o , %	68/73	86/84	99/97	99/98	92/91	96/96	68/68	90/83
$P_{\text{до}}$, %	85/78	67/71	35/38	18/34	66/63	37/53	88/86	67/78
T	0,53/0,51	0,53/0,55	0,34/0,35	0,17/0,32	0,58/0,54	0,32/0,49	0,56/0,54	0,56/0,61
H	0,50/0,43	0,45/0,47	0,20/0,20	0,11/0,21	0,42/0,38	0,23/0,36	0,54/0,51	0,48/0,55
FAR	0,42/0,51	0,47/0,47	0,68/0,69	0,65/0,63	0,55/0,59	0,60/0,55	0,37/0,41	0,46/0,40
GSS	0,33/0,28	0,29/0,31	0,11/0,11	0,06/0,12	0,27/0,23	0,13/0,22	0,37/0,35	0,31/0,38
U_o+P_o , %	126/122	139/138	130/128	134/135	137/132	136/141	131/127	144/143
$U_{\text{до}}+P_{\text{до}}$, %	175/169	159/163	134/136	116/132	162/159	132/150	178/176	160/170
δ , мм	0,2/0,5	0,7/0,7	7,5/6,2	13,7/9,7	0,3/0,5	0,7/0,7	–	–
δQ , мм	1,4/1,6	2,5/2,4	7,7/6,5	14,0/10,1	1,3/1,4	2,3/2,2	–	–

При рассмотрении оправдываемости наличия U_o и отсутствия $U_{\text{до}}$ осадков было выявлено, что модель WRF лучше прогнозирует отсутствие осадков, чем их наличие. Оправдываемость отсутствия осадков изменялась от 90 до 99%. Наибольшие значения $U_{\text{до}}$ отмечаются для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 км, а наименьшие – для способа измерения в точке расположения метеостанции. В целом оправдываемость отсутствия осадков в срок 15 ч ВСВ оказывается выше, чем для срока 3 ч ВСВ.

Оправдываемость наличия осадков U_o изменяется от 32 до 63%. Наиболее высокие значения наблюдаются для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции. Наименьшие значения U_o характерны для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 км. В целом значения U_o для прогнозов на срок 3 ч ВСВ выше, чем на срок 15 ч ВСВ.

Предупрежденность выпадения осадков P_o изменялась от 68 до 99%. Максимальные значения P_o отмечаются для способа измерения максимального значения в радиусе 50 км и существенно превышают значения P_o для других методов. Такое распределение связано с тем,

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

что когда факт выпадения осадков в пункте прогноза устанавливается по максимальному значению в каком-то радиусе от этого пункта, то количество случаев, когда прогнозируется выпадение осадков, может значительно превысить количество случаев, когда они отсутствовали. В такой ситуации говорят о ложных тревогах. Если посмотреть на показатель FAR , который показывает долю ложных тревог, то можно заметить, что для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 км он имеет наибольшее значение среди всех других способов: 0,68 для срока 3 ч ВСВ и 0,65 для срока 15 ч ВСВ. Предупрежденность выпадения осадков на срок 15 ч ВСВ оказалась выше, чем на срок 3 ч ВСВ.

Предупрежденность отсутствия осадков P_{oo} имеет зеркальное распределение относительно предупрежденности наличия осадков. Наибольшие значения наблюдаются для способов по соотношению узлов и в точке расположения метеостанции. При этом предупрежденность осадков для этого и других способов значительно выше в срок 3 ч ВСВ, чем в 15 ч ВСВ.

Величина критерия Пирса-Обухова T изменялась от 0,17 до 0,58, что свидетельствует о том, что для всех способов определения суммы осадков предупрежденность выпадения осадков (P_o) превышает отношение ошибочных прогнозов наличия осадков к фактическому числу дней без осадков. Наиболее высокие значения критерия T характерны для способов по соотношению узлов сетки и в точке расположения метеостанции и равняются более 0,5 в оба срока измерения, что свидетельствует о большой практической значимости данных способов. Для двух других способов величина критерия Пирса-Обухова в срок 15 ч ВСВ в два раза меньше, чем в срок 3 ч ВСВ, т.е. с ростом заблаговременности прогноз по этим методам становится близок к случайному.

