

**МЕТЕОРОЛОГИЯ**

Научная статья

УДК 551.509.5

doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-73-83

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНЫХ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ШАГА РЕГУЛЯРНОЙ СЕТКИ**Евгений Михайлович Связов<sup>1</sup>, Андрей Леонидович Ветров<sup>2</sup>✉<sup>1,2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия<sup>1</sup>sviyazov74@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5729-9945>, Scopus Author ID: 6504582057, SPIN-код: 2622-7469, Author ID: 67235<sup>2</sup>vetrov@psu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3844-0111>, Scopus Author ID: 7004921143, SPIN-код: 7443-5860, Author ID: 112794

**Аннотация.** Потепление климата провоцирует увеличение общего влагосодержания на планете и числа случаев сильных ливней. Многие из них вызывают сильные паводки, приводят к гибели людей и разрушению жизненно важной инфраструктуры. Цель исследования – установить возможность улучшения качества прогноза сильных осадков при уменьшении шага расчетной сетки в математической модели атмосферы. Представлены результаты исследования экстремальных летних осадков Уральского Прикамья за период с 1979 по 2015 г. Изучены статистические характеристики 37 случаев выпадения осадков с интенсивностью более 50 мм за 12 ч. Проведены вычислительные эксперименты на региональной модели атмосферы WRF-ARW. Рассмотрены синоптические условия развития случая сильного дождя в г. Губаха с экстремальной интенсивностью 114,5 мм за 12 ч. Качественная оценка результатов моделирования установила, что для выбранного случая модель верно воспроизвела общую структуру сильных дождей, но значительно сдвинула ее восточнее. Проведена количественная оценка качества численного прогноза сильных осадков при шаге сетки 3 км и 7,2 км. Качество модели оценивалось по успешности прогноза осадков не только в точке измерения, но и в окрестностях в радиусе 50 км. Установлено отсутствие значимого улучшения качества прогноза осадков высокой интенсивности при переходе на меньший шаг сетки как по первой, так и по второй методикам оценки. Полученные результаты могут учитываться при подготовке прогнозов возникновения сильных дождей, разработке технологий прогноза паводков.

**Ключевые слова:** сильные дожди, WRF-ARW, пространственный шаг сетки, Уральское Прикамье

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

**Для цитирования:** Связов 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.

**METEOROLOGY**

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2021-4-73-83

**NUMERICAL MODELING OF HEAVY SUMMER RAINFALLS WITH DIFFERENT  
GRID SPACING OF THE REGULAR GRID STEP**

**Evgeniy M. Sviyazov<sup>1</sup>, Andrey L. Vetrov<sup>2</sup>**<sup>1, 2</sup>Perm State University, Perm, Russia<sup>1</sup>sviyazov74@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5729-9945>, Scopus Author ID: 6504582057, SPIN-code: 2622-7469, Author ID: 67235<sup>2</sup>vetrov@psu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3844-0111>, Scopus Author ID: 7004921143, SPIN-code: 7443-5860, Author ID: 112794

**Abstract.** Climate warming is causing an increase in the total moisture content on the planet and in the number of heavy rainfall cases. Many of these result in severe flooding, victims, and destruction of infrastructure. The aim of the study is to establish the possibility of improving the quality of heavy precipitation forecasting by reducing the step of the computational grid in the mathematical model of the atmosphere. The article presents the results of a study of extreme summer precipitation in the Ural Kama region for the period from 1979 to 2015. The statistical characteristics of 37 precipitation cases with an intensity of more than 50 mm in 12 hours were analyzed. Computational experiments were performed on the WRF-ARW regional atmospheric model. The meteorological conditions for the occurrence of heavy rain in town of Gubakha with an extreme intensity of 114,5 mm in 12 hours were taken as a special case for the study. A qualitative assessment of the simulation results showed that for the selected case, the model correctly reproduced the general structure of heavy rains, but significantly shifted it eastward. A quantitative assessment of the forecast quality was conducted for numerical forecast of heavy precipitation based on the WRF-ARW model at a grid step of 3 km and 7,2 km. The quality of the model was evaluated based on the forecast accuracy not only at the measurement point but also in the vicinity within a radius of 50 km. It was found that there was no significant improvement in the quality of the forecast of high-intensity precipitation when switching to a smaller grid step according to both the first and second assessment methods. The results obtained can be taken into account when preparing forecasts of heavy rains occurrence and when developing flood forecast techniques.

**Keywords:** heavy rainfalls, WRF-ARW, horizontal grid spacing, Ural Kama region

**Acknowledgements.** The reported study was funded by RFBR and Perm Territory, project number 20-45-596031.

**For citation:** 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.

## Введение

В настоящее время развитие информационных технологий и рост мощности компьютеров позволяют по-новому решать задачу моделирования состояния атмосферы и прогноза погоды, требующую значительных вычислительных ресурсов. С этой целью разработаны и постоянно совершенствуются различные прогностические модели. Одна из них – мезомасштабная гидродинамическая модель атмосферы WRF-ARW, которая предназначена для прогнозирования и моделирования атмосферных процессов с высоким пространственным разрешением. Ее использование для изучения и прогнозирования опасных метеорологических явлений, обусловленных мезомасштабными вариациями атмосферных процессов, является весьма актуальной задачей.

