УДК 551.577

А.Н. Шихов, Е.М. Свиязов

ОЦЕНКА СУММ ОСАДКОВ ЗА ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД НА ЗАПАДНОМ УРАЛЕ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ WRF*

С использованием мезомасштабной численной модели атмосферы WRF-ARW проведены расчеты количества осадков за холодный период (с ноября по март) на водосборе Воткинского водохранилища за 2012-2015 гг. В дальнейшем полученные данные использованы для расчета снегозапасов на водосборе. В настоящей статье обсуждается только расчет количества зимних осадков по модели. Установлено, что модель систематически завышает количество осадков, причем в весенний период завышение становится значительным (в 1,3-1,5 раза). Рассмотрены особенности пространственного распределения ошибок прогноза. Показано, что наибольшее расхождение фактических и модельных сумм осадков характерно для метеостанций, расположенных в глубоких долинах рек. На основе результатов численного эксперимента установлено, что выбор параметризации микрофизики облачности не позволяет устранить систематическое завышение количества осадков по модели в весенний период.

К л ю ч е в ы е с л о в а: осадки холодного периода, модель WRF, ошибки прогноза.

Осадки являются ключевым элементом наземного гидрологического цикла. Точность их измерения оказывает существенное влияние на качество прогнозов объема стока, расходов и уровней воды в реках. Для прогноза весеннего талого стока большое значение имеет объективная оценка количества осадков, выпавших за холодный период, и запасов воды в снежном покрове на водосборе. На равнинной территории, при условии достаточной плотности сети наблюдений, такая оценка может быть получена путем простой пространственной интерполяции [7]. Однако в условиях сложного рельефа существующая наблюдательная сеть не учитывает мезомасштабные неоднородности пространственного распределения осадков [5; 6]. Для решения проблемы восстановления количества осадков в районах с пересеченным рельефом предложено несколько способов. В работах В.А. Шутова для анализа пространственной изменчивости осадков холодного периода и снегозапасов предложен метод интерполяции «приведенных величин», позволяющий учесть рост количества осадков с высотой [11]. На аналогичные допущения о постоянстве высотного градиента осадков опирается такой подход, как нормирование суточных сумм осадков по их годовой среднемноголетней величине [8].

Однако любые подходы, основанные на интерполяции, не позволяют адекватно учесть неоднородность распределения осадков и снегозапасов в зависимости от экспозиции склонов, направления и скорости ветра. Устранение данного недостатка возможно, если в качестве исходных данных для расчета снегозапасов использовать прогностические поля осадков, полученные по мезомасштабной численной модели прогноза погоды.

В настоящее время мезомасштабные модели атмосферы обеспечивают достаточно высокую надежность и пространственную детализацию краткосрочного прогноза осадков в холодный период года. Это позволяет использовать их для расчета пространственного распределения снегозапасов (на основе суммирования осадков холодного периода с учетом таяния при оттепелях). За рубежом получил распространение подход, основанный на комбинировании мезомасштабных моделей атмосферы и гидрологических моделей для прогноза талого стока в труднодоступных горных районах, не освещенных сетевыми наблюдениями [12; 13].

Как показывает опыт расчета снегозапасов для территории Пермского края, данные модели WRF могут быть источником дополнительных и весьма существенных ошибок при оценке снегозапасов. На материалах 2012/13 и 2013/14 гг. был установлен факт систематического завышения сумм осадков

© Шихов А.Н., Свиязов Е.М., 2015

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №14-05-31220-мол-а)

Шихов Андрей Николевич, старший преподаватель кафедры картографии и геоинформатики Пермского государственного национального исследовательского университета; Россия 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; and3131@inbox.ru

Свиязов Евгений Михайлович, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; Россия 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; sviyazov74@mail.ru

по модели WRF в 1,3-1,5 раза в весенний период, что приводит к соответствующему заметному завышению снегозапасов [10]. В отдельных случаях, как в летний, так и в зимний периоды, отмечается также существенное (на 100–150 км) смещение прогностического положения зон интенсивных осадков относительно их фактического положения, обусловленное неточностью начальных данных для запуска модели (глобального анализа и прогноза GFS/NCEP) [3; 4].