Критерий надежности Н.А. Багрова (H) в зависимости от способа измерения и заблаговременности изменялся от 0,11 до 0,54. В общем случае, чем выше значения H , тем лучше качество прогноза. Однако согласно [16], если значение критерия Н.А. Багрова ниже 0,33, то такой прогноз считается ненадежным. Чем ниже значение H , тем ближе оправдываемость метода прогноза к оправдываемости случайного прогноза. Среди примененных четырех способов определения факта выпадения осадков или их отсутствия наибольшую надёжность имеют способы, показывающие соотношение узлов сетки и точку расположения метеостанции. Величина H для этих способов превышает 0,5 в срок 3 ч ВСВ и 0,45 в срок 15 ч ВСВ.

О случайности прогноза можно также судить по показателю GSS , значения которого изменялись от 0,06 до 0,37. Наименьшие значения показателя наблюдались для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 км, что свидетельствует о том, что прогноз факта наличия или отсутствия осадков находится для этого способа практически на уровне случайного. Случайность прогноза в этом случае заключается в том, что если для пункта на протяжении какого-то времени давать только факт наличия осадков, то успешность такого прогноза будет зависеть от повторяемости выпадения осадков, а не от качества прогноза. В связи с этим такой прогноз будет иметь случайный характер, а величина оправдываемости такого прогноза не объективной.

Наибольшие значения показателя GSS наблюдаются для способов, определяющих соотношение узлов сетки и точки расположения метеостанции, что свидетельствует о большей практической значимости данных прогнозов.

Также важным показателем при оценке разных методов прогноза является показатель ложных тревог FAR . С помощью данного показателя можно оценить ценность того или иного метода прогноза. Так, например, если два метода имеют схожие показатели предупрежденности явления, то большую практическую значимость будет иметь тот, у которого показатель ложных тревог меньше. Однако надо иметь в виду, что если метод показывает низкую оправдываемость прогноза, то низкие значения показателя ложных

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

тревог не могут служить основанием для того, чтобы отдать предпочтение этому методу. Поэтому необходимо рассматривать все показатели комплексно и соблюдать между ними некоторый баланс.

В данном исследовании показатель *FAR* изменялся от 0,68 до 0,37. Наименьшие значения характерны для способов, указывающих соотношение узлов сетки и точку расположения метеостанции. В срок 3 ч ВСВ прогнозы дают меньше ложных тревог, чем в срок 15 ч ВСВ.

Если рассматривать сумму показателей U_o+P_o и $U_{\sigma o}+P_{\sigma o}$, то в целом они оказываются близки или больше 130% для всех способов, что свидетельствует об удовлетворительном прогнозе. Можно отметить, что суммарные показатели отсутствия выпадения осадков превосходят сумму показателей наличия осадков. И если значения суммы U_o+P_o между методами незначительно различаются, то сумма $U_{\sigma o}+P_{\sigma o}$ имеет более существенные различия. Суммарный показатель отсутствия выпадения осадков более высокий для способов, показывающих соотношение узлов сетки и точку расположения метеостанции. Наибольшую роль в таком распределении сыграли меньшее количество ложных тревог у данных способов и, соответственно, практическая значимость данных способов в прогнозе выше.

Распределение как средней абсолютной ошибки δQ , так и систематической ошибки δ по способам определения количества осадков одинаково. Наибольшие значения ошибок характерны для способа измерения максимального значения осадков в радиусе 50 км. Положительные значения ошибок свидетельствуют о том, что все способы в среднем завышают прогностическое количество выпавших осадков, причем в срок 15 ч ВСВ, т.е. с ростом заблаговременности это завышение увеличивается.

Распределение значений показателей успешности по способам определения осадков при использовании для прогноза шага сетки 9 км имеет такой же характер, как и при использовании сетки с шагом 3 км. Однако их величина немного различается.

При увеличении шага сетки качество прогноза на срок 3 ч ВСВ немного снижается, а на срок 15 ч ВСВ, наоборот, увеличивается. Величина изменения в целом незначительна и составляет в среднем 5–6%. Таким образом, качество прогноза осадков разной интенсивности с применением модели WRF можно считать удовлетворительным. Однако модель WRF имеет тенденцию к завышению ожидаемого количества осадков.

В целом прослеживается тенденция, указывающая на то, что чем большее количество осадков выпало, тем абсолютное значение ошибки больше. Эту зависимость наглядно отображают коэффициенты корреляции (табл. 6).