Повышение качества прогноза погоды вслед за уменьшением шага расчетной сетки фиксируется исследователями с первых дней создания технологии численного прогноза [8]. Для глобальных моделей атмосферы переход на меньший шаг сетки остается основным способом повышения точности прогнозов [9; 10]. С другой стороны, такой прием при использовании региональных моделей имеет свои ограничения. Так, в работах [14; 19] установлено отсутствие значимого улучшения качества прогноза при переходе на шаг сетки от 4 км к 2 км для случаев сильной конвекции над Соединенными Штатами Америки весной 2007 и 2008 гг.

*Метеорология*  
*Связов Е.М., Ветров А.Л.*

Другой известный подход по улучшению качества прогноза осадков — использование вложенных сеток. В Республике Беларусь используется WRF-ARW с горизонтальным разрешением основной сетки 15 км и разрешением вложенной сетки 3 км [2]. Для этой версии модели был разработан собственный набор геоданных для программы geogrid с горизонтальным разрешением 3′′. Еще более выдающихся результатов достигли в Гидрометцентре РФ с помощью модели COSMO-Ru: здесь ведется экспериментальная работа по созданию прогностического каскада моделей для отдельных регионов России [6], в том числе для территории Московского мегаполиса на вложенной вычислительной сетке с разрешающей способностью в 500 м [5; 7]. Улучшение качества прогноза осадков за счет использования вложенных телескопических сеток обнаружено за рубежом при моделировании процессов на востоке Канады и в Средиземноморье [13; 15].

Успешное использование вложенных сеток во многом зависит от качества подготовки данных о подстилающей поверхности [11]. В работе [20] установлена тесная зависимость улучшения качества прогноза над горной территорией с качеством описания подстилающей поверхности, только в таком случае переход модели на шаг с большей детализацией может дать практический эффект.

У технологии вложенных сеток есть и значительный минус — ограниченная область расчета осадков. Не всегда удается решить и проблемы с нежелательными вычислительными эффектами на границе вложенной расчетной области. В целом ряде работ обнаружено не только отсутствие значимого улучшения качества прогноза осадков при переходе на меньший шаг сетки, но и ухудшение качества прогноза [3; 4; 16–18].

Территория Уральского Прикамья характеризуется сложным рельефом, который оказывает большое влияние на развитие и эволюцию конвективных систем, а также на характер связанных с ними метеорологических явлений, что затрудняет задачу прогноза погоды. Переход на меньший шаг расчетной сетки модели может позволить учесть мезометеорологические особенности процессов формирования сильных ливней и улучшить качество прогноза. Важным отличием данного исследования от перечисленных выше подходов является проведение эксперимента по изменению шага сетки при неизменной общей площади расчетного полигона.

Цель представленной работы – оценить точность численных прогнозов осадков экстремальной интенсивности на территории Уральского Прикамья. Счет численной модели прогноза погоды WRF-ARW реализовывался с использованием двух расчетных сеток с шагом 3,0 и 7,2 км.

### **Материалы и методы исследования**

В ходе исследования было проанализировано 37 случаев очень сильных осадков. Исходными данными модели были реанализы NCEP-GFS и NCEP-CFS (США), представленные в коде GRIB-2. Для моделирования полей осадков использовался программный комплекс WRF (версия 3.9.1.1) с динамическим ядром ARW, установленный на суперкомпьютере «ПГНИУ-Кеплер», с негидростатическим приближением и прямым (без параметризаций) моделированием конвекции. Счет модели проводился с продолжительностью 27 ч, начиная с 00 или 12 ч ВСВ, в зависимости от фактического времени наблюдения очень сильных осадков. Выходные данные счета модели формировались с шагом по времени 1ч. Информация об очень сильных летних осадках (количество осадков составило более 50 мм за 12 ч), зарегистрированных на метеорологических станциях Пермского края с 1979 по 2015 г., была взята из открытых источников.

Метеорология  
Связов Е.М., Ветров А.Л.

Для автоматического получения, обработки и визуализации выходных данных модели WRF применялись специально разработанные скрипты для операционной системы Linux и программного комплекса OpenGrADS. Обработка выходных данных проводилась с использованием геоинформационной системы QGIS. Точность восстановления полей осадков по модельным данным оценивалась путем сопоставления расчетного количества осадков с фактически наблюдавшимся на метеостанциях.

Модельные и фактические данные сравнивались как на самих станциях, так и в радиусе 50 км от них. Во втором случае прогноз считался оправдавшимся, если в пределах этого расстояния от станции прогнозировались осадки 50 мм и более за 12 ч, но при этом не учитывались максимальные осадки, которые могли быть за пределами рассматриваемой зоны в 50 км. Верификация полученных данных и оценка успешности моделирования выполнены в соответствии с РД 52.27.284-91 «Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов» [12].

