

УДК 551.578.46

Расчет снеговзапасов на крупном водосборе с использованием данных глобальных моделей прогноза погоды

А.Н. Шихов, А.В. Быков

*Пермский государственный национальный исследовательский
университет, г. Пермь, Россия
shikhovan@gmail.com, blexx256@yandex.ru*

Представлена оценка применимости выходных данных глобальных моделей прогноза погоды GFS (NCEP, США), GEM (CMC, Канада) и ICON (DWD, Германия) для расчета сумм осадков холодного периода и запасов воды в снежном покрове на водосборе Воткинского водохранилища (на материалах 2016–2017 гг.). Для валидации результатов использованы данные о суммах осадков с 36 метеостанций, а также снегосъемки по 13 снегомерным маршрутам. На основе сопоставления фактических и прогностических сумм осадков показано, что получение наиболее достоверного прогноза осадков холодного периода обеспечивает модель ICON. Выполнен расчет максимальных снеговзапасов на основе данных о суммах осадков по данным модели CMC/GEM. В среднем по площади водосбора полученные результаты характеризуются удовлетворительным уровнем надежности. В то же время на локальном уровне возникают существенные расхождения расчетных и фактических снеговзапасов.

Ключевые слова: запас воды в снежном покрове, осадки холодного периода, глобальная модель прогноза погоды

Calculation of snow water equivalent on a large basin using global weather forecast models data

A.N. Shikhov, A.V. Bykov

*Perm State University, Perm, Russia
shikhovan@gmail.com, blexx256@yandex.ru*

The estimation of the applicability of the global weather forecast models GFS (NCEP, USA), GEM (CMC, Canada) and ICON (DWD, Germany) output for calculation of the cold period precipitation and snow water equivalent over the catchment area of Votkinsk reservoir basin are presented through the example of the cold season 2016-2017. The validation was carried out according to the precipitation measurements by 36 weather stations, as well as snow surveys data on 13 snow measuring routes. On the basis of a comparison of actual and forecasted precipitation amounts it is shown that the ICON model provides the most reliable precipitation forecast during the cold period. The calculation of maximum snow water equivalent is performed based on precipitation forecasts using the CMC/GEM global atmospheric model. It is shown that the snow water equivalent estimation is of satisfactory reliability on average in the studied basin. However, there are significant differences between the calculations and actual snow water equivalent at the local scale.

Keywords: snow water equivalent, cold period precipitation, global weather forecast model

Распределенное (пространственное) моделирование уже в течение двух десятилетий является важнейшим методом решения многих гидрологических задач [3]. Одной из таких задач является корректный расчет запасов воды в снежном покрове на водосборах рек с учетом неоднородности их пространственного распределения. Существующая редкая сеть метеостанций и снегомерных маршрутов зачастую не позволяет получить необходимый объем данных о пространственном распределении снегозапасов [15]. В связи с этим в последние годы интенсивно разрабатываются методы расчета снегонакопления на основе выходных данных численных моделей прогноза погоды [17].

Сравнительно высокая надежность и пространственная детализация краткосрочного прогноза осадков в холодный период года позволяет применять численные модели прогноза погоды в комплексе с гидрологическими моделями для прогноза весеннего стока рек. Такой подход получил название «coupled modeling» и широко применяется для прогноза стока горных рек, в частности в Альпах [11, 18, 19]. Ряд работ посвящен расчету притока воды в водохранилища на основе комплексного гидрометеорологического моделирования. Подобные исследования проводились как на территории России [1], так и за рубежом [13].

В большинстве случаев для расчета пространственного распределения осадков и снегозапасов в горных районах используются мезомасштабные модели прогноза погоды с горизонтальным шагом сетки 1–10 км. Так, в [16] для запуска гидрологической модели и прогноза стока с водосбора площадью 1100 км² использовалась модель MM5 с горизонтальным шагом сетки 2 км. В [11] применили прогностическую модель COSMO-Ru7 для прогнозирования поступления талых вод и осадков на водосбор площадью 336 км². В [18] для расчета характеристик снежного покрова в пределах Пиренейского горного массива использовалась модель AROME, разработанная Meteo France, с горизонтальным шагом сетки 2,5 км. В ряде работ в качестве источника метеорологических данных для прогноза талого стока горных рек использовалась модель WRF [20].

Расчет характеристик снежного покрова на основе выходных данных моделей прогноза погоды представляет интерес и для крупных речных бассейнов, особенно в регионах с редкой наблюдательной сетью, к которым можно отнести большую часть территории России. В зависимости от площади бассейна для этого могут использоваться данные как мезомасштабных, так и глобальных моделей атмосферы. Преимуществом последних является открытый доступ к прогностическим данным, которые публикуются в оперативном режиме на серверах ряда национальных метеослужб, в частности США, Канады и Германии.

Происходящий в последние годы рост пространственного разрешения глобальных моделей атмосферы (до 10–25 км) позволяет использовать их выходные данные для расчета снегозапасов на крупных водосборах. Однако характеристики снежного покрова, вычисленные непосредственно

по глобальным моделям прогноза погоды, часто содержат существенные ошибки, которые могут быть связаны, например, с оценкой плотности снега [12]. Более перспективным представляется расчет снеготопливных запасов на основе сумм осадков холодного периода, прогноз которых отличается сравнительно высокой надежностью.