Таблица 6

Значения коэффициентов корреляции между количеством фактически выпавших осадков и абсолютной ошибкой для прогнозов с разной заблаговременностью
The coefficients of correlation between the actual precipitation and the absolute error for forecasts with different lead times

Способ измерения	Шаг сетки 3 км		Шаг сетки 9 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
В точке расположения метеостанции	0,63	0,64	0,56	0,57
Максимальное значение в радиусе 50 км	0,28	0,08	0,22	0,15
Среднее значение в радиусе 50 км	0,67	0,73	0,60	0,69

Как следует из табл. 6, наиболее тесная связь прослеживается для способов определения количества осадков: в точке расположения метеостанции и среднее значение в радиусе 50 км. Причем на сетке с шагом 3 км значения коэффициентов корреляции выше, чем для сетки с шагом 9 км. Также следует отметить, что чем больше заблаговременность прогноза, тем сильнее становится эта зависимость.

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

Фактически из полученных значений коэффициентов корреляции можно сделать вывод о том, что чем большее количество осадков модель прогнозирует, тем выше вероятность того, что это значение будет завышено (фактически осадков выпадет меньше). И, наоборот, чем меньшее количество осадков прогнозирует модель, тем вероятнее, что ошибка будет минимальной.

Отдельно была оценена успешность прогнозов сильных осадков, сумма которых превышала 30 мм за 12 ч. Такой критерий количества осадков был выбран ввиду того, что для метеостанций, находящихся в ливнеопасных районах, это значение является критерием опасного явления (очень сильный дождь). Значения полученных показателей успешности представлены в табл. 7, из которой следует, что общая оправдываемость U прогнозов сильных осадков близка к 100% независимо от заблаговременности прогноза, шага расчетной сетки и способа определения количества осадков.

Таблица 7

Показатели успешности модельных прогнозов сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) разной заблаговременности, полученные на сетке с шагом 3/9 км
Success rates of model forecasts of heavy precipitation (≥ 30 mm/12 h) with different lead times obtained on a grid with a step of 3/9 km

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
U , %	99/99	99/99	92/93	83/88	100/99	99/99
U_o , %	0/0	0/0	2/2	2/1	0/0	0/0
$U_{\bar{o}}$, %	100/100	99/99	100/100	100/100	100/100	99/99
P_o , %	0/0	0/0	57/50	62/25	0/0	0/0
$P_{\bar{o}}$, %	100/99	99/99	92/93	84/88	100/100	100/100
T	0,00/-0,01	-0,01/-0,01	0,49/0,43	0,45/0,13	0,0/0,0	0,0/0,0
H	0,0/0,0	-0,01/-0,01	0,03/0,03	0,03/0,01	0,00	0,0/0,0
FAR	1,0/1,0	1,0/1,0	0,98/0,98	0,98/0,99	1,0/1,0	1,0/1,0
GSS	0,0/0,0	0,0/0,0	0,02/0,02	0,01/0,01	0,0/0,0	0,0/0,0
$U_o + P_o$, %	0/0	0/0	59/52	63/26	0/0	0/0
$U_{\bar{o}} + P_{\bar{o}}$, %	199/199	199/199	192/193	183/188	200/199	199/199

При более детальном рассмотрении можно увидеть, что такие высокие значения U связаны с высокими значениями оправдываемости отсутствия сильных осадков $U_{\bar{o}}$, при этом оправдываемость наличия сильных осадков равна нулю. Это свидетельствует о том, что все случаи, когда фактически наблюдалось выпадение сильных осадков, моделью WRF не были спрогнозированы. По этой же причине наблюдаются высокие значения предупреденности отсутствия сильных осадков $P_{\bar{o}}$ и низкие значения предупреденности выпадения осадков P_o . Исключением являются значения P_o для случая, когда количество осадков определяется по максимальному значению в радиусе 50 км от пункта прогноза. Для этого способа предупреденность выпадения осадков достигает 60% при расчете на сетке с шагом 3 км. Также отмечаются самые высокие значения критерия Пирса-Обухова T , которые достигают 0,5. Этот факт свидетельствует о том, что для прогнозов сильных осадков характерно наличие пространственной ошибки. Это подтверждает и высокое значение ложных тревог, т.е. модель WRF способна прогнозировать сильные осадки, но при их локализации в пространстве и времени наблюдаются существенные ошибки.

Исследование показало, что в целом использование расчетной сетки с шагом 3 км не дает значительного улучшения качества прогноза осадков по сравнению с расчетной

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

сеткой с шагом 9 км, но при этом время счета модели при использовании более мелкой сетки увеличивается в несколько раз. Поэтому применение расчетной сетки с шагом 3 км в данном случае нецелесообразно.