### Результаты и их обсуждение

За период с 1979 по 2015 г. на метеостанциях Пермского края отмечалось 37 случаев очень сильных осадков, в среднем примерно по одному случаю в год. В некоторые годы такого количества осадков не наблюдалось, тогда как в другие годы их было несколько. На рис. 1 представлена повторяемость очень сильных осадков за каждые 5 лет, начиная с 1981 по 2015 г. Повторяемость явления менялась от 3 до 7 случаев, при этом тенденция к увеличению или уменьшению очень сильных осадков за весь рассматриваемый период не наблюдается.

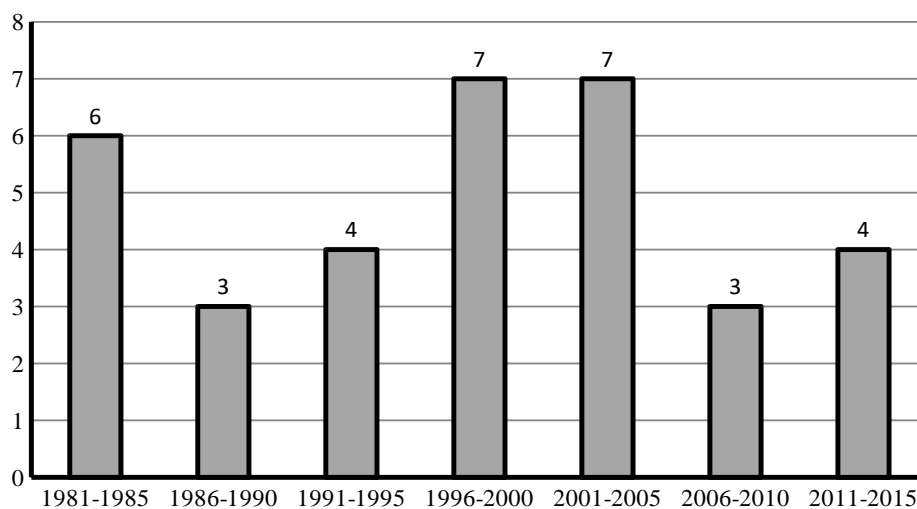


Рис. 1. Повторяемость сильных осадков по пятилетиям  
Fig. 1. Heavy precipitation frequency over five-year periods

Максимальное количество выпавших осадков наблюдалось 25 июня 2015 г. (03 ч СГВ) на метеостанции Губаха и составило 114,5 мм за 12 ч. Преобладающими значениями количества очень сильных осадков являются величины менее 67 мм за 12 ч (более 75% случаев) (таблица, рис. 2), а распределение количества таких осадков имеет резко ассиметричный характер (рис. 2), т.е. подтверждает тот факт, что чем сильнее осадки, тем реже они наблюдаются.

*Метеорология*  
Связов Е.М., Ветров А.Л.

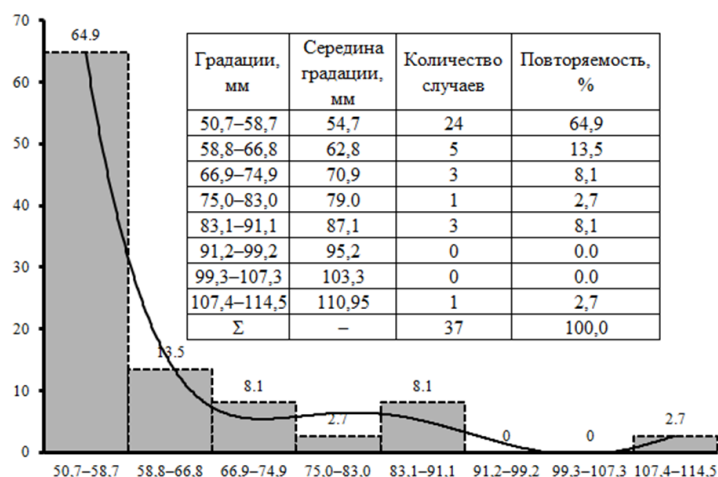


Рис. 2. Распределение сильных осадков по интенсивности  
Fig. 2. Heavy precipitation distribution by intensity

Как указывалось выше, сильнейший за последние годы ливень прошел в г. Губаха в ночь на 25 июня. За 12 ч выпало 114,5 мм осадков – около месячной нормы, что является рекордным для Пермского края за весь период наблюдений. В результате сильнейшего ночного ливня в г. Губаха было затоплено и размыто на протяжении участка 300 м железнодорожное полотно, на многих улицах в городе размыло асфальт. Очень сильные дожди наблюдались в восточной части Пермского края и в Свердловской области, например, на метеостанции Красноуфимск количество выпавших осадков составило 37 мм/12 ч, а на гидропостах Усьва и Верхне-Чусовские городки – 53 и 55 мм/12 ч соответственно. По данным гидропоста Усьва, средние расходы воды на р. Усьва с 24 августа по 26 августа возросли с 14,5 м<sup>3</sup>/с до 238 м<sup>3</sup>/с.

