

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА СНЕГОТАЯНИЯ НА ЗАПАДНОМ УРАЛЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ WRF/ARW

Шихов А.Н.,¹ Свиязов Е.М.¹

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь, Россия (614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15), e-mail gis@psu.ru

Рассмотрены возможности использования мезомасштабной модели прогноза погоды WRF/ARW для моделирования процесса снеготаяния на Западном Урале, на примере весеннего сезона 2013 г. Установлено, что модель WRF/ARW неудовлетворительно воспроизводит запас воды в снежном покрове и температуру воздуха в начальный период снеготаяния. Это связано с использованием в качестве начальных и граничных условий прогнозных полей глобальной модели GFS/NCEP. В то же время модель позволяет оценивать поступление на водосбор твердых и жидких осадков в период снеготаяния с высоким пространственным разрешением. Во всех случаях сильных снегопадов, зафиксированных в период снеготаяния, модель адекватно воспроизводит локализацию зон осадков и их интенсивность. Моделирование процесса снеготаяния выполнено средствами ГИС-технологий на основе фактических данных о температуре воздуха и прогнозных данных об осадках. Верификация результатов расчета площади снежного покрова проведена на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: снежный покров, снеготаяние, весенние осадки, прогноз, мезомасштабная модель WRF/ARW.

FORECASTING OF THE DYNAMICS OF SNOW MELTING IN THE WESTERN URAL REGION, USING WRF/ARW MESOSCALE MODEL

Shikhov A.N., Sviyazov E.M.

Perm State National Research University, Perm, Russia (614990, Perm, 15 Bukireva street), e-mail: gis@psu.ru

The article analyses the possibilities of using mesoscale weather forecast model WRF/ARW for snowmelt process simulation in the Western Urals region on the example of the spring season 2013. The author shows that the WRF/ARW model incorrectly reproduces the snow water equivalent and the air temperature in the initial period of snowmelt. Those errors are the result of using GFS/NCEP global forecast model as the initial and boundary condition of forecast fields. At the same time, the WRF model allows to evaluate with high spatial resolution the flow of solid and liquid precipitation to the catchment areas during the snowmelt. In all cases of heavy snowfalls observed during snowmelt period the model correctly reproduces the localization of precipitation zones and intensity. The simulation of snowmelt process is made with the use of GIS technologies on the basis of actual air temperature data and forecast precipitation data. The verification of the results of snow cover area evaluation is made on the basis of remote sensing data.

Keywords: snow cover, snowmelt, spring precipitation, forecasting, mesoscale model WRF/ARW.

Введение

Совершенствование методов расчета и прогноза интенсивности снеготаяния в моделях формирования весеннего стока остается весьма актуальной задачей. Традиционно моделирование формирования и таяния снежного покрова выполнялось на основе использования фактических данных гидрометеорологических наблюдений [3]. Однако в настоящее время сокращение сети наблюдений делает невозможным объективный учет пространственного распределения запасов воды в снеге и осадков, выпадающих в период снеготаяния на водосборах рек. В последние годы для решения этих задач применяются мезомасштабные модели прогноза погоды [1; 7; 8]. Использование выходных данных мезомасштабных метеорологических моделей в качестве входа в гидрологические модели позволяет значительно повысить заблаговременность прогноза.

В России опыт применения мезомасштабных метеорологических моделей для решения прогнозных гидрологических задач пока незначителен. Выполнялись расчеты притока воды к Москворецким водохранилищам на основе модели формирования стока ECOMAG, в качестве исходных метеорологических данных для которой использовались результаты счета модели WRF [1]. За рубежом мезомасштабные модели прогноза погоды часто используются в комплексе с гидрологическими моделями, для прогноза талого стока горных рек [7; 8].

Исходные данные и методы исследования

Целью данного исследования была оценка возможности применения мезомасштабной численной модели WRF/ARW для краткосрочного прогноза интенсивности снеготаяния на территории Пермского края. Расчеты были проведены на примере весеннего сезона 2013 г. за период со 2 апреля по 5 мая.