Настоящая работа посвящена более подробному анализу ошибок, возникающих при расчете сумм осадков холодного периода по модели WRF на материалах трех зимних сезонов (с 2012 по 2015 г.). Как и в работе [10], рассматривалась территория водосбора Воткинского водохранилища. Также описаны результаты численного эксперимента по минимизации ошибок прогноза осадков в весенний период с помощью подбора оптимальной параметризации микрофизических процессов в облачности.

Исходные данные и методы исследования

Расчеты накопленных осадков по модели WRF проведены за холодный период (с ноября по март) 2012/13, 2013/14 и 2014/15 гг. Запуск модели WRF производился на вычислительном кластере Пермского государственного национального исследовательского университета. Расчеты производились с использованием динамического ядра ARW на срок 48 *ч*, от 0 ч текущих суток по ВСВ. Размер расчетной области составлял 2000×2000 км. Модель запускалась с шагом, равным 10 км по пространству и 60 с по времени, с выдачей данных через каждые 3 ч. При дальнейших расчетах использовались данные на срок 15–39 ч от начала прогноза, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения выпавших осадков на метеостанциях. В качестве начальных условий для запуска WRF использовались данные глобальной модели GFS/NCEP.

При запуске модели использовались следующие параметризации физических процессов: микрофизика облачности – схема Томпсона; потоки длинноволновой радиации – схема RRTM (Rapid Radiative Transfer Model); потоки коротковолновой радиации – схема Дудья; приземный слой – схема Монина-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия; подстилающая поверхность и почва – схема NOAH; пограничный слой – схема университета Енсей; параметризация кучевой облачности – схема Каина–Фритша. Более детально модель WRF и настройки ее конфигурации рассмотрены в [1].

Выходные данные модели (суточные суммы осадков) конвертировались в формат точечного класса пространственных объектов ArcGis, в котором каждая точка представляет собой узел регулярной сетки (с шагом 10 км), с записанным в атрибутивную таблицу значением суточной суммы осадков. Затем выполнялось суммирование осадков за каждый месяц и пересчет на более мелкую сетку (с шагом 3000 м) методом сплайн-интерполяции. Результаты расчетов сумм осадков холодного периода по модели WRF представлены на рис. 1.

Достоверность результатов расчета оценивалось путем сопоставления фактических и прогностических месячных сумм осадков по 34 метеостанциям, расположенным в пределах водосбора Воткинского водохранилища и в сопредельных районах. Для оценки достоверности использовались следующие критерии:

1. Средняя абсолютная ошибка прогноза

$$\Delta\overline{X} = \sum (X_П - X_Ф)/n,$$

где $\Delta\overline{X}$ – средняя абсолютная ошибка прогноза количества осадков за месяц, n – число метеостанций, по которым выполнялось сопоставление (в данном случае n = 34), $X_Ф$ – месячная сумма осадков по данным метеостанции, $X_П$ – месячная сумма осадков по модельным данным.

2. Среднеквадратичная ошибка прогноза (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_П - X_Ф)^2}\ .$$

3. Отношение RMSE к среднему фактическому количеству осадков.
4. Количество метеостанций, на которых наблюдалось завышение (занижение) осадков, и средняя величина отклонения.

Результаты проведенного сопоставления представлены в табл. 1.