Целью настоящей работы является оценка возможности применения глобальных моделей прогноза погоды GFS (NCEP, США), GEM (CMC, Канада) и ICON (DWD, Германия) для расчета сумм осадков холодного периода и запасов воды в снежном покрове на водосборе Воткинского водохранилища ($S = 184319 \text{ км}^2$). Расчеты производились на основе данных за холодный период 2016–2017 гг. Ранее, в 2012–2015 гг., для данного водосбора было проведено моделирование запасов воды в снежном покрове на основе выходных данных модели WRF с шагом сетки 10 км [14]. В большинстве случаев ошибка при расчете максимального запаса воды в снеге не превышала 25 % от его величины, что можно считать удовлетворительным результатом. Нерешенной проблемой осталось значительное (на 30–50 %) завышение сумм осадков по модели WRF в конце периода снегонакопления (февраль–март), что приводит к систематическому завышению снеготопливного запаса [9]. В отдельных случаях также отмечалось существенное (на 100–150 км) смещение прогностического положения зон интенсивных осадков относительно их фактического положения, обусловленное неточностью начальных данных для запуска модели WRF (глобального анализа и прогноза GFS/NCEP) [4].

Использование других моделей прогноза погоды (в первую очередь глобальных моделей, данные которых находятся в свободном доступе) может рассматриваться как способ устранения выявленных систематических ошибок. Стоит также отметить, что исследования применимости общедоступных данных глобальных моделей прогноза погоды для расчета снеготопливных запасов в России ранее не проводились.

Исходные данные и методы исследования

Исследования проведены для территории водосбора Воткинского водохранилища ($S = 184319 \text{ км}^2$). Продолжительность залегания снежного покрова на водосборе составляет от 150–160 дней на юге до 210 дней на северо-востоке территории. Максимальный влагозапас снега на равнинной части водосбора составляет в среднем 130–180 мм (на возвышенностях до 250 мм), а в горной части достигает 300 мм и более [7].

В настоящей работе использовались прогнозы осадков холодного периода по трем глобальным моделям атмосферы, выходные данные которых в формате GRIB2 публикуются на серверах национальных метеослужб:

- модель GFS, разрабатываемая в Национальном центре прогнозирования окружающей среды (NCEP, США). В настоящее время ее шаг сетки составляет примерно 13 км, модель имеет 64 вертикальных уровня;

- модель GEM, разрабатываемая Канадской метеорологической службой (СМС). Шаг сетки этой модели составляет $0,13^\circ$, модель имеет 120 вертикальных уровней. Выходные данные модели пересчитываются на сетку с шагом $0,24^\circ$;

- модель ICON, разрабатываемая метеослужбой Германии (DWD). Данная модель является негидростатической, имеет шаг сетки 13 км и 90 вертикальных уровней. Ее особенностью является использование икосаэдральной треугольной сетки.

Обзор перечисленных прогностических моделей представлен в [8].

Данные модели GEM были получены за весь период снегонакопления, на их основе производился расчет запасов воды в снежном покрове. Данные моделей GFS и ICON были получены за период с января по апрель 2017 года. Они использовались только для оценки сумм осадков за этот период и сравнения с данными наблюдательной сети.

Достоверность результатов расчета оценивалась путем сопоставления фактических и прогностических месячных сумм осадков по 36 метеостанциям, расположенным в пределах водосбора Воткинского водохранилища и в сопредельных районах. Расчет месячного количества осадков производился путем суммирования за каждые сутки. Использовались результаты счета моделей от 00 ч ВСВ на срок 3 и 27 ч, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения количества осадков на метеостанциях. Извлечение результатов счета моделей и сопоставление с данными метеостанций выполнялось с помощью программного обеспечения NDFD tkDegrib и ArcGis 10 (ESRI, США).

Для оценки достоверности использовались следующие критерии:

– средняя абсолютная ошибка прогноза

$$\Delta \bar{X} = \sum (X_{\phi} - X_{\Pi}) / n,$$

где $\Delta \bar{X}$ – средняя абсолютная ошибка прогноза количества осадков за месяц; n – число метеостанций, по которым выполнялось сопоставление (в данном случае $n = 36$); X_{ϕ} – месячная сумма осадков по данным метеостанции; X_{Π} – месячная сумма осадков по модельным данным;

– среднеквадратичная ошибка прогноза (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{\phi} - X_{\Pi})^2};$$

– отношение RMSE к среднему фактическому количеству осадков.

Методика расчета снегов запасов в целом аналогична использованной ранее применительно к данным модели WRF [4]. Она основана на суммировании осадков холодного периода, полученных по выходным данным модели, с учетом их фазы, таяния снега при оттепелях, испарения с поверхности снежного покрова и перехвата осадков растительностью. Для выполнения расчетов использовались следующие входные данные:

- прогностические поля твердых и жидких осадков, а также скорости ветра, полученные по глобальной модели атмосферы GEM с шагом сетки 0,24°;
- срочные данные наблюдений 36 метеостанций, расположенных как на территории водосбора, так и за его пределами (температура воздуха, температура точки росы, суточные суммы осадков);
- данные о подстилающей поверхности: цифровая модель рельефа водосбора, полученная на основе матрицы высот GMTED2010, карта типов растительности, созданная на основе разносезонных снимков Terra/Aqua MODIS.