Рассмотрим результаты прогноза осадков с помощью индексов неустойчивости.

В табл. 8 представлены результаты расчета общей оправдываемости прогнозов осадков с помощью индексов неустойчивости.

Таблица 8

Общая оправдываемость P (%) прогноза количества осадков в пункте прогноза для сетки с шагом 3/9 км
The general accuracy P (%) of the precipitation forecast at the forecast point for the grid with a step of 3/9 km

Способ измерения	Срок прогноза, ВСВ, ч	CAPE	CIN	LI
В точке расположения метеостанции	3	41,7/40,9	1,8/1,4	22,0/21,6
	15	41,2/40,8	1,4/1,2	19,2/20,0
Максимальное значение в радиусе 50 км	3	29,6/32,1	0,9/0,9	15,2/16,1
	15	28,9/32,1	1,2/1,1	10,9/13,3
Среднее значение в радиусе 50 км	3	40,8/40,4	1,6/1,3	22,2/21,9
	15	40,5/40,3	1,3/1,2	19,1/19,8

Как следует из табл. 8, оправдываемость прогноза осадков с помощью представленных индексов неустойчивости оказалась очень низкой независимо от заблаговременности прогноза, шага расчетной сетки и способа определения прогнозируемого количества осадков в пункте. Наименьшую оправдываемость имеет индекс CIN. Интерпретируя значения оправдываемости, можно сделать вывод о том, что фактически индекс CIN служит лишь индикатором наличия или отсутствия в атмосфере задерживающих слоев. И если значения CIN указывают на отсутствие таких слоев, то можно лишь говорить о том, что возможны развитие конвекции и формирование осадков, однако их количество спрогнозировать будет затруднительно.

Также была проведена оценка прогноза сильных осадков с помощью индексов неустойчивости CAPE и LI (табл. 9 и 10) согласно [16]. Прогноз по индексу CIN ввиду низкой оправдываемости не рассматривался.

Для оценки прогнозов в рамках работы было принято, что при значениях CAPE >2500 Дж/кг и при значениях индекса LI < -3°C ожидается выпадение осадков ≥ 30 мм/12 ч (далее – сильные осадки).

Таблица 9

Показатели успешности прогноза сильных осадков с помощью индекса CAPE
разной заблаговременности для сетки с шагом 3/9 км
Success rates for forecasting heavy precipitation using the CAPE index
with different lead times for a grid with a step of 3/9 km

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
U , %	90/88	89/88	73/77	71/78	89/88	89/88
U_o , %	0/0	0/0	0/0	1/1	0/0	0/1
$U_{\bar{o}}$, %	100/100	99/99	100/100	99/100	100/100	99/99
P_o , %	0/0	7/6	29/14	33/31	0/14	7/13
$P_{\bar{o}}$, %	90/88	89/88	74/77	72/78	90/88	89/88
T	-0,10/-0,12	-0,04/-0,06	0,02/-0,09	0,05/0,09	-0,10/0,03	-0,04/0,01
H	-0,01/0,00	0,00/-0,01	0,0/0,0	0,0/0,0	-0,01/0,00	0,0/0,0
FAR	1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0	0,99/0,99	1,0/1,0	1,00/0,99
GSS	0,00	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0
$U_o + P_o$, %	0/0	7/7	29/14	32	0/15	8/13
$U_{\bar{o}} + P_{\bar{o}}$, %	190/188	189/187	173/177	171/178	189/188	189/188

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

Как следует из табл. 9, большая общая оправдываемость U наблюдается для прогнозов сильных осадков с помощью индекса CAPE и в среднем превышает 85%. Оправдываемость по индексу LI не превышает 70%. В обоих случаях лучше всего прогноз оправдывается, если определять значения индекса в точке расположения метеостанции или рассчитывать среднее значение. С увеличением заблаговременности прогноза значения оправдываемости или остаются такие же, или уменьшаются. Причем при изменении шага расчетной сетки значения меняются незначительно – в среднем на 2–3%.