В качестве исходных данных были использованы наблюдения сети метеостанций и прогнозные поля метеорологических величин, полученные по модели WRF/ARW, цифровая модель рельефа и карта типов растительного покрова GlobCover-2009. Прогнозы по модели WRF составлялись с использованием динамического ядра ARW на срок 48 ч, при дальнейших расчетах использовались прогнозные поля только на срок 24 ч. Для параметризации пограничного слоя и турбулентности в модели WRF использовалась схема Меллора-Ямады-Янича, для параметризации процессов на поверхности суши и в почве — схема Noah. Потоки длинноволновой радиации рассчитывались по схеме RRTM, а коротковолновой радиации — по схеме RRTMG. В качестве начальных и граничных условий использовался прогноз GFS/NCEP. Расчет производился для полигона 2000x2000 км, с шагом интегрирования по пространству 10 км. Прогнозные поля метеорологических величин конвертировались в формат геоинформационной системы, для использования при расчете снеготаяния. Все дальнейшие расчеты выполнялись в программном пакете ArcGis 10.1, с пространственным разрешением 3000 м.

Сопоставление фактического и рассчитанного по модели WRF запаса воды в снеге показывает, что модель во всех случаях значительно (в 2–5 раз) занижает его величину. Основной причиной этого является использование в качестве начальных условий прогноза глобальной модели GFS, которая неудовлетворительно воспроизводит процесс накопления снега. В связи с этим максимальный запас воды в снежном покрове перед началом снеготаяния был восстановлен на основе данных о накопленных осадках холодного периода на метеостанциях, отдельно за периоды устойчивого и неустойчивого снегонакопления.

В период устойчивого снегонакопления максимальный запас воды в снежном покрове может быть принят приближенно равным сумме осадков, поскольку испарение снежного покрова и выдувание осадков из осадкомера частично компенсируют друг друга. Введение

поправок на ветровой недоучет и испарение для зимних осадков, рекомендованных в «Справочнике по климату» [5], приводит к значительному завышению снегозапаса. Интерполяция сумм осадков за период устойчивого снегонакопления выполнена по методу В.А. Шутова [6], с учетом вертикального градиента зимних осадков, поправок на уклон и экспозицию макросклонов, и типа подстилающей поверхности. Значения поправочных коэффициентов для различных типов подстилающей поверхности приведены в табл. 1. Вертикальный градиент зимних осадков принят равным 15%/100 м в нижних высотных зонах и 10%/100 м в горах. Аналогичные значения (10–14%/100 м) рекомендованы для территории Северного и Среднего Урала в работе [2], и в «Справочнике по климату СССР» [5].

Для периода осеннего неустойчивого снегонакопления, продолжительность которого на Урале может достигать 30–40 суток, типично монотонное увеличение снегозапаса в горах и на возвышенностях, а на равнинной территории – неоднократное установление и сход снежного покрова. В этот период определялась фаза выпадающих осадков и учитывалось снеготаяние при оттепелях. При определении фазы осадков учитывалась приземная температура воздуха, и температура на изобарических поверхностях 925 и 850 гПа. Снеготаяние при оттепелях рассчитывалось по среднесуточной температуре воздуха. Суммированием запаса воды в снежном покрове за период неустойчивого и устойчивого снегонакопления был получен запас воды в снеге к началу периода снеготаяния.

Расчет поступления талых вод на водосборы рек выполнялся средствами геоинформационной системы ArcGis. В связи со значительной залесенностью исследуемой территории (более 70%) и преобладающей ролью «адвективного» механизма снеготаяния было принято допущение о пропорциональной зависимости интенсивности снеготаяния от среднесуточной температуры воздуха. Используемые значения коэффициентов стаивания для различных типов подстилающей поверхности приведены в табл. 1.

Выходными данными модели являются площадь снежного покрова, водоотдача и запас воды в снеге. Площадь снежного покрова определялась по методу А.Г. Ковзеля, на основе модульных коэффициентов и кривых распределения снегозапаса. Параметры кривых распределения для лесной и безлесной части территории, характерные для бассейна р. Кама, получены из работы [4]. Для озер и водохранилищ задано равномерное распределение снегозапаса. Водоотдача снежного покрова рассчитывалась по известной методике [4], с учетом водоудерживающей способности снега, которая принимается равной для леса – 30%, для поля – 20%. Такие значения, характерные для бассейна Камы, приведены в работе [4]. Также учитывается снижение влагоемкости снега за счет выпадения жидких осадков.