Матрица высот, используемая в модели GEM, имеет размер ячейки 0,24°. Для получения реалистичных данных о пространственном распределении снегозапаса такое разрешение явно недостаточно. Учитывая это, была вычислена разность между матрицей высот, используемой в модели GEM, и более детальной моделью рельефа с шагом сетки 1000 м. Для каждой ячейки модели был задан вертикальный градиент осадков, принятый равным 10% / 100м [6]. Таким образом, в ячейках, реальная высота которых больше (меньше), чем по матрице высот, используемой в модели GEM, сумма осадков увеличивалась (уменьшалась) пропорционально разности высот. Это позволило получить более адекватные данные о запасах воды в снеге в районах с пересеченным рельефом.

Расходная составляющая баланса снежного покрова включает потери на снеготаяние и испарение. Интенсивность снеготаяния при оттепелях рассчитывалась по температурным коэффициентам стаивания (мм/1°C). Значения коэффициентов определялись путем калибровки с учетом типа подстилающей поверхности (минимальное значение, равное 1,5 мм/1°C для темнохвойных лесов, а максимальное – 5 мм/1°C для урбанизированных территорий).

Расчет испарения снежного покрова за холодный период производился по методике, описанной в работе [5];

$$E_{sum} = E_i + E; \quad (1)$$

где E_i – испарение перехваченных растительностью твердых осадков; E – испарение с поверхности снега:

$$E_i = k \cdot d \cdot LAI \cdot n, \quad (2)$$

где LAI – листовой индекс; d – средний за период дефицит влажности; n – число дней; k – эмпирический коэффициент (был принят равным 0,03).

$$E_i = (0,24 + 0,05 \cdot U_{10}) \cdot d \cdot n, \quad (3),$$

где U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м.

Листовой индекс LAI был получен на основе тематического продукта обработки спутниковых данных MODIS – MOD15A2 (8-day LAI and FPAR). Данные были получены с веб-сервиса NASA

(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>) с детальностью 1000 м. Используются данные за март 2015 года, что связано с наличием полностью безоблачных снимков за этот период. Результаты расчета испарения со снежного покрова за холодный период представлены на рис. 1. Средняя величина потерь снежного покрова на испарение за холодный период 2016–2017 гг. (с ноября по март) достигла 27 мм, а максимальная – более 60 мм.

Также для сравнения был произведен расчет максимального запаса воды в снеге (по состоянию на 10 марта) на основе интерполяции фактических данных о количестве осадков холодного периода на метеостанциях (с учетом фазы осадков и снеготаяния при оттепелях). Как известно, количество твердых осадков по данным метеостанций существенно занижается вследствие выдувания из осадкомера [2]. В связи с этим при расчете снеговзапасов по станционным данным об осадках использовалось предположение о том, что выдувание и испарение со снежного покрова частично компенсируют друг друга, и расчет испарения не производился.

Интерполяция сумм осадков выполнялась по методике, предложенной В.А. Шутовым [10]. Вертикальный градиент количества осадков был принят равным 10 % / 100 м высоты. Также вводились поправки на тип подстилающей поверхности для приближенного учета процесса перехвата осадков и их последующего испарения с крон деревьев. Более подробное описание данной методики приведено в [6].

Валидация результатов расчета запасов воды в снежном покрове выполнена по данным маршрутных снегомерных съемок на метеостанциях, предоставленным Пермским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Результаты оценки достоверности расчета месячных сумм осадков по моделям GFS, GEM и ICON

Результаты сопоставления фактических (средних по данным 36 метеостанций) и прогностических сумм осадков по моделям GFS, GEM и ICON приведены на рис. 2. Анализ средних абсолютных ошибок расчета месячных сумм осадков показывает, что для моделей GFS и GEM характерно систематическое завышение количества осадков в холодный период года. Данная тенденция наиболее выражена в марте и апреле (рис. 2 а). Количество осадков по данным модели GFS в марте и апреле 2017 г. превышает фактические суммы осадков в среднем в два раза. По этой причине данные модели GFS в ее современной конфигурации не могут быть использованы для расчета снегонакопления с приемлемой точностью. В середине холодного периода (в январе-феврале) завышение сумм осадков по модели GFS выражено менее значительно, чем весной. Среднеквадратичная ошибка расчета месячных сумм осадков по модели GFS в середине холодного периода составляет 35–40 % от среднего фактического количества осадков, а в марте-апреле значительно увеличивается (рис 2 б).