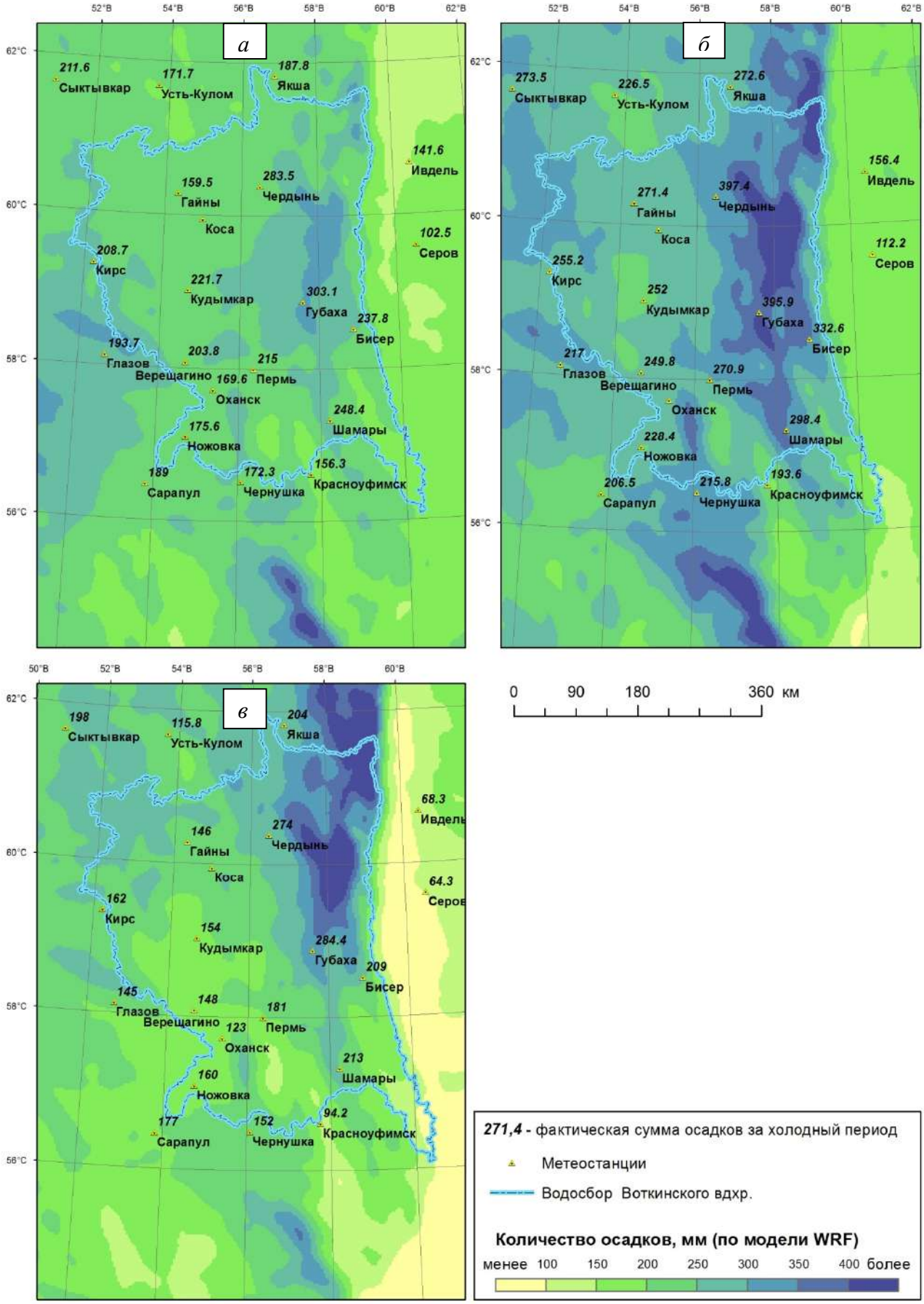

Рис. 1. Количество осадков за холодный период по модели WRF: *а* – 2012/13 гг.; *б* – 2013/14 гг.; *в* – 2014/15 гг.

Таблица 1

Оценка достоверности расчетных сумм зимних осадков по модели WRF–ARW (2012–2013/2013–2014/2014-2015 гг.)