Такую сравнительно высокую общую оправдываемость получили благодаря оправдываемости отсутствия выпадения сильных осадков $U_{\bar{o}}$, которая для обоих индексов достигает 100% независимо от заблаговременности прогноза, шага расчетной сетки и способа определения значений индексов. Вместе с тем оправдываемость наличия сильных осадков близка к нулю. Предупрежденность выпадения сильных осадков Π_o или их отсутствия $\Pi_{\bar{o}}$ для индекса CAPE имеет аналогичное распределение – высокие значения $\Pi_{\bar{o}}$ и низкие Π_o . Для индекса LI наблюдается немного другая ситуация. Предупрежденность отсутствия сильных осадков ниже, чем для индекса CAPE, однако предупрежденность выпадения сильных осадков значительно выше. Причем для способа определения максимального значения она имеет большую величину, чем для других способов и достигает 80%. Следует отметить, что величина Π_o незначительно растет с увеличением заблаговременности, а $\Pi_{\bar{o}}$ уменьшается.

Таблица 10

Показатели успешности прогноза сильных осадков с помощью индекса LI
разной заблаговременности для сетки с шагом 3/9 км
Success rates of forecasting heavy precipitation using the LI index
with different lead times for a grid with a step of 3/9 km

Показатель успешности	В точке расположения метеостанции		Максимальное значение в радиусе 50 км		Среднее значение в радиусе 50 км	
	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч	3 ч	15 ч
U , %	66/61	58/53	47/44	39/37	67/62	57/54
U_o , %	0/0	1/1	0/0	1/1	0/0	1/1
$U_{\bar{o}}$, %	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100	100/100
Π_o , %	14/29	69/69	63/63	81/81	43/43	56/63
$\Pi_{\bar{o}}$, %	66/61	58/69	47/44	38/37	67/62	57/54
T	-0,19/-0,10	0,27/0,22	0,10/0,07	0,20/0,18	0,10/0,05	0,13/0,16
H	0,0/0,0	0,01/0,01	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0
FAR	1,0/1,0	0,99/0,99	1,0/1,0	0,99/0,99	1,0/1,0	0,99/0,99
GSS	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0
$U_o + \Pi_o$, %	14/29	70/70	63/63	82/82	43/43	57/63
$U_{\bar{o}} + \Pi_{\bar{o}}$, %	166/161	157/153	147/144	136	167/162	153

Значения показателей успешности T , H , FAR и GSS свидетельствуют о том, что прогноз сильных осадков с помощью обоих индексов неустойчивости является неудовлетворительным.

Суммарные показатели $U_o + \Pi_o$ и $U_{\bar{o}} + \Pi_{\bar{o}}$, показывают, что при прогнозе сильных осадков более значимыми являются способы определения индексов в точке расположения метеостанции и расчет среднего значения по узлам, попадающим в буферную зону метеостанции радиусом 50 км.

Таким образом, индексы неустойчивости, основанные на методе частицы, показывают низкие показатели успешности при прогнозе количества осадков и не могут быть использованы в качестве основного метода для прогноза выпадения сильных осадков ввиду большого количества ложных тревог. Несмотря на это, исследование показало, что при значениях индекса CAPE < 2500 Дж/кг и при значениях индекса LI > -3°C вероятность

Метеорология
Калинин Н.А., Сивков Б.А.

выпадения сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) значительно уменьшается. Причем для индекса LI отмечается более высокая надежность. Поэтому рассмотренные индексы можно использовать при составлении прогнозов выпадения сильных осадков как дополнительный метод к основному.

Проведенная оценка успешности модельных прогнозов позволяет сформулировать некоторые рекомендации по использованию модели WRF при прогнозе осадков разной интенсивности на практике. Выпадение или отсутствие осадков целесообразно определять с помощью метода путем соотношения узлов сетки со значениями более и менее 0,1 мм/12 ч, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 км.

Для определения количества осадков можно использовать не только метод определения в точке расположения пункта прогноза, но и метод расчета среднего значения по данным всех узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 км, которые показывают примерно одинаковую успешность. При этом, если ожидается выпадение осадков, но пункт прогноза не попадает в зону осадков, то для определения количества осадков применяется метод среднего значения.

При прогнозе количества осадков также следует обращать внимание на зоны выпадения сильных осадков, расположенные в некоторой удаленности от пункта прогноза. В таком случае индексы неустойчивости CAPE и LI позволят сделать вывод о возможности выпадения сильных осадков в этих пунктах.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Качество прогноза осадков разной интенсивности моделью WRF можно считать удовлетворительным. Более точные прогнозы наличия или отсутствия осадков наблюдаются, если использовать метод путем соотношения узлов сетки со значениями более и менее 0,1 мм/12 ч, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 км. Для прогноза количества осадков можно использовать не только метод определения в точке расположения пункта прогноза, но и метод расчета среднего значения по данным всех узлов сетки, попадающих в буферную зону метеостанции радиусом 50 км. Прогноз сильных осадков следует считать как неудовлетворительный. Для него характерны значительные пространственные и временные ошибки.