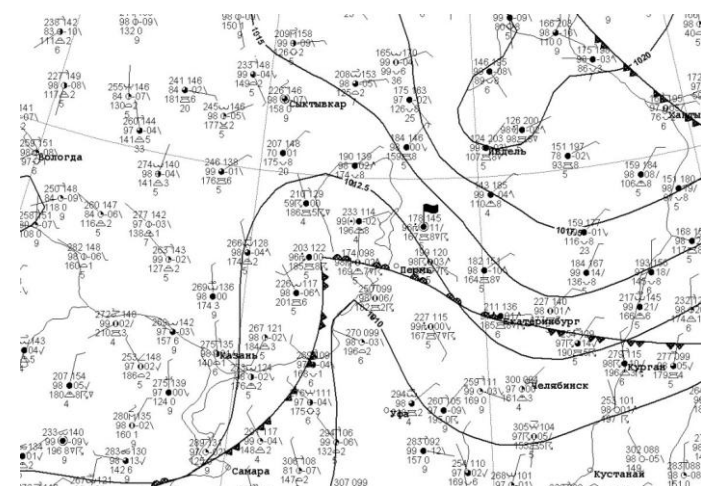


Рис. 3. Синоптическое положение в Пермском крае 25 июня 2015 г. 00 ч СГВ  
(метеостанция Губаха обозначена флажком)  
Fig. 3. Synoptic situation in the Perm Territory on 25 June 2015 at 00 h GMT  
(Gubakha weather station is marked with a flag)

В ночь с 24 на 25 июня 2015 г. Пермский край находился под влиянием ложбины, вытянутой с юга на север, ось которой проходила примерно по линии г. Янаул – г. Кирс (рис. 3). В этом барическом образовании располагалась фронтальная система, вершина волны которой находилась западнее г. Перми. На большей части Пермского края ночные осадки были связаны с теплым фронтом этой фронтальной системы.

Метеорология  
Связов Е.М., Ветров А.Л.

По данным космической съемки (рис. 4), мезомасштабный конвективный комплекс, который сформировался над Пермским краем еще в вечерние часы, сместился на восточные районы и просуществовал всю ночь. Температура на верхней границе облачности составляла от  $-55$  до  $-60^{\circ}\text{C}$ , что указывает на то, что высота верхней границы облачности составляла более 11 км.

На этот период, по данным модели WRF-ARW, очень сильные осадки прогнозировались по обеим расчетным сеткам (рис. 5 и 6). Наибольшие значения по модели составили 95 мм/12 ч в 70 км на юго-восток от станции Губаха по расчетной сетке 7,2 км и 103 мм/12 ч в 125 км на юго-восток от Губахи по сетке 3,0 км. В целом, по сетке 3,0 км очаги максимальных значений поля осадков сдвинуты на юго-восток по сравнению с прогностическим полем осадков по более грубой сетке. Средняя абсолютная ошибка прогноза в сравнении с фактическими осадками на метеостанциях для сетки 7,2 км составила 12,9 мм, а по сетке 3,0 км – 12,5 мм. Таким образом, сетка с меньшим разрешением в этом случае дает несколько лучший прогноз как по пространственному распределению осадков, так и по значениям количества выпавших осадков.

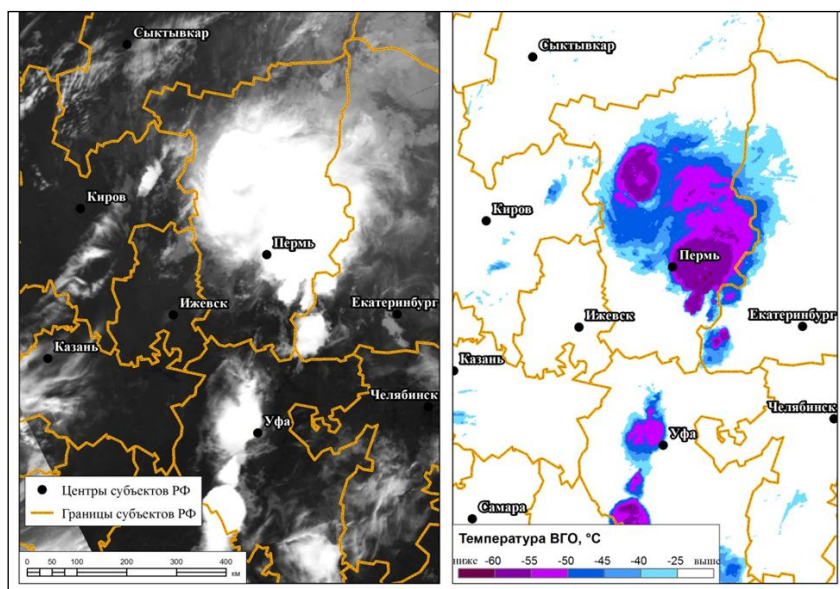


Рис. 4. Снимок Terra MODIS (тепловой канал 31) и температура на верхней границе атмосферы 24.06.2015 г. 17 ч 05 мин СГВ (снимок получен с сайта <http://accident.perm.ru/>)