Тип подстилающей поверхности	Коэффициент стаивания, мм/1° положительной среднесуточной	Поправочный коэффициент для расчета запаса воды в снежном
------------------------------	---	---

	температуры воздуха	покрове
Хвойный лес	1,5	0,87
Смешанный лес	2	1,13
Лиственный лес	2,5	1,2
Болото	4	1
Урбанизированные земли	5	0,85
Водохранилища и озера	4,5	0,9
Сельхозугодья	4,5	1
Мозаика с/х угодий и лесов	4	1

Табл. 1. Значения температурных коэффициентов сглаживания и поправочных коэффициентов для расчета снегонакопления

Результаты и их обсуждение

Оценка достоверности прогноза температуры воздуха по модели WRF

В период от начала снеготаяния до схода основной массы снега (на открытых участках местности) модель WRF систематически занижает среднесуточную температуру воздуха. Величина среднеквадратической ошибки прогноза температуры, вычисленной по 34 метеостанциям, в период с 2 по 20 апреля составляет от 2,1 до 5,0°. Наибольшие ошибки прогноза температуры наблюдаются в периоды антициклональной погоды с незначительной облачностью (по среднесуточной температуре от 4 до 7°, по максимальной дневной температуре – до 7–9°). Аналогичное систематическое занижение среднесуточной температуры воздуха в начальный период снеготаяния характерно для глобальной модели GFS. Таким образом, низкая точность прогноза приземной температуры воздуха обуславливает значительную недооценку интенсивности снеготаяния в этот период.

В период после схода снежного покрова на открытой местности величина среднеквадратической ошибки прогноза температуры воздуха сокращается до 0,7–2,3°. Систематическое занижение температуры воздуха не прослеживается по южной части исследуемой территории с 22 апреля, по северу – с 26 апреля, что соответствует фактическим датам схода снежного покрова на открытых участках местности. Сопоставление результатов расчета среднего запаса воды в снежном покрове на территории Пермского края по фактическим и прогнозным данным о температуре воздуха (в обоих случаях использованы прогнозные поля осадков по модели WRF) приведены на рис. 1.

Оценка достоверности прогноза весенних осадков по модели WRF

Модель WRF в целом удовлетворительно воспроизводит осадки, выпадающие в период снеготаяния, в том числе фазу осадков. При шаге интегрирования по пространству 10 км модель также воспроизводит увеличение сумм осадков на наветренных склонах гор, связанное с барьерным эффектом, и уменьшение количества осадков в меридионально ориентированных межгорных понижениях (эффект барьерной тени). Полученные в результате моделирования суммы осадков за период снеготаяния приведены на рис. 2.