2. Анализ ошибок прогноза количества осадков показал, что модель WRF имеет тенденцию к завышению ожидаемого количества осадков. Причем величина ошибки тем больше, чем большее количество осадков прогнозируется.

3. В среднем качество прогнозов с увеличением заблаговременности снижается при расчете на сетке с шагом 3 км. При увеличении шага расчетной сетки до 9 км качество прогнозов с меньшей заблаговременностью ухудшается, а с увеличением заблаговременности, наоборот, увеличивается. Исследование показало, что в целом использование расчетной сетки с шагом 3 км не дает значительного улучшения качества прогноза осадков по сравнению с расчетной сеткой с шагом 9 км, но при этом время счета модели при использовании более мелкой сетки увеличивается в несколько раз. Поэтому применение расчетной сетки с шагом 3 км в данном случае нецелесообразно.

4. Прогнозы осадков с применением индексов неустойчивости, основанных на методе частицы, дают низкие показатели успешности, поэтому они не могут быть использованы в качестве основного метода для прогноза. Однако рассмотренные индексы неустойчивости могут учитываться в качестве дополнительных характеристик при оценке возможности выпадения сильных осадков в пункте прогноза, а именно, при значениях индекса CAPE < 2500 Дж/кг и при значениях индекса LI $> -3^\circ\text{C}$ вероятность выпадения сильных осадков (≥ 30 мм/12 ч) значительно уменьшается.

Метеорология

Калинин Н.А., Сивков Б.А.

Список источников

1. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4(374). С. 127–143.
2. Алексеева А.А., Лосев В.М. Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометцентра России. 2014. № 351. С. 43–63.
3. Багров А.Н. Результаты оперативных испытаний мезомасштабной модели COSMO-RU13 // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2020. № 47. С. 3–21.
4. Быков А.В., Ветров А.Л., Калинин Н.А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 361. С. 101–119.
5. Быков А.В., Шихов А.Н. Прогноз мезомасштабных конвективных систем с применением глобальных и мезомасштабных гидродинамических моделей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 213–224.
6. Васильев А.А., Вильфанд Р.М., Голубев А.Д. Совместное использование численных мезомасштабных и концептуальных моделей при оперативном прогнозе опасных явлений погоды // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 359. С. 48–57.
7. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18. doi: 10.3103/S1068373911010018.
8. Вильфанд Р.М., Ривин Г.С., Розинкина И.А. Мезомасштабный краткосрочный прогноз погоды в Гидрометцентре России на примере COSMO-RU // Метеорология и гидрология. 2010. № 1. С. 5–17.
9. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектро радиометра MODIS в дни с грозами, над территории Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.
10. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–37.
11. Жупанов В.Д., Лукьянов В.И., Васильев Е.В., Дмитриева Т.Г., Смирнов А.В., Скомсков А.Б. Экспериментальная технология численного сверхкраткосрочного прогноза погоды на основе негидростатической мезомасштабной метеорологической модели с усвоением радиолокационной информации и данных наземной наблюдательной сети // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4(378). С. 6–27. doi: 10.37162/2618-9631-2020-4-6-27.
12. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В., Тарасов А.В. Анализ результатов численного прогноза ливневых осадков по модели WRF с применением различных параметризаций конвекции (на примере территории Пермского края) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3(373). С. 43–59.
13. Кисельникова В.З. Объектно-ориентированная оценка качества прогноза осадков для теплого периода (май–сентябрь) 2016–2020 гг. По модели COSMO-RU2 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2(380). С. 43–51. doi: 10.37162/2618-9631-2021-2-43-51.
14. Костарев С.В., Ветров А.Л. Качество прогноза осадков с помощью модели WRF-ARW с предварительным усвоением данных // Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2018 / Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Институт вычислительной математики РАН. М., 2018. С. 157–162.
15. Маддаха М.А., Русин И.Н., Ахунд-Али А.М. Влияние пространственного разрешения на качество воспроизведения сильных осадков в модели WRF-ARW: пример – юго-запад Ирана // Труды ГГО. 2018. № 588. С. 62–85.
16. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидродинамических и гелиогеографических прогнозов. РД 52.27.284-91 // Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 149 с.
17. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724-2019. М.: Гидрометцентр России. 2019. 72 с.
18. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д. и др. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-RU, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4(374). С. 37–53. doi: 10.37162/2618-9631-2019-4-37-53.
19. Свиязов Е.М., Ветров А.Л. Численное моделирование сильных летних осадков при различных вариантах шага регулярной сетки // Географический вестник = Geographical Bulletin. 2021. № 4(59). С. 73–83. doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-73-83.
20. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 5–32.
21. Травова С.В., Толстых М.А., Шашкин В.В. Оценка прогноза сильных осадков по данным оперативной глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1(375). С. 96–112 doi: 10.37162/2618-9631-2020-1-96-112.
22. Doswell C.A. and Shultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms (2006). Electronic J. Severe Storms Meteorology. Vol. 1. No. 3. P. 1–22.