Критерии оценки достоверности расчета накопленных осадков	*Год*	*Месяц*				
		ноябрь	*декабрь*	*январь*	*февраль*	*март*
Фактическая сумма осадков (среднее значение по данным 34 метеостанций)	2012/13	61,8	29,5	33,8	15,1	50,5
	2013/14	65,0	59,5	39,6	34,7	44,9
	2014/15	24,1	45,1	42,3	28,6	17,0
Расчетная сумма осадков (результат счета модели WRF–ARW как среднее значение по данным 34 метеостанций)	2012/13	65,0	32,6	33,9	21,9	66,6
	2013/14	64,7	62,5	44,0	32,2	67,2
	2014/15	28,0	54,0	49,2	43,0	27,8
Средняя абсолютная ошибка расчетной суммы осадков, мм	2012/13	10.0	4.9	5.2	7.7	17.8
	2013/14	12.0	9.3	7.2	6.2	24.1
	2014/15	5.8	9.3	9,5	15.0	11.1
Среднеквадратичная ошибка расчетной суммы осадков, мм	2012/13	12,1	6,9	6,2	8,6	21,1
	2013/14	15,4	11,6	9,1	8,7	27,0
	2014/15	6.6	11.1	12.0	16.1	12.5
Отношение среднеквадратичной ошибки к фактической сумме осадков, %	2012/13	20	23	18	57	42
	2013/14	23	20	23	25	60
	2014/15	27	25	28	56	73
Число метеостанций, на которых расчетная сумма осадков оказалась ниже фактической	2012/13	9	10	16	4	4
	2013/14	13	13	8	21	3
	2014/15	7	5	8	3	1
Среднее занижение расчетной суммы осадков на этих станциях, *мм*	2012/13	12,8	3,0	5,4	4,0	7,4
	2013/14	16,1	8,3	6,0	7,0	10,0
	2014/15	4,5	1,3	5,3	3,8	5,2
Число метеостанций, на которых расчетная сумма осадков превысила фактическую	2012/13	25	24	18	30	30
	2013/14	21	21	26	13	31
	2014/15	26	28	25	30	32
Среднее завышение расчетной суммы осадков на этих станциях, *мм*	2012/13	9,0	5,6	5,0	8,2	19,2
	2013/14	9,4	10,0	7,6	4,9	25,5
	2014/15	6,1	10,7	10,8	16,1	11,2

Сопоставление сумм осадков по фактическим и модельным данным показывает, что в большинстве случаев модель завышает количество осадков. Сильное систематическое завышение количества осадков по модели (на 35-50 % в среднем по территории) отмечается в конце холодного периода: в марте (за все три года), а также в феврале 2013 и 2015 гг. В ноябре-январе наблюдалось в основном незначительное (в пределах 20 %) завышение количества осадков по модели. В феврале 2014 г. в среднем по 34 метеостанциям расчетная сумма осадков оказалась на 6 % меньше фактической.

В феврале наблюдалась зависимость достоверности прогноза осадков от циркуляционного и температурного режима в течение месяца. Так, в феврале 2013 и 2015 гг. на изучаемой территории отмечалась значительная (3–6°) положительная аномалия температуры воздуха, месяц по температурному режиму был ближе к климатической норме марта, чем февраля. В этих случаях количество осадков по модели оказалось сильно завышенным. Февраль 2014 г., напротив, был холоднее нормы на 2–3°, и завышение количества осадков по модели в этом случае не наблюдалось.

Среднеквадратичная ошибка расчета месячных сумм осадков по модели в зимние месяцы в большинстве случаев находится в пределах 18-31 % от среднего количества выпавших осадков. Такие ошибки можно считать приемлемыми, поскольку их величина близка к погрешностям измерения твердых осадков на метеостанциях. Известно, что измерение твердых осадков на метеостанциях характеризуется значительным занижением их количества вследствие ветрового недоучета. Средние месячные значения ветрового недоучета твердых осадков для используемых в настоящее время на наблюдательной сети осадкомеров Третьякова составляют не менее 20–30 % от измеренного количества осадков [2; 9]. В этой связи можно предположить, что полученные с использованием модели WRF данные о пространственном распределении осадков в период с ноября по январь являются более объективными, чем данные наблюдательной сети.

В конце холодного периода (февраль-март) среднеквадратичная ошибка прогноза резко увеличивается, до 42–73 % от среднего количества выпавших осадков (за счет систематического завышения их количества по модели). В среднем в этот период суммы осадков по модели завышены в 1,35-1,5 раза, на отдельных метеостанциях – в два раза. Причем систематически завышается количество как обложных, так и ливневых осадков.