Fig. 4. Terra MODIS image (thermal channel 31) and the temperature at the upper boundary of the atmosphere on 24 June 2015 at 17 h 05 min GMT (the image was obtained from the website <http://accident.perm.ru/>)

Для оценки качества прогноза данные об осадках с 20 метеостанций сравнивались с результатами моделирования. При оценке прогноза сопоставлялись площадные объекты (зоны сильных осадков, полученные по модели) с точечными (случаи осадков, зафиксированные метеостанциями). На основе имеющихся данных был реализован объектно-ориентированный метод, который состоит в определении успешности прогноза в зависимости от минимального расстояния между фактическим и модельным объектом. Прогноз считался оправдавшимся, если расстояние от метеостанции, зафиксировавшей явление, до ближайшей зоны сильных осадков по модели составляло не более 1,5 км для расчета на сетке 3 км и 3,6 км при расчете на сетке 7,2 км. Из 37 случаев очень сильных осадков прогноз оправдался только в одном из них на расчетной сетке 3,0 км, на сетке 7,2 км оправдавшихся прогнозов нет.



Метеорология  
Связов Е.М., Ветров А.Л.

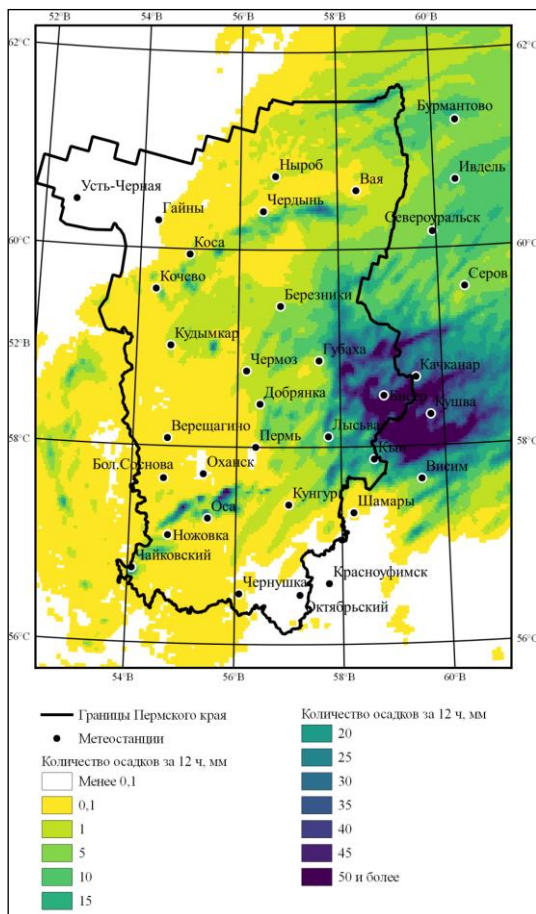


Рис. 5. Прогноз поля осадков по модели WRF-ARW с 24.06.2015 15 ч до 25.06.2015 00 ч СГВ по расчетной сетке 3,0 км

Fig. 5. Precipitation forecast according to the WRF-ARW model from 24 June 2015 15 h to 25 June 2015 00 h GMT with a horizontal grid spacing of 3,0 km

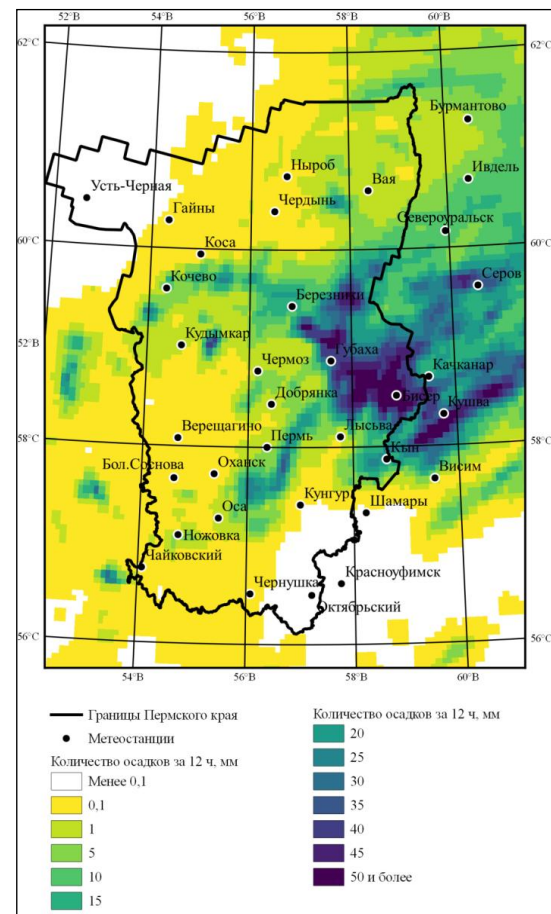


Рис. 6. Прогноз поля осадков по модели WRF-ARW с 24.06.2015 15 ч до 25.06.2015 00 ч СГВ по расчетной сетке 7,2 км