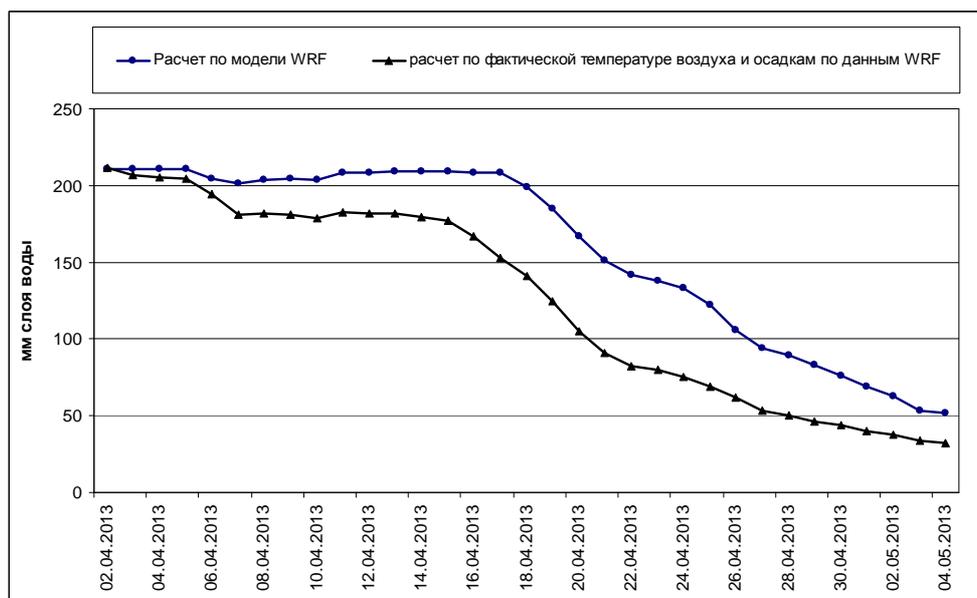


Рис. 1. Сопоставление среднего расчетного снеговзапаса на территории Пермского края, вычисленного по фактическим и прогнозным данным о температуре воздуха

Среднеквадратическая ошибка прогноза суммы осадков за весь исследуемый период (с 2 апреля по 4 мая) составляет 14,7 мм. Наилучшая точность прогноза достигается по западу исследуемой территории. На метеостанциях Коса, Кочевое, Ножовка, Чайковский, Сарапул, Кирс и Глазов относительная ошибка прогноза составляет менее 10%. В ряде случаев наблюдается систематическое завышение прогнозной суммы осадков, наиболее значительное для метеостанций, расположенных к востоку от Уральского хребта (Висим, Кушва, Серов). На 9 метеостанциях сумма осадков завышена более чем на 25%.

Оценка достоверности прогноза сильных осадков в период снеготаяния

Сильные снегопады в первой половине апреля 2013 г. существенно затормозили процесс таяния снежного покрова в северных и юго-западных районах Пермского края. В апреле 2013 г. зафиксировано три случая сильных снегопадов с полусуточной суммой осадков 6–19 мм /12 ч.

1. *Сильный снегопад 02.04.2013 г.* был связан с прохождением теплого фронта западного циклона, наблюдался на севере территории Пермского края и в горных восточных районах. Сумма осадков составила 6–17 мм/12 ч. Модель WRF верно воспроизводит положение зоны наиболее интенсивных осадков, в то же время прогнозные суммы осадков на метеостанциях, расположенных вдоль Уральского хребта, значительно завышены. Коэффициент корреляции фактических и прогнозных сумм осадков на метеостанциях за 12 ч равен 0,6.