При сопоставлении количества осадков по модели WRF с данными метеостанций установлено, что степень завышения количества осадков по модели существенно зависит от условий расположения метеостанции. Наибольшее отклонение модельных сумм осадков от фактических (в относительном выражении) характерно для метеостанций, расположенных в пониженных формах рельефа, особенно в глубоких долинах рек (Висим, Бисерть, Красноуфимск), а также за Уральским хребтом (Ивдель, Серов, Ревда). В то же время для метеостанций, расположенных на возвышенностях (Бисер, Губаха, Октябрьский, Шамары), количество осадков по модели превышает фактическое не более чем на 20 % (рис. 2). Причиной таких расхождений является пространственное разрешение модельного прогноза осадков. При шаге сетки 10 км модель воспроизводит несколько сглаженные поля пространственного распределения осадков, в которых не учитывается влияние мезорельефа.

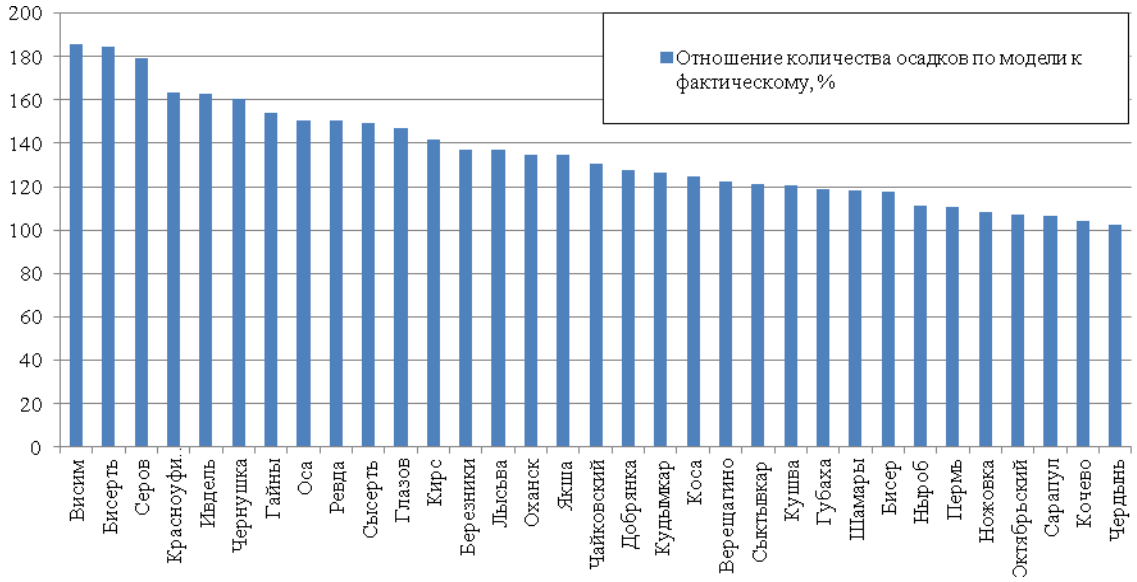

Рис. 2. Относительное завышение количества осадков за холодный период 2014-2015 гг. по расчету модели WRF

Таким образом, завышение сумм осадков по модели включает в себя несколько составляющих:

– систематическое завышение (хорошо выраженное в конце холодного периода), которое проявляется на всей изучаемой территории;

– завышение сумм осадков для метеостанций, расположенных в пониженных формах рельефа, обусловленное сглаженностью прогностических полей осадков по модели. Проявляется во все месяцы холодного периода;

– составляющая, обусловленная ветровым недоучетом твердых осадков на сети метеостанций (ее вклад можно оценить в 20–30 %).

Особенности пространственного распределения осадков холодного периода по модели WRF

Как отмечено выше, при расчете сумм осадков холодного периода по модели WRF с шагом сетки 10 км выходные поля их пространственного распределения получаются сглаженными. Однако и при этом разрешении хорошо выделяются области с максимальным накоплением осадков, обусловленные влиянием барьерного эффекта меридионально ориентированных возвышенностей и горных хребтов. К ним относятся прежде всего осевые хребты Северного Урала, хребет Кваркуш, а также ряд возвышенностей: Западно-Уральские Увалы, Полюдов Кряж, Верхнекамская и Тулвинская возвышенности. В зонах барьерной тени Уральских гор и некоторых возвышенностей (Тулвинской, Верхнекамской) выпадает наименьшее количество осадков, что также воспроизводится моделью.