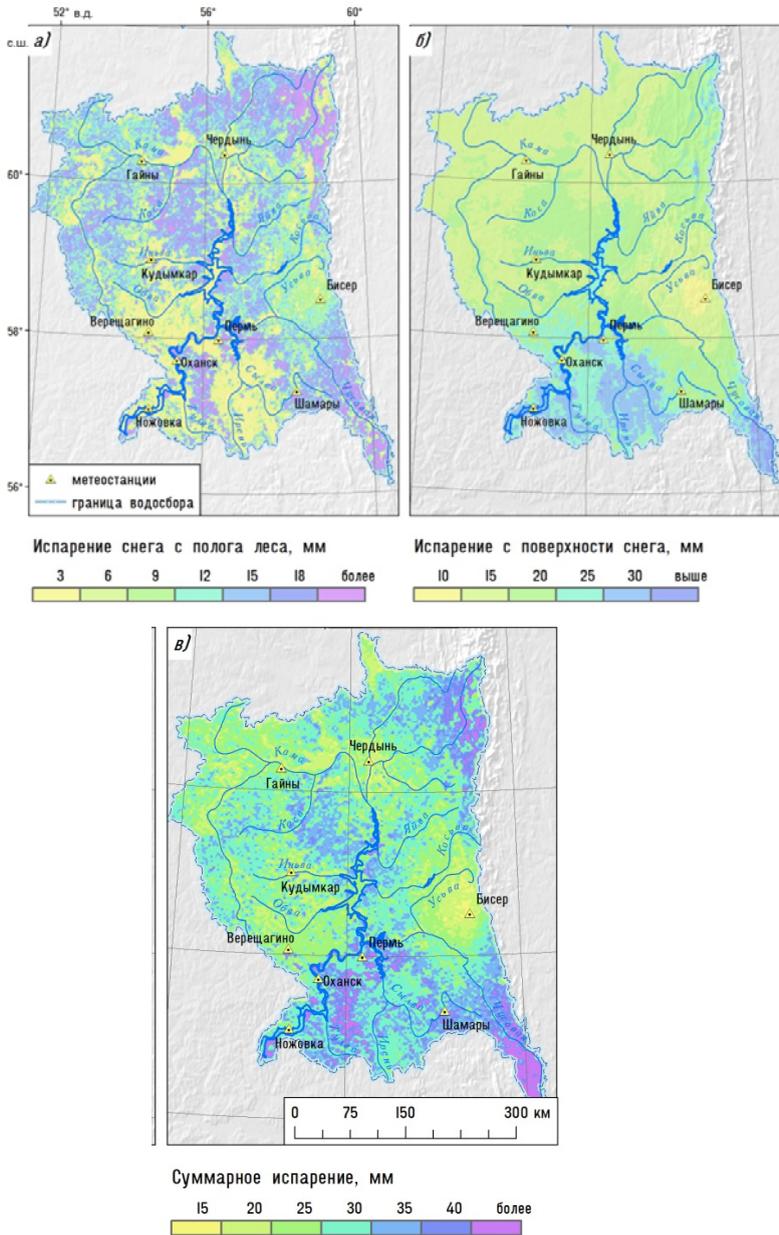


Рис. 1. Потери снежного покрова на испарение за холодный период 2016–2017 гг.: испарение с кроны деревьев (а); испарение с поверхности снежного покрова (б); суммарное испарение (в).

Fig 1. Losses in the snow cover owing to evaporation during the cold period of 2016–2017: evaporation from trees crowns (а); evaporation from the snow cover surface (б); total evaporation (в).

Модель СМС/GEM также завышает месячные суммы осадков в течение всего холодного периода. Минимальное завышение (в среднем на 10 %) наблюдалось в январе, а максимальное (в среднем на 65 %) – в марте. Среднеквадратичная ошибка расчета месячных сумм осадков по модели GEM в период с ноября по февраль составляла 28–42 % от фактического количества осадков, а в марте увеличилась до 77 % (рис. 2 б). Таким образом, прогнозы сумм осадков за холодный период по модели GEM имеют удовлетворительный уровень точности и могут использоваться для расчета снегозапасов.

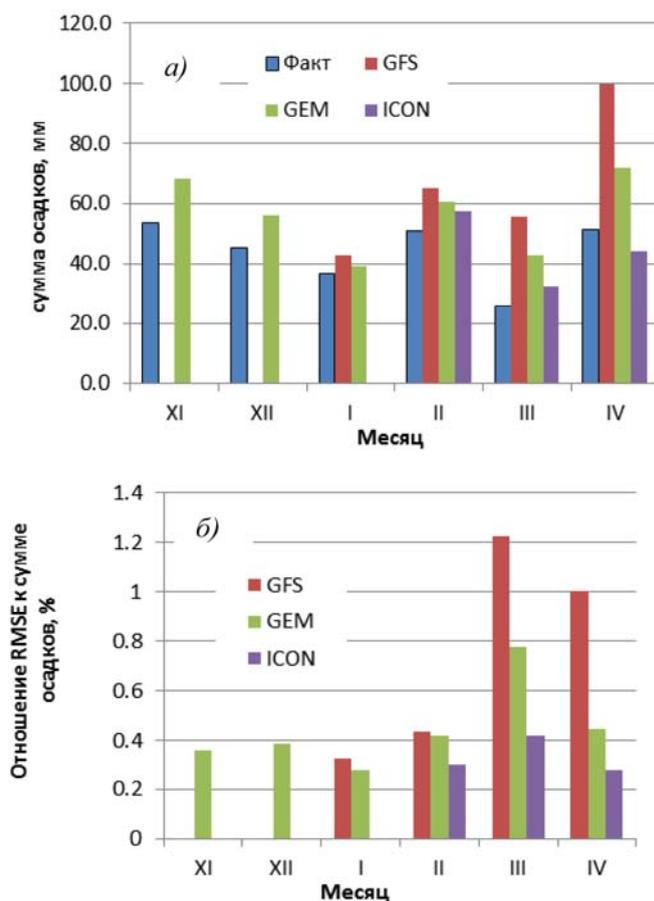


Рис. 2. Оценка достоверности расчета месячных сумм осадков по глобальным моделям: суммы осадков, мм (а); отношения среднеквадратичной ошибки расчета к фактической сумме осадков, % (б).