Fig. 6. Precipitation forecast according to the WRF-ARW model from 24 June 2015 15 h to 25 June 2015 00 h GMT with a horizontal grid spacing of 7,2 km

Во втором подходе использовался более мягкий пространственный критерий: случаи считаются оправдавшимися, когда прогнозируемые очень сильные осадки выпадают в радиусе 50 км от места их фактической регистрации на метеостанции. Расстояние 50 км (радиус круга, центром которого является метеостанция, зафиксировавшая осадки более 50 мм/12 ч) является оптимальным для прогноза явлений такого рода, обусловленных мезомасштабными вариациями метеорологических полей в сочетании с местными особенностями территории, и часто используется в других исследованиях [1]. При таком критерии 13 из 37 случаев можно считать оправдавшимися для обеих расчетных сеток. Таким образом, оправдываемость прогноза очень сильных осадков составила 37%. В 10 из этих 13 случаев прогноз оправдался по обоим расчетным сеткам одновременно.

Сравнение прогнозов между собой показывает, что, несмотря на их одинаковую оправдываемость, результаты моделирования очень сильных осадков с более высоким пространственным разрешением имеют большую, хотя и недостаточно тесную, корреляционную связь с фактическими данными, чем на более редкой сетке (0,33 и 0,06 соответственно). Анализируя другие параметры, характеризующие успешность прогноза, такие как средняя абсолютная ошибка и средняя квадратическая ошибка прогноза, можно сделать вывод о том, что расчетная сетка с шагом 3 км является более

*Метеорология*  
*Связов Е.М., Ветров А.Л.*

предпочтительной для моделирования мезомасштабных структур, дающих сильные осадки. Однако ошибки прогноза для обеих пространственных сеток мало отличаются друг от друга. Так, например, средняя абсолютная ошибка для трехкилометровой сетки составила 26,3 мм, а для сетки с шагом 7,2 км – 31,3 мм; средняя квадратическая ошибка равнялась 31,5 и 36,5 мм соответственно. При этом модель WRF занижает количество выпавших осадков в среднем на 22,3 и 24,1 мм соответственно по сравнению с фактическими. Таким образом, для обоих вариантов сеток различия в значениях характеристик оправдываемости прогноза очень сильных осадков невелики. Учитывая тот факт, что для использования трехкилометровой сетки требуется в 9 раз больше машинного времени, расчет по ней в данном случае проводить нецелесообразно. Кроме того, можно сделать вывод о том, что дальнейшее уменьшение шага сетки не приведет к какому-либо значительному улучшению качества прогноза очень сильных осадков, поскольку в данном случае большее влияние оказывают качество и количество начальных данных (плотность сети наблюдений).

### **Выводы**

В работе проведена оценка качества прогноза 37 случаев осадков экстремальной интенсивности в Уральском Прикамье с использованием разных расчетных сеток в модели WRF-ARW. Обобщить полученные результаты можно в следующих положениях:

1. Прогноз очень сильных осадков с помощью расчетной сетки с шагом 3,0 км непосредственно на метеостанции оправдался в одном случае из 37 рассмотренных, т.е. оправдываемость прогноза составила 2,7%. При расчетах на сетке 7,2 км оправдавшихся прогнозов не было.

2. Оправдываемость прогноза сильных дождей в радиусе 50 км от станции для обеих расчетных сеток составила 37%.

3. В целом модель WRF занижает количество осадков в среднем на 23 мм.

4. Использование расчетной сетки для данной версии модели WRF-ARW (версия 3.9.1.1) с шагом 3,0 км и менее представляется не целесообразным в случае детерминированного прогноза в точке, так как увеличение пространственного разрешения модели не приводит к какому-либо существенному улучшению качества прогноза по предложенной методике, но значительно возрастают требования к вычислительным ресурсам.

### **Список источников**

1. 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.

2. Лапто П.О., Шакур В.Н., Прохареня М. Результаты верификации модели WRF-ARW в Гидромете Республики Беларусь // Труды Гидрометцентра России. 2015. № 358. С. 67–77.

3. Маддах М.А., Русин И.Н., Ахунд-Али А.М. Оценка физических параметризаций модели WRF для моделирования сильных осадков на юго-западе Ирана // Труды ГГО. 2017. № 586. С. 191–204.

4. Маддах 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.

5. Ривин Г.С., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Розинкина И.А., Тудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Самсонов Т.Е., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Захарченко Д.И. Развитие системы численного прогнозирования опасных метеорологических явлений для Московского мегаполиса: прототип системы // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 33–45.

6. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Блинов Д.В., Бундель А.Ю., Кирсанов А.А., Шатунова М.В., Чубарова Н.Е., Алферов Д.Ю., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Копейкин В.В., Никитин М.А., Полюхов А.А., Ревокатова А.П., Татаринovich Е.В., Чурюлин Е.В. Система



*Метеорология*  
*Связов Е.М., Ветров А.Л.*

краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. Вып. 4(374). С. 37–53.

7. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Гудрий К.О., Блинов Д.В., Варенцов М.И., Захарченко Д.И., Самсонов Т.Е., Репина И.А., Артамонов А.Ю. Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и условий возникновения опасных явлений с высокой детализацией для Московского мегаполиса // Метеорология и гидрология. 2020. № 7. С. 5–19.

8. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 359. С. 5–32.

9. Толстых М.А., Желен Ж.-Ф., Володин Е.М. Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Красюк Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. Разработка многомасштабной версии глобальной модели ПЛАВ // Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25–35.

10. Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Травова (Махнорылова) С.В., Гойман Г.С., Мизяк В.Г., Рогутков В.С., Шляева А.В., Юрова А.Ю. Развитие глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2009–2019 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. Вып. 4(374). С. 77–91.

11. Самсонов Т. Е., Варенцов М. И. Определение параметров городской среды Московского мегаполиса для детализированного численного прогноза погоды в рамках модели COSMO // Метеорология и гидрология. 2020. Вып. 7. С. 112–119.

12. Руководящий документ 52.27.284-91 «Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов». Дата введения 1992.01.01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200068360>.

13. Cassola F., Ferrari F., Mazzinob A. Numerical simulations of editerranean heavy precipitation events with the WRF model: A verification exercise using different approaches (2015). Atmospheric Research, vol. 164, pp. 210–225.

14. Kain J.S., Weiss S.J., Bright D.R., Baldwin M.E., Levit J.J., Carbin G.W., Schwartz C.S., Weisman M.L., Droegemeier K.K., Weber D.B., Thomas K.W. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP (2008). Weather and Forecasting, 23(5), pp. 931–952. doi: 10.1175/WAF2007106.1.

15. Pennelly C., Reuter G., Flesch T. Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta (2014). Atmospheric Research, vol. 135, pp. 172–192.

16. Roberts N. M., Cole S. J., Forbes R. M., Moore R. J., Boswell D. Use of high-resolution NWP rainfall and river flow forecasts for advance warning of the Carlisle flood, north-west England (2009). Meteor. Appl, 16, pp. 23–34.

17. Roberts N. M., Lean H. W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events (2008). Mon. Weather Rev, vol. 136, pp.78–97.

18. Schwartz C.S., Kain J.S., Weiss S.J., Xue M., Bright D.R., Kong F., Thomas K.W., Levit J.J., Conigloi M.C. Next-day convection-allowing WRF model guidance: A second look at 2-versus 4-km grid spacing (2009). Mon. Wea. Rev., vol. 137, pp. 3449–3470.

19. Schlüter I., Schädler G. Sensitivity of Heavy Precipitation Forecasts to Small Modifications of Large-Scale Weather Patterns for the Elbe River (2010). J. Hydrometeor, vol. 11, pp. 770–780. doi: 10.1175/2010JHM1186.1.

20. Wagner A., Heinzeller D., Wagner S., Rummeler T., Kunstmann H. Explicit convection and scale-aware cumulus parameterizations: High-resolution simulations over areas of different topography in Germany (2018) Mon. Weather Rev, vol. 146(6), pp. 1925–1944.

### References

1. 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.

2. Lappo, P.O., Shakur, V.N., Prakharenia, M. (2015), The results of verification of the WRF-ARW model in the Hydromet of the Republic of Belarus, *Proceedings of Hydrometcentre of Russia*, no. 358, pp. 67–77.

3. Maddah, M.A., Rusin, I.N., Ahund-Ali, A.M. (2017), Evaluation of WRF physical parametrizations in simulating heavy rainfall events in southwestern Iran, *Proceedings Voeikov Main Geophysical Observatory*, no. 586, pp. 191–204.

4. 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.

5. Rivin, G.S., Vil'fand, R.M., Kiktev, D.B., Rozinkina, I.A., Tudriy, K.O., Blinov, D.V., Varentsov, M.I., Samsonov, T.E., Bundel', A.Yu., Kirsanov, A.A., Zakharchenko, D.I. (2019), The system for numerical prediction of weather events (including severe ones) for Moscow megacity: The prototype development. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, no. 44(11), pp. 729–738.

6. Rivin, G.S., Rozinkina, I.A., Astakhova, E.D., Blinov, D.V., Bundel', A.Yu., Kirsanov, A.A., Shatunova, M.V., Chubarova, N.Ye., Alferov, D.Yu., Varentsov, M.I., Zakharchenko, D.I., Kopeykin, V.V., Nikitin, M.A., Poliukhov, A.A., Revokatova, A.P., Tatarinovich, E.V., Churiulin, E.V. (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.

7. Rivin, G.S., Rozinkina, I.A., Vil'fand, R.M., Kiktev, D.B., Tudrii, K.O., Blinov, D.V., Varentsov, M.I., Zakharchenko, D.I., Samsonov, T.E., Repina, I.A., Artamonov, A.Y. (2020), Development of the High-resolution Operational System for Numerical Prediction of Weather and Severe Weather Events for the Moscow Region. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, no. 45, pp. 455–465.