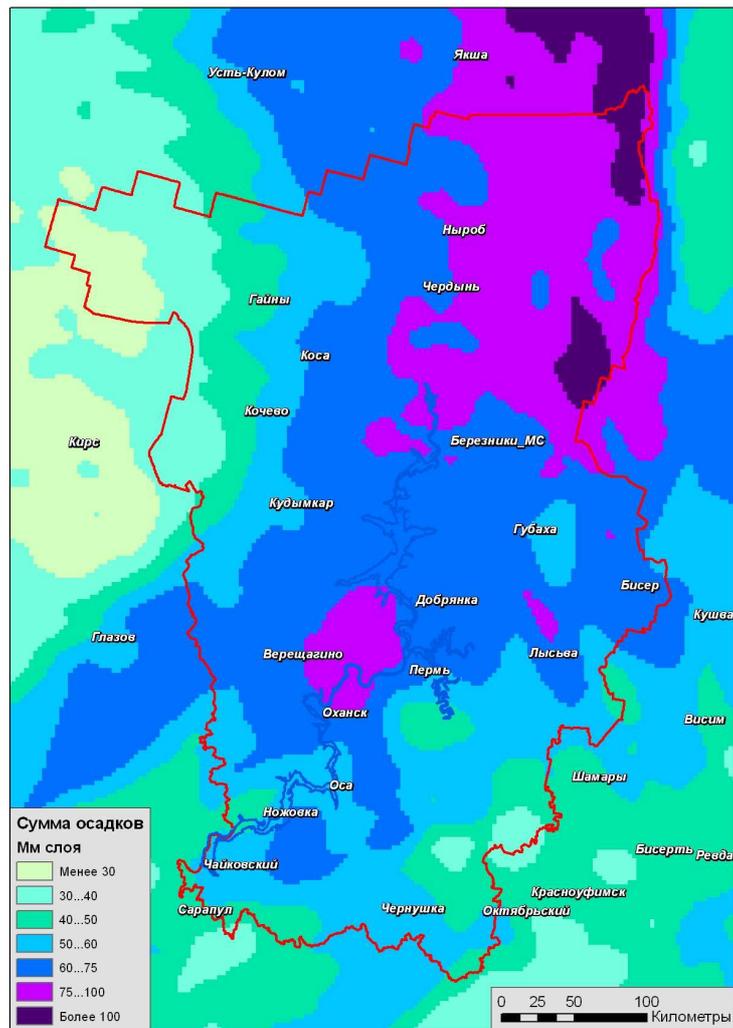


Рис. 2. Сумма осадков за период снеготаяния по результатам моделирования

2. Сильный снегопад 08.04.2013 г., связанный с прохождением фронта окклюзии в тылу юго-западного циклона, зафиксирован метеостанциями Глазов (19 мм/12 ч) и Верецагино (10 мм/12 ч). Модель WRF воспроизводит зону интенсивных осадков (до 20 мм/12 ч) в данном районе, однако на метеостанциях фактическая сумма осадков значительно превышает прогнозную.

3. Сильный снегопад 11.04.2013 г. при прохождении фронта окклюзии каспийского циклона отмечался по южной половине исследуемой территории, сумма осадков составила 6–9 мм/12 ч. В данном случае модель WRF воспроизводит положение зоны интенсивных осадков на 50–100 км севернее, чем она располагалась в действительности. В результате коэффициент корреляции между фактическими и прогнозными суммами осадков на метеостанциях за 12 ч составляет 0,51.

В целом применение прогноза осадков по модели WRF при расчетах снеготаяния значительно эффективнее, чем интерполяция данных наблюдательной сети, которая часто сопровождается значительными ошибками при оценке как количества, так и фазы осадков.

Верификация результатов расчета снеготаяния по данным космической съемки

В связи с низкой достоверностью прогноза приземной температуры воздуха по модели WRF расчеты интенсивности снеготаяния были выполнены по фактическим данным о температуре воздуха и прогнозным данным об осадках. Валидация результатов расчета по площади снежного покрова выполнена на двух масштабных уровнях:

- по всей исследуемой территории – на основе данных Terra/Aqua MODIS;
- на детальном уровне – по снимкам LANDSAT-7 ETM+, и LDSM-8 OLI, с пространственным разрешением 30 м.

В большинстве случаев получено удовлетворительное совпадение фактической и расчетной заснеженности территории. В конце периода снеготаяния наблюдается некоторая переоценка площади снежного покрова на севере Пермского края и в предгорных районах.

Пример сопоставления результатов расчета площади снежного покрова со снимками LANDSAT приведен на рис. 3.