Метеорология

Калинин Н.А., Сивков Б.А.

23. Jurgen Gracier. Convection parameters. URL: <http://www.juergengrieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (дата обращения: 03.02.2022).
24. Miller R.C. Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central, Air Weather Service Tech. Rep. 200 (Rev.), Air Weather Service, Scott Air Force Base, Ill, 1972. P. 23–42.
25. Novák P., Sokol Z. Use of Czech Weather Radar Network Data for precipitation estimating and nowcasting. Conference: World Environmental and Water Resources Congress (2008) doi: 10.1061/40976(316)398.
26. Stephens G.L., L'Ecuyer T., Forbes R., Gettleman A., Golaz J.C., Bodas-Salcedo A., Suzuki K., Gabriel Ph., Haynes J. Dreary state of precipitation in global models (2010). J. Geophys. Res. V. 115. No. 24. P. D 24211/1–D 24211/13. doi: 10.1029/2010JD014532.

References

31. Alekseeva, A.A., Losev, V.M. (2019), Forecast of severe convective weather events in summer, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological research and forecasting], no. 4, pp. 127–143.
32. Alekseeva, A.A. (2014), Approaches to solving the problem of heavy summer rainfall forecast, *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], vol. 351, pp. 51–67.
33. Bagrov, A.N. (2020), Results of operational tests of the COSMO-RU13 mesoscale model, *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov* [Results of testing of new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts], no. 47, pp. 3–12.
34. Bykov, A.V., Vetrov, A.L., Kalinin, N.A. (2016), The forecast of dangerous convective phenomena in the Perm Krai with use of global prognostic models, *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], vol. 363, pp. 101–119.
35. Bykov, A.V., Shikhov, A.N. (2018), Mesoscale convective systems forecast using global and mesoscale atmospheric models, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], vol. 15, no. 2, pp. 213–224.
36. Vasil'ev, A.A., Vilfand, R.M., Golubev, A.D. (2016), Joint use of numerical mesogrid and conceptual models for real-time forecast of hazardous weather, *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of Hydrometcenter of Russia], vol. 359, pp. 48–57.
37. Vel'tishchev, N.F., Zhupanov, V.D., Pavlyukov, Y.B. (2011), Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models, *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], no. 1, pp. 5–18. doi: 10.3103/S1068373911010018.
38. Vil'fand, R.M., Rivin, G.S., Rozinkina, I.A. (2010), Mesoscale weather short-range forecasting at the Hydrometcenter of Russia, on the example of COSMO-RU, *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], vol. 35, no 1, pp. 1–9.
39. Gorbatenko, V.P., Krechetova, S.Ju., Belikova, M.Ju., Nechepurenko, O.E. (2015), Comparison of indices of atmospheric instability, restored according to radio sounding data and spectroradiometer MODIS in days with thunderstorms, over the territory of Western Siberia, *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], vol. 40, no. 5, pp. 289–295. doi: 10.3103/S1068373915050015.
40. Gubenko, I.M., Rubinshtein, K.G. (2015), Analysis of the Results of Thunderstorm Forecasting Based on Atmospheric Instability Indices Using the WRF-ARW Numerical Model Data, *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 40, no. 1, pp. 16–24. doi: 10.3103/S1068373915010033.
41. Zhupanov, V.D., Luk'janov, V.I., Vasil'ev, E.V., Dmitrieva, T.G., Smirnov, A.V., Skomskov, A.B. (2020), Experimental technology for very-short-range numerical weather prediction based on a nonhydrostatic mesoscale meteorological model with assimilation of radar and ground-based observational data, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological research and forecasting], no. 4(378), pp. 6–27. doi: 10.37162/2618-9631-2020-4-6-27.
42. Kalinin, N.A., Shikhov, A.N., Bykov, A.V., Tarasov, A.V. (2019), Analysis of numerical forecasts of heavy precipitation with the WRF model using various convection schemes (a case study for the Perm Krai), *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], no. 3(373), pp. 43–59.
43. Kiselnikova, V.Z. (2021), Object-oriented assessment of COSMO-Ru2 precipitation forecast quality for the warm season (May–September) in 2016–2020, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], vol. 380, no. 2, pp. 43–51. doi: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-43-51>.
44. Kostarev, S.V., Vetrov, A.L. (2018), Quality of precipitation prediction by the NWP model WRF-ARW with preliminary data assimilation, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 211(1):012061. doi: 10.1088/1755-1315/211/1/012061.
45. Maddah, M.A., Rusin, I.N., Ahund-Ali, A.M. (2018), The effect of horizontal resolution on heavy rainfall simulation quality in the WRF-ARW model: case study – southwest of Iran, *Proceedings Voeikov Main Geophysical Observatory*, no. 588, pp. 62–85.
46. Methodological guidelines. Carrying out production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts. (1991), Guidance document 52.27.284-91, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ.
47. Manual on short-term weather forecasts of general purpose (2019), RD No. 52.27.724-2019, Moscow, Russia.