В то же время неоднородности пространственного распределения осадков, выраженные на меньшем масштабе (10–30 км), модель WRF в использованной конфигурации сглаживает. В частности, не воспроизводится существенное уменьшение количества осадков в долинах рек (Чусовой, Тулвы) в сравнении с прилегающими возвышенностями. Уменьшение шага сетки модели до 3–5 км позволило бы устранить этот недостаток, однако запуск модели с высоким разрешением на столь длительный период времени потребовал бы значительных вычислительных ресурсов.

Пространственное распределение осадков, выпадающих за холодный период, характеризуется выраженными чертами подобия. В общих чертах оно определяется макрорельефом территории, а

своеобразие в каждый конкретный сезон зависит от циркуляционных условий. В случае преобладания зональных процессов влияние барьерного эффекта гор и возвышенностей усиливается, и распределение осадков становится более неравномерным. Так, за холодный период 2014/15 гг. по данным модели WRF в осевой части Северного Урала выпало более 500 мм осадков, а в Северном Зауралье – менее 100 мм. При ослаблении зональной циркуляции (как, например, зимой 2012-2013 гг.) влияние барьерного эффекта гор сглаживается, распределение осадков становится более равномерным.

Подбор оптимальной параметризации микрофизических процессов для прогноза количества осадков по модели в весенний период

Для выявления причин и устранения систематического завышения количества осадков по модели WRF в весенний период был проведен анализ изменения ошибок прогноза в зависимости от выбора параметризации микрофизических процессов в облачности.

В модели имеется возможность использовать 9 различных параметризаций с различной степенью учета гидрометеоров в жидкой и твердой фазах и соответствующих микрофизических процессов. Это схемы Кесслера, Линя, Томпсона (Райзнера), Моррисона, Water for spectral model (WSM 3, WSM 5 и WSM 6), схема Ферьера и простая трехклассная модель. Краткое описание параметризаций приведено в работе [1].

Для проведения эксперимента по подбору оптимальной параметризации были выбраны два случая в апреле 2014 г., когда наблюдались умеренные и сильные снегопады (до 20 мм осадков за сутки): 2-3 и 23-24 апреля. Модель WRF запускалась с различными параметризациями микрофизики облачности, в остальном ее конфигурация была неизменной. Для оценки достоверности прогноза использовались данные с 34 метеостанций. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, выбор параметризации микрофизики не оказывает существенного влияния на качество прогноза осадков. При выборе любой параметризации сохраняется значительное (в среднем по территории на 25-35%) завышение количества осадков. Средняя абсолютная ошибка и среднеквадратичная ошибка прогноза изменяются в пределах 10-15% в зависимости от выбора параметризации микрофизики. Наилучшие результаты дает схема WSM3, худшие – схема Линя.

Таблица 2

Оценка достоверности прогноза осадков по модели WRF с различными параметризациями микрофизики облачности

Критерии достоверности прогноза осадков	*Схема Линя*	*Схема Томпсона*	*Простая трехклассная модель*	*Схема WSM3*	*Схема WSM5*	*Схема WSM6*
Средняя абсолютная ошибка прогноза	2,06	2,02	2,07	1,82	1,88	1,87
Среднеквадратичная ошибка прогноза, мм	3,28	3,12	3,27	2,88	2,99	2,99
Отношение среднеквадратичной ошибки к фактической сумме осадков, %	0,91	0,77	0,81	0,71	0,74	0,74

Выводы

На материалах 2012-2015 гг. установлено, что модель WRF позволяет получить достаточно адекватную оценку пространственного распределения осадков в течение большей части холодного периода. Ранее уже было показано, что с использованием выходных модели имеется возможность расчета снегозапасов с высоким пространственным разрешением, что особенно ценно для труднодоступных районов с отсутствием снегомерных наблюдений. Однако систематическое завышение осадков по модели в весенний период может привести к заметному завышению расчетного снегозапаса. Причины систематического завышения количества осадков по модели WRF в феврале-марте практически не связаны с выбором параметризации микрофизических процессов в облачности. Вероятно, улучшить прогноз можно с помощью выбора иных начальных условий для запуска модели (вместо данных GFS/NCEP), а также при ее запуске с более высоким пространственным разрешением.