Fig. 2. Estimation of the reliability of the calculation of monthly precipitation amount using global models: precipitation amount, mm (a); relation of the mean square error of the calculation to the actual precipitation amount, % (б).

Для модели ICON, в отличие от моделей GFS и GEM, не характерно систематическое завышение количества осадков в период снегонакопления. В апреле 2017 года среднее количество осадков по метеостанциям региона, рассчитанное по модели ICON, оказалось на 8 мм ниже фактического. Среднеквадратичная ошибка расчета месячных сумм осадков по модели ICON существенно меньше, чем по моделям GFS и GEM, и составляет 28–41 % от фактического значения (рис. 2 б). Потенциально данные модели ICON наиболее пригодны для расчета снегозапасов. Однако прогнозы осадков по модели ICON были получены только с февраля 2017 года, что также связано с проведенным в начале 2017 года обновлением данной модели.

Наибольшее завышение сумм осадков по моделям (в 2–3 раза и более) характерно для метеостанций, расположенных в глубоких долинах рек (например, метеостанции Висим или Оса). Это вполне ожидаемо, поскольку такие элементы орографии, как речные долины, существенно меньше горизонтального шага сетки глобальной модели атмосферы. В то же время для метеостанций, расположенных на возвышенных формах рельефа (например, метеостанции Бисер) завышение прогностических сумм осадков практически не выражено. Сходные оценки были получены и для модели WRF по результатам анализа прогнозов осадков холодного периода за 2012–2015 гг. [9].

Результаты оценки достоверности расчета снегозапасов на основе данных модели GEM

Результаты расчета запасов воды в снежном покрове по состоянию на 15.03.2017 г. по данным сети метеостанций и по модели GEM представлены на рис. 3.

Динамика запасов воды в снеге за холодный период 2016–2017 гг., осредненных по площади водосбора, показана на рис. 4. Можно отметить, что в среднем по площади водосбора расхождения величины снегозапасов, рассчитанных различными способами, не превышают 15 %. Однако пространственное распределение снегозапасов различается весьма существенно. По результатам расчета по фактическим данным наблюдений, выделяются две области с максимальным снегонакоплением – на западном склоне Среднего Урала (вблизи 59° с. ш., 57° в. д.), а также на севере территории в районе Чердыни (рис. 3 а). В этих районах выпало наибольшее количество осадков, что обусловлено барьерным эффектом Уральско-го хребта.

По результатам расчета снегозапасов на основе данных модели GEM также выделяются две зоны с максимальным снегонакоплением. Первая соответствует западному склону Северного и Среднего Урала, а вторая – юго-западной части водосбора (рис. 3 б). Максимум снегозапасов на юго-западе территории обусловлен, по всей видимости, влиянием Тулвинской возвышенности. Однако по результатам сопоставления с данными

снегомерных съемок наличие этого максимума не подтверждается. Кроме того, именно на этой территории, в пределах которой расположены метеостанции Ножовка, Оханск и Оса, наблюдалось наибольшее расхождение фактических и расчетных сумм осадков.

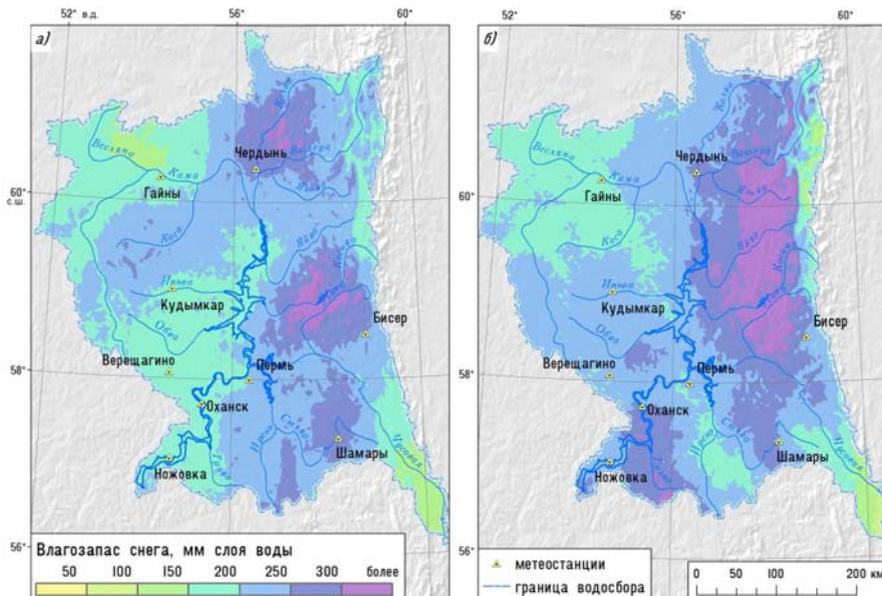


Рис. 3. Запас воды в снежном покрове на 10.03.2017 г.: расчет на основе данных сети метеостанций (а), расчет по данным модели GEM (б).