8. 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.

9. Tolstykh, M.A., Geleyn, J.F., Volodin, E.M. et al. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 40, 374–382 (2015). <https://doi.org/10.3103/S1068373915060035>

10. Tolstykh, M.A., Fadeev, R.Yu., Shashkin, V.V., Travova, S.V., Goyman, G.S., Mizyak, V.G., Rogutov, V.S., Shlyaeva, A.V., Yurova, A.Yu. (2019), Development of SL-AV global semi-lagrangian atmosphere model in 2009–2019, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], no. 374, pp. 77–91.

11. Samsonov, T.E., Varentsov, M.I. (2020), Computation of City-descriptive Parameters for High-resolution Numerical Weather Prediction in Moscow Megacity in the Framework of the COSMO Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, no. 45, pp. 515–521. doi: 10.3103/S1068373920070079.

12. Guidance document 52.27.284-91 “Methodological guidelines. Carrying out production (operational) tests of new and improved methods of hydrometeorological and heliogeophysical forecasts”, Date of introduction 1992.01.01, available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200068360>.

13. Cassola, F., Ferrari, F., Mazzinob, A. (2015). Numerical simulations of editerranean heavy precipitation events with the WRF model: A verification exercise using different approaches, *Atmospheric Research*, vol. 164, pp. 210–225.

14. Kain, J.S., Weiss, S.J., Bright, D.R., Baldwin, M.E., Levit, J.J., Carbin, G.W., Schwartz, C.S., Weisman, M.L., Droegemeier, K.K., Weber, D.B., Thomas, K.W. (2008). Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP, *Weather and Forecasting*, 23(5), pp. 931–952. doi: 10.1175/WAF2007106.1.

15. Pennelly, C., Reuter, G., Flesch, T. (2014), Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta, *Atmospheric Research*, vol. 135, pp. 172–192.

*Метеорология*  
Связов Е.М., Ветров А.Л.

16. Roberts, N.M., Cole, S.J., Forbes, R.M., Moore, R.J., Boswell, D. (2009), Use of high-resolution NWP rainfall and river flow forecasts for advance warning of the Carlisle flood, north-west England, *Meteor. Appl.*, 16, pp. 23–34.

17. Roberts, N.M., Lean, H.W. (2008), Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events, *Mon. Weather Rev.*, vol. 136, pp.78–97.

18. Schwartz, C.S., Kain, J.S., Weiss, S.J., Xue, M., Bright, D.R., Kong, F., Thomas, K.W., Levit, J.J., Conigloi, M.C. (2009), Next-day convection-allowing WRF model guidance: A second look at 2-versus 4-km grid spacing, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 137, pp. 3449–3470.

19. Schlüter, I., Schädler, G. (2010), Sensitivity of Heavy Precipitation Forecasts to Small Modifications of Large-Scale Weather Patterns for the Elbe River, *J. Hydrometeor.*, vol. 11, pp. 770–780. doi: 10.1175/2010JHM1186.1.

20. Wagner, A., Heinzeller, D., Wagner, S., Rummler, T., Kunstmann, H. (2018), Explicit convection and scale-aware cumulus parameterizations: High-resolution simulations over areas of different topography in Germany, *Mon. Weather Rev.*, vol. 146(6), pp. 1925–1944.

Статья поступила в редакцию: 23.08.21; одобрена после рецензирования: 21.10.2021; принята к опубликованию: 28.10.2021.

The article was submitted: 23 August 2021; approved after review: 21 October 2021; accepted for publication: 28 October 2021.

**Информация об авторах**

**Information about the authors**

**Евгений Михайлович Связов**

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

**Evgeniy M. Sviyazov**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Meteorology and Atmospheric Protection, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

e-mail: sviyazov74@mail.ru

**Андрей Леонидович Ветров**

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

**Andrey L. Vetrov**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Meteorology and Atmospheric Protection, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

e-mail: vetrov@psu.ru

**Вклад авторов**

Связов Е.М. – подбор случаев сильных осадков, выполнение численных экспериментов, обработка материала, написание основных частей статьи, подготовка иллюстраций.

Ветров А.Л. – идея статьи, написание аннотации, обзора литературы, выбор случая сильных осадков для иллюстрации успешности прогноза численной моделью, научное редактирование текста, написание отдельных частей статьи.

**Конфликт интересов.** У авторов отсутствует конфликт интересов по отношению к результатам, полученным в ходе исследовательской работы.

**Contribution of the authors**

Sviyazov E.M. – selection of heavy rainfall cases; numerical experiments; processing of the scientific material; writing the main parts of the article; illustrations.

Vetrov A.L. – the idea of the article; writing the abstract; the literature review; selection of the heavy rainfall case to demonstrate the accuracy of forecasting with a numerical model; scientific editing; writing individual parts of the article.

The authors declare no conflict of interests in relation to the results obtained in the research work.