Установлено, что наибольшее отклонение модельных сумм осадков от фактических (в относительном выражении) характерно для метеостанций, расположенных в пониженных формах рельефа, особенно в глубоких долинах рек, а также за Уральским хребтом. Влияние этого источника ошибок также может быть снижено при уменьшении шага сетки в модели.

Библиографический список

1. *Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д.* Информация о модели общего пользования WRF-NMM / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Главный вычислительный центр. М., 2007. 124 с.
2. *Гаврилова С.Ю.* Устранение неоднородности временных рядов атмосферных осадков и их использование для анализа изменений режима увлажнения на территории России: дис …. канд. геогр. наук. СПб., 2010. 105 с.
3. *Калинин Н.А., Ветров А.Л., Свиязов Е.М., Попова Е.В.* Изучение интенсивной конвекции в Пермском крае с помощью модели WRF // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 21–30.
4. *Калинин Н.А. Попова Е.В.* Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15-16 марта 2013 г. // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2013. № 6. С. 7–16.
5. *Калинин Н.А., Смирнова А.А., Фрик Л.В.* Исследование влияния рельефа Пермского края на распределение полей осадков // Географический вестник. 2008. № 2. С. 187–195.
6. *Пищальникова Е.В.* Аналитический обзор современного состояния проблемы влияния циклонической деятельности на условия формирования обильных осадков в холодный период года // Географический вестник. 2014. № 1. С. 69–79.
7. *Руководство* по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 356 с.
8. *Семенова О.М.* Анализ и моделирование процессов формирования стока в малоизученных бассейнах (на примере бассейна р. Лены): дис. … канд. геогр. наук. СПб., 2008. 121 с.
9. *Справочник* по климату СССР. Вып. 9. Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области и Башкирская АССР. Ч.4: Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 372 с.
10. *Шихов А.Н., Свиязов Е.М.* Исследование процессов снегонакопления на водосборе Воткинского водохранилища с применением мезомасштабной модели прогноза погоды WRF/ARW // Вестник Удмуртского университета. Сер 6. Биология. Науки о Земле. 2014. № 4. С. 89–99.
11. *Шутов В.А., Калюжный И.Л.* Анализ пространственного распределения зимних осадков и снегозапасов в бассейне р. Белой // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 105–114.
12. *Qiao P., Z.Liu, Y.Qin and D.Qiu.* A spatially distributed snowmelt runoff model based on RS and GIS. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2012. Vol. 1. P. 361-369. DOI: 10.1007/978-3-642-31006-5_43ю
13. *Zhao Q., Liu Z., Ye1 B., Qin Y., Wei Z., and Fang S.* A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM. // Hydrology and Earth Systems sciences (HESS). 2009. Vol. 13(10). P. 925–940.

A.N. Shikhov, E.M. Sviyazov

ESTIMATION OF PRECIPITATION AMOUNT DURING THE COLD PERIOD IN THE WESTERN URALS USING THE WRF MODEL

Using the numerical mesoscale atmospheric model WRF-ARW, the amount of precipitation during the cold period (November to March) in the Votkinsk reservoir catchment area was calculated for 2012-2015 years. Later on, the obtained data are used to calculate snow water equivalent in the catchment area. This article discusses only the calculation of the amount of winter precipitation. It was found that the model systematically overestimates the precipitation amount. During the spring season, the overestimation becomes very significant (1.3-1.6 times). The article discusses the features of the spatial distribution of the forecast errors. It is shown that the greatest disagreement the actual and simulated precipitation characteristic of weather stations located in the deep river valleys. Based on the numerical experiment results, it is found that the choice of cloud microphysics parameterization does not resolve systematic overestimation of simulated precipitations in the spring season.

K e y w o r d s: cold period precipitation, WRF model, forecast errors.

Andrey N. Shikhov, Candidate of Geography, senior lecturer, Department of Cartography and Geoinformatics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, Russia 614990; and3131@inbox.ru

Evgeniy M. Sviyazov, Candidate of Geography, assistant professor, Department of Meteorology and Atmosphere Protection, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, Russia 614990; sviyazov74@mail.ru