Fig. 3. Water equivalent of in the snow cover for 10.03.2017: calculation on the basis of the data of synoptic stations network (а), calculation using the data of the model GEM (б).

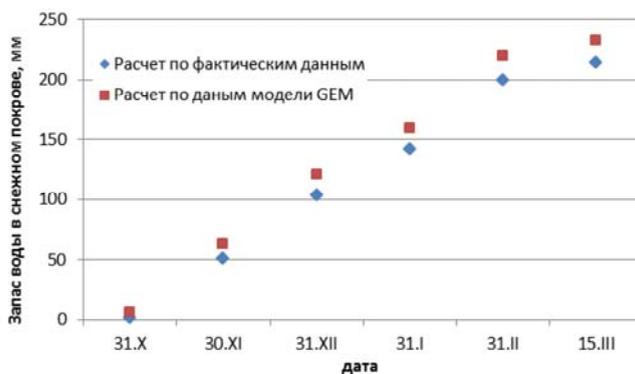


Рис. 4. Динамика расчетного снегозапаса, осредненного по площади водосбора Воткинского водохранилища за холодный период 2016–2017 гг.

Fig. 4. Dynamics of the snow store to be calculated averaged over the watershed area of the Votkin reservoir during the cold season 2016–2017.

Области с минимальными снегозапасами по результатам расчетов в основном совпадают – это крайний юго-восток и северо-восток, а также северо-запад территории водосбора. Также по данным модели GEM выявлен локальный минимум на юго-востоке территории в районе г. Кунгур.

В целом холодный период 2016–2017 гг. характеризовался избыточным снегонакоплением, которое было обусловлено ранним установлением снежного покрова (в последние дни октября), преобладанием аномально холодной погоды и отсутствием оттепелей в ноябре, а также избытком осадков в отдельные месяцы холодного периода. Наибольшее количество осадков выпало в ноябре на юге территории водосбора (150–200 % от нормы, причем все они выпали в виде снега). В феврале избыток осадков наблюдался уже в горной восточной части водосбора, где выпало до двух месячных норм. В то же время на крайнем северо-востоке территории водосбора осадков было меньше обычного, в результате в осевой части Северного Урала снегозапас оказался меньше нормы.

Для оценки достоверности расчета снегозапасов использованы данные снегомерных съемок на 13 маршрутах. Среднеквадратичная ошибка расчета снегозапасов по состоянию на 10.03.2017 г. по данным модели GEM составляет 64 мм, а по фактическим данным – 44 мм, соответственно, 30 и 21 % от среднего запаса воды в снеге по данным 13 снегомерных маршрутов. При этом в большинстве случаев при расчете по данным модели GEM наблюдается завышение, а по фактическим данным – занижение снегозапаса (рис. 5).

По северу территории водосбора расчет по обоим методам характеризуется высокой степенью достоверности. Основные расхождения характерны для южной части территории. Так, на юго-западе территории водосбора расчетный (по модели GEM) запас воды в снеге превышает фактический в полтора раза и более (рис. 5 г). Точность расчета снегозапасов по фактическим данным в этой зоне существенно выше.

Стоит отметить, что в 2017 году не были получены данные снегомерных съемок по горной части водосбора. Пространственное распределение снегозапасов на Северном Урале по модели GEM (рис. 3 б) представляется более реалистичным, чем результат расчета по фактическим данным, учитывая также то, что в горной части водосбора расположены лишь три метеостанции. Этого недостаточно для корректной интерполяции данных о накопленных осадках и расчета снегозапасов.

Заключение

Совершенствование глобальных моделей прогноза погоды позволяет использовать их выходные данные для решения новых задач, в том числе для моделирования процесса снегонакопления и расчета снегозапасов на крупных водосборах. Проведенное на материалах 2016–2017 гг. исследование применимости данных трех глобальных прогностических моделей для расчета сумм осадков холодного периода и снегозапасов на водосборе Воткинского водохранилища демонстрирует перспективность такого

подхода. Показано, что получение наиболее достоверного прогноза сумм осадков холодного периода обеспечивает модель ICON. В отличие от моделей GFS и GEM, модель ICON не завышает суммы осадков в конце периода снегонакопления. Этот вывод представляется достаточно важным, поскольку аналогичное систематическое завышение количества осадков было характерно и для мезомасштабной модели WRF [14].