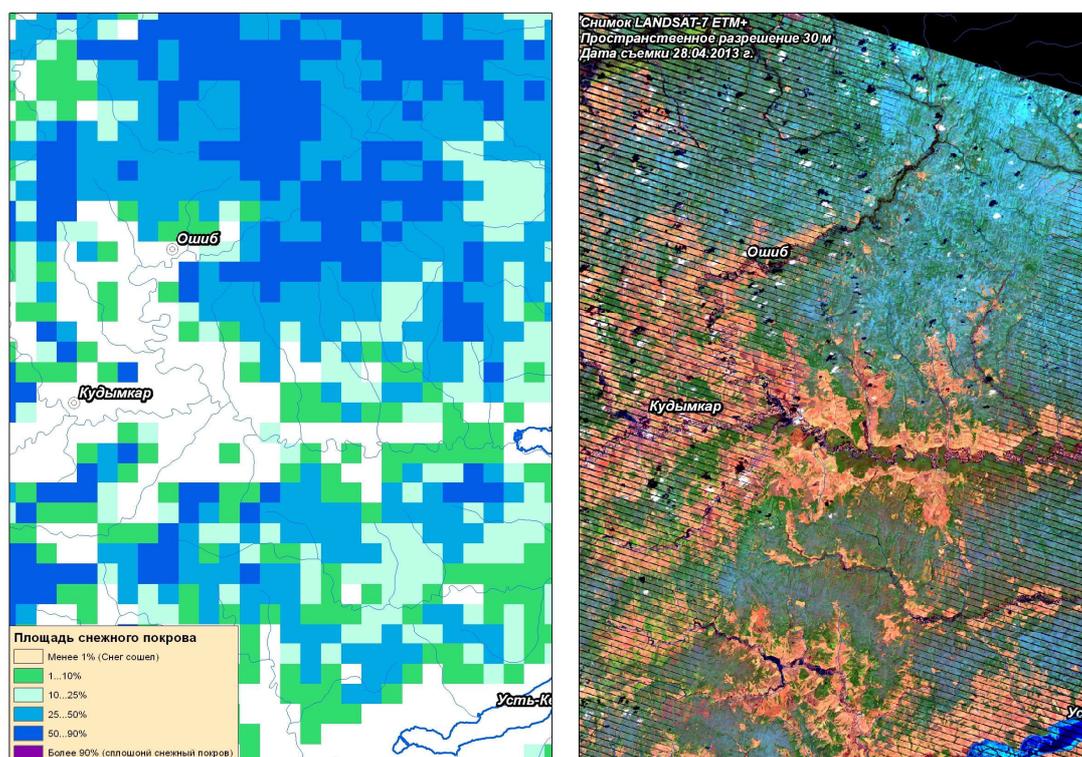


Рис. 3. Сопоставление расчетной и фактической заснеженности в начальный период снеготаяния

Заключение

1. Характеристики снежного покрова, рассчитанные непосредственно моделью WRF/ARW, при использовании в качестве начальных условий прогноза GFS/NCEP, непригодны для практического использования на территории Пермского края.

2. В начальный период снеготаяния наблюдается значительное систематическое занижение среднесуточной температуры воздуха, прогнозируемой по модели WRF/ARW, что не позволяет использовать эти данные для прогноза снеготаяния.
3. Прогноз суммы осадков за период снеготаяния по модели WRF имеет достаточно высокую достоверность, и его использование при расчетах снеготаяния предпочтительно в сравнении с интерполяцией данных сетевых наблюдений.
4. Комплексное использование фактических и модельных (прогнозных) данных позволяет существенно повысить точность расчета снеготаяния даже при использовании приближенных методов расчета.

Исследование выполнено в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, в ходе выполнения работ по Соглашению № 14.В37.21.0636, а также при поддержке гранта РФФИ (проект № 11-05-00858-а).

Список литературы

1. Антохина Е.Н. Водный режим рек Европейской территории России и его изучение на основе модели формирования стока : дис. ... канд. геогр. наук. - М., 2012. - 219 с.
2. Береснева Н.А., Данилова Л.И. Влияние возвышенностей равнины на осадки и влагооборот // Труды ГГО. - 1954. - Вып. 45.
3. Калинин Н.А., Смородин Б.Л. Редкое явление замерзающего дождя в Пермском крае // Метеорология и гидрология. – 2012. - № 8. - С. 27–35.
4. Лебедева Н.Д. Методика краткосрочного прогноза гидрографа притока воды к водохранилищу Камской ГЭС // Труды ЦИП. - М. : Гидрометеиздат, 1963. - Вып. 130. - С. 87–125.
5. Справочник по климату СССР. Вып. 9. Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области и Башкирская АССР. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. - Ч. 4. Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. - 372 с.
6. Шутов В.А., Калужный И.Л. Анализ пространственного распределения зимних осадков и снеготаяния в бассейне р. Белой // Метеорология и гидрология. – 1997. - № 1. - С. 105–114.
7. Pavelsky T., Kapnick S. and Hall A. Accumulation and melt dynamics of snowpack from a multiresolution regional climate model in the central Sierra Nevada, California // Journal of Geophysical Research, 2011, vol. 116, p. 1–18.
8. Zhao Q., Liu Z., Ye 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. 1897-1906.

Рецензенты:

Калинин Н.А., д.г.н., профессор, зав. каф. метеорологии и охраны атмосферы ПГНИУ,
г.Пермь.

Сморозин Б.Л., д.ф.-м.н., профессор каф. физики фазовых переходов ПГНИУ, г. Пермь.