Метеорология

Калинин Н.А., Сивков Б.А.

48. Rivin, G.S., Rozinkina, I.A., Astakhova, E.D., and others (2019), COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], vol. 374, pp. 37–53.
49. Sviyazov, E.M., Vetrov, A.L. (2021), Numerical modeling of heavy summer rainfalls with different grid spacing of the regular grid step, *Geographical Bulletin*, no. 4(59), pp.73–83. doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-73-83.
50. Tolstykh, M.A. (2016), Global models of the atmosphere: the current state and prospects of development, *Proceedings of Hydrometeorological center of Russia*, no. 359, pp. 5–33.
51. Travova, S.V., Tolstykh, M.A., Shashkin, V.V. (2020), Verification of heavy precipitation forecasts of the SL-AV20 global operational atmosphere model, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], no. 1(375), pp.96–112. doi: 10.37162/2618-9631-2020-1-96-112.
52. Doswell, C.A., Shultz, D.M. (2006), On the use of indices and parameters in forecasting severe storms, *Electronic J. Severe Storms Meteorology*, vol. 1, no. 3, pp. 1–22.
53. Jurgen Gracier. Convection parameters), available at: <http://www.juergengrieser.de/ConvectionParameters/ConvectionParameters.pdf> (Accessed 03 February 2022).
54. Miller, R.C. (1972), Notes on Analysis and Severe Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Rept. 200(R), Headquarters, Air Weather Service, USAF.
55. Novák, P., Sokol, Z. Use of Czech Weather Radar Network Data for precipitation estimating and nowcasting, *Conference: World Environmental and Water Resources Congress 2008*. doi: 10.1061/40976(316)398.
56. Stephens, G.L., L'Ecuyer, T., Forbes, R., Gettleman, A., Golaz, J.C., Bodas-Salcedo, A., Suzuki, K., Gabriel, Ph., Haynes, J. (2010), Dreary state of precipitation in global models, *J. Geophys. Res.*, 115, D24211. doi: 10.1029/2010JD014532.

Статья поступила в редакцию: 09.06.22; одобрена после рецензирования: 12.07.22; принята к опубликованию: 19.09.22.

The article was submitted: 09 June 2022; approved after review: 12 July 2022; accepted for publication: 19 September 2022.

Информация об авторах

Information about the authors

Николай Александрович Калинин

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

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

Богдан Алексеевич Сивков

Младший научный сотрудник, Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем;
614039, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 61а

Bogdan A. Sivkov

Junior Researcher, Ural Environmental Research Institute;

61a, Komsomolsky prospekt, Perm, 614039, Russia

e-mail: sivkovbogdan@yandex.ru

Вклад авторов

Калинин Н.А. – идея статьи, постановка задачи исследования, написание статьи, научное редактирование текста.

Сивков Б.А. – сбор, систематизация и обработка материала, анализ полученных данных, написание статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Kalinin N.A. – the idea of the article; statement of the research problem; writing the article; scientific editing of the text.

Sivkov B.A. – collection, systematization and processing of the material; analysis of the data obtained; writing the article.

Conflicts of Interest: the authors declare no conflict of interest.