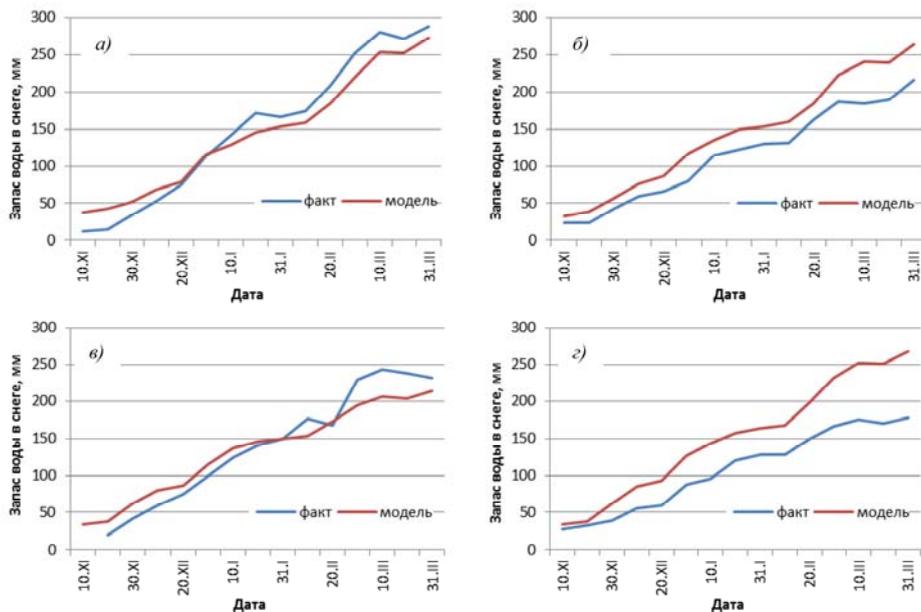


Рис. 5. Сопоставление фактического (по данным снегомерных съемок) и расчетного (по данным модели GEM) запаса воды в снежном покрове на метеостанциях: Чердынь(а), Кудымкар(б), Пермь(в), Оханск(г).

Fig. 5. Comparison of the actual (according to the data of snow survey) and simulated (according to the data of the GEM model) snow water store at the meteorological stations Cherdyn' (а), Kudymcar (б), Perm (в), Okhansk (г).

Также установлено, что находящиеся в открытом доступе данные глобальной модели прогноза погоды СМС/GEM могут использоваться для расчета снеговзапасов на крупном водосборе. В среднем по площади водосбора полученные результаты характеризуются удовлетворительным уровнем надежности и могут быть использованы, например, для прогноза притока воды в водохранилища в период весеннего половодья. В то же время на локальном уровне возникают существенные расхождения расчетных и фактических снеговзапасов, которые обусловлены сильным завышением сумм осадков по модели GEM в южной части водосбора.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проекты № 17-05-01001-А, 16-35-0410-мол-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.: МГУ, 2012. 219 с.
2. Гаврилова С.Ю. Устранение неоднородности временных рядов атмосферных осадков и их использование для анализа изменений режима увлажнения на территории России: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб, 2010. 111 с.
3. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Некоторые аспекты применения геоинформационных технологий в гидрологии // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 71-78.
4. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. 308 с.
5. Карпечко Ю.В., Бондарик Н.Л. Гидрологическая роль лесохозяйственных и лесопромышленных работ в таежной зоне Европейского Севера России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 225 с.
6. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2014. 296 с.
7. Пьянков С.В., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Атлас опасных гидрометеорологических явлений Уральского Прикамья. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2016. 116 с.
8. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 359. С. 5-32.
9. Шихов А.Н., Связлов Е.М. Оценка сумм осадков за холодный период на Западном Урале с помощью модели WRF // Географический вестник. 2015. № 3(34). С. 67-74.
10. Шутлов В.А. Методы анализа разномасштабной пространственной изменчивости снеготпасов // Известия РАН. Серия геогр. 1998. № 1. С. 122-132.
11. Addor N., Jaun S., Fundel F., Zappa M. An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): Skill, case studies and scenarios // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011. Vol. 15. P. 2327-2347.
12. Dawson N., Broxton P., Zeng X., Leuthold M., Barlage M., Holbrook P. An evaluation of snow initializations in NCEP global and regional forecasting models // J. Hydrometeorology. 2016. Vol. 17(6). P. 1885-1901.
13. Georgakakos K.P., Graham N.E., Modrick T.M., Murphy M.J., Shamir E., Spencer C.R., Sperflage J.A. Evaluation of real-time hydrometeorological ensemble prediction on hydrologic scales in Northern California // J. Hydrology. 2014. Vol. 519. P. 2978-3000.
14. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Sviyazov E.M. Simulation of snow accumulation and melt in the Votkinsk Reservoir catchment using the WRF-ARW model // Russ. Meteorol. Hydrol. 2015. Vol. 40(11). P. 749-757.
15. Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2010. Vol. 14. P. 339-350.
16. Kunstmann H., Stadler C. High resolution distributed atmospheric-hydrological modeling for Alpine catchments // J. Hydrology. 2005. Vol. 314. P. 105-124.
17. MacDonald M.K., Davison B.J., Mekonnen M.A., Pietroniro A. Comparison of land surface scheme simulations with field observations versus atmospheric model output as forcing // Hydrol. Sci. J. 2016. Vol. 61(16). P. 2860-2871.
18. Quéno L., Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M., Karbou F. Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometeric-resolution meteorological forecasts // Cryosphere. 2016. Vol. 10. P. 1571-1589.
19. Verbunt M., Zappa M., Gurtz J., Kaufmann P. Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin // J. Hydrology. 2006. Vol. 324. P. 224-238.
20. Zhao Q., Liu Z., Ye B., Qin Y., Wei Z. & Fang S. A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2009. Vol. 13. P. 1897-1906.

References

1. Antokhina E.N. Vodnyj rezhim rek Evropejskoj territorii Rossii i ego izuchenie na osnove modeli formirovaniya stoka: dissertatsiya kandidata geograficheskikh nauk. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2012, 219 p. [in Russ.].

2. Gavrilova S.Yu. Ustranenie neodnorodnosti vremennyh ryadov atmosferynyh osadkov i ih ispol'zovanie dlya analiza izmenenij rezhima uvlazhneniya na territorii Rossii: avtoreferat dissertatsii kandidata geograficheskikh nauk. St. Petersburg, 2010, 111 p. [in Russ.].
3. Kalinin V.G., P'yankov S.V. Nekotorye aspekty primeneniya geoinformatsionnyh tekhnologij v gidrologii [Some Aspects of Application of Geoinformation Technologies to Hydrology]. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2000, no. 12, pp. 71-78. [in Russ.].
4. Kalinin N.A. Monitoring, modelirovanie i prognoz sostoyaniya atmosfery v umerennyh shirotah [Monitoring, simulation and atmospheric conditions forecasting in temperate latitudes]. Perm: Perm State Univ. Publ., 2015, 308 p. [in Russ.].
5. Karpechko Y.V., Bondarik N.L. Gidrologicheskaya rol' lesozhonyajstvennyh i lesopromyshlennyh rabot v taezhnoj zone Evropejskogo Severa Rossii. Petrozavodsk, Karelian Karel'skii nauchnyi tsentr RAN Publ. [Research Center Russian Academy of Sciences], 2018, 225 p. [in Russ.].
6. Pyankov S.V., Shikhov A.N. Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya: rezhim, monitoring, prognoz [The hazardous hydrometeorological phenomena: regime, monitoring and forecasting]. Perm: Perm State Univ Publ., 2014, 296 p. [in Russ.].
7. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Abdullin R.K. Atlas opasnyh gidrometeorologicheskikh yavlenij Ural'skogo Prikam'ya [Atlas of hazardous hydrometeorological phenomena of Ural Prikam'e region]. Perm: Perm State Univ. Publ., 2016, 116 p. [in Russ.].
8. Tolstykh M.A. Global'nye modeli atmosfery: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Global atmosphere models: current state and development plans]. *Trudy Gidrometcentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia], 2016, vol. 359, pp. 5-32. [in Russ.].
9. Shikhov A.N., Sviyazov E.M. Ocenka summ osadkov za holodnyj period na Zapadnom Urale s pomoshch'yu modeli WRF [Estimation of precipitation amount during the cold period in the Western Urals using the WRF model]. *Geograficheskij vestnik* [Geographical bulletin], 2015, vol. 3, no. 34, pp. 67-74. DOI: 10.17072/2079-7877-2015-3-67-73. [in Russ.].
10. Shutov V. A. Metody analiza raznomasshtabnoj prostranstvennoj izmenchivosti snegozapasov. *Izvestiya Rossijskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 1998, no. 1, pp. 122-132. [in Russ.].
11. Addor N., Jaun S., Fundel F., Zappa M. An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): Skill, case studies and scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2011, vol. 15, pp. 2327-2347, DOI:10.5194/hess-15-2327-2011.
12. Dawson N., Broxton P., Zeng X., Leuthold M., Barlage M., Holbrook P. An evaluation of snow initializations in NCEP global and regional forecasting models. *J. Hydrometeorology*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 1885-1901, DOI: 10.1175/JHM-D-15-0227.1.
13. Georgakakos K.P., Graham N.E., Modrick T.M., Murphy M.J., Shamir E., Spencer C.R., Sperflage J.A. Evaluation of real-time hydrometeorological ensemble prediction on hydrologic scales in Northern California. *J. Hydrology*, 2014, vol. 519, pp. 2978-3000, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.032.
14. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Sviyazov E.M. Simulation of snow accumulation and melt in the Votkinsk Reservoir catchment using the WRF-ARW model. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2015, vol. 40, no. 11, pp. 749-757, DOI: 10.3103/S1068373915110059.
15. Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2010, vol. 14, pp. 339-350, DOI: 10.5194/hess-14-339-2010.
16. Kunstmann H., Stadler C. High resolution distributed atmospheric-hydrological modeling for Alpine catchments. *J. Hydrology*, 2005, vol. 314, pp. 105-124, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.033.
17. MacDonald M.K., Davison B.J., Mekonnen M.A., Pietroniro A. Comparison of land surface scheme simulations with field observations versus atmospheric model output as forcing. *Hydrol. Sci. J.*, 2016, vol. 61, no. 16, pp. 2860-2871, DOI: 10.1080/02626667.2016.1177185.
18. Quéno L., Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M., Karbou F. Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometer-resolution meteorological forecast. *Cryosphere*, 2016, vol. 10, pp. 1571-1589, DOI: 10.5194/tc-10-1571-2016.

19. Verbunt M., Zappa M., Gurtz J., Kaufmann P. Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. *J. Hydrology.*, 2006, vol. 324, pp. 224-238, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.036.
20. Zhao Q., Liu Z., Ye B., Qin Y., Wei Z. & Fang S. A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2009, vol. 13, is. 10, pp. 1897-1906, DOI: 10.5194/hess-13-1897-2009.

*Поступила в редакцию 23.05.2017 г.
Received by the editor 23.05.2017.*