

Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды

© 2019 г. С.В. Пьянков¹, А.Н. Шихов^{1*}, П.Г. Михайлюкова²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия;

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*and3131@inbox.ru

Simulation of snow accumulation and melting in the Kama river basin using data from global prognostic models

S.V. Pyankov¹, A.N. Shikhov^{1*}, P.G. Mikhaylyukova²

¹Perm State National Research University, Perm, Russia;

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*and3131@inbox.ru

Received January 18, 2019 / Revised March 21, 2019 / Accepted June 13, 2019

Keywords: GIS-technologies, global atmospheric models, Kama river basin, snow accumulation, snow water equivalent, sublimation and melting.

Summary

Currently, the improvement of numerical models of weather forecasting allows using them for hydrological problems, including calculations of snow water equivalent (SWE) or snow storage. In this paper, we discuss the applicability of daily precipitation forecasts for three global atmospheric models: GFS (USA), GEM (Canada) and PL-AV (Russia) for calculating snow storage (SWE) in the Kama river basin for the cold season of 2017–2018. As the main components of the balance of snow storages the following parameters were taken into account: precipitation (with regard for the phase); snow melting during thaws; evaporation from the surface of the snow cover; interception of solid precipitation by forest vegetation. The calculation of snow accumulation and melting was based on empirical methods and performed with the GIS technologies. The degree-day factor was used to calculate snowmelt intensity, and snow sublimation was estimated by P.P. Kuz'min formula. The accuracy of numerical precipitation forecasts was estimated by comparing the results with the data of 101 weather stations. Materials of 40 field and 27 forest snow-measuring routes were taken into account to assess the reliability of the calculation of snow storages (SWE). During the snowmelt period, the part of the snow-covered area of the basin was also calculated using satellite images of Terra/Aqua MODIS on the basis of the NDFSI index. The most important result is that under conditions of 2017/18 the mean square error of calculating the maximum snow storage by the GFS, GEM and PL-AB models was less than 25% of its measured values. It is difficult to determine which model provides the maximum accuracy of the snow storage calculation since each one has individual limitations. According to the PL-AV model, the mean square error of snow storage calculation was minimal, but there was a significant underestimation of snow accumulation in the mountainous part of the basin. According to the GEM model, snow storages were overestimated by 10–25%. When calculating with use of the GFS model data, a lot of local maximums and minimums are detected in the field of snow storages, which are not confirmed by the data of weather stations. The main sources of uncertainty in the calculation are possible systematic errors in the numerical forecasts of precipitation, as well as the empirical coefficients used in the calculation of the intensity of snowmelt and evaporation from the snow cover surface.

Citation: Pyankov S.V., Shikhov A.N., Mikhaylyukova P.G. Simulation of snow accumulation and melting in the Kama river basin using data from global prognostic models. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (4): 494–508. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-423>.

Поступила 18 января 2019 г. / После доработки 21 марта 2019 г. / Принята к печати 13 июня 2019 г.

Ключевые слова: бассейн р. Кама, ГИС-технологии, глобальные модели прогноза погоды, запас воды в снежном покрове, испарение и таяние снега, снегонакопление.

На примере холодного периода 2017/18 г. выполнено моделирование формирования и таяния снежного покрова в бассейне р. Кама с применением выходных данных глобальных моделей прогноза погоды GFS (США), GEM (Канада) и ПЛ-АВ (Россия). Валидация результатов проведена по данным 40 полевых и 27 лесных снегомерных маршрутов, а в весенний период – и по спутниковым снимкам MODIS. Ошибка расчёта снегозапасов по данным всех трёх моделей не превысила 25% фактических значений.

Введение

Запас воды в снежном покрове (в англоязычной литературе – snow water equivalent, SWE) – одна из важнейших его характеристик, информация о которой необходима для прогнозирования речного стока, управления водными ресурсами, а также для ряда отраслей экономики, прежде всего гидроэнергетики и сельского хозяйства [1]. Основным источником фактических данных о снеготопливах – маршрутные снегомерные съёмки, методика проведения которых описана, в частности, в работе [2]. Данные снегомерных съёмок имеют ряд ограничений: низкую частоту проведения измерений (один раз в пять или десять дней); пространственную неравномерность; отсутствие данных по труднодоступным и горным районам; ограниченную точность пространственной интерполяции данных [1, 3, 4]. Получение информации о снеготопливах с высоким пространственным и временным разрешением остаётся актуальной проблемой, особенно для районов со сложной орографией и редкой сетью наблюдений.

Существуют два основных подхода к восстановлению информации о снеготопливах на обширных территориях: данные дистанционного зондирования (спутниковая съёмка в микроволновом диапазоне) и математическое моделирование. В настоящее время спутниковые данные не позволяют достоверно оценить снеготопливы на большей части территории России [1, 5]; кроме того, они имеют низкое пространственное разрешение (около 25 км). Более перспективный метод восстановления информации о снеготопливах – моделирование. И в мире, и в России разработано много моделей снежного покрова разного уровня сложности (физически обоснованных и концептуальных). Они могут быть как самостоятельными, так и входить в качестве блоков в состав более сложных моделей формирования речного стока, взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью или климатической системы в целом. Из моделей снежного покрова, разработанных в России и применявшихся для расчётов на крупных водосборах, можно выделить, в частности, модель Института водных проблем РАН [6] и модель SPONSOR, разработанную в лаборатории климатологии Института географии РАН [4, 7].

В качестве входной информации (метеорологического форсинга) в моделях снежного покрова могут использоваться фактические данные метеостанций (ГМС) или выходная продукция глобальных и мезомасштабных численных моделей атмосферы. В первом случае возникает проблема точности интерполяции измерений осадков. Особенно актуальна она для горных районов в связи с отсутствием там ГМС или их нерепрезентативностью [8]. Отметим, что численные модели атмосферы совершенствуются, растут пространственное разрешение и точность краткосрочного прогноза осадков в холодный период года. В работе [9] отмечено, что численные модели атмосферы позволяют воспроизвести распределение осадков в условиях сложного рельефа более корректно, чем интерполяция данных наблюдений, так как в них учитывается направление воздушных потоков.

В последние годы развивается подход, основанный на комбинировании краткосрочных численных прогнозов погоды с моделями формирования стока или снежного покрова – так называемое «комплексное гидрометеорологическое моделирование» (в англоязычной литературе – coupled hydro-meteorological modeling). Он применяется для прогноза стока горных рек в Альпах [10]. Основное преимущество комплексного моделирования – значительное повышение заблаговременности гидрологического прогноза. Использование такого подхода для моделирования пространственного распределения снеготопливов в горных районах Европы и Северной Америки рассмотрено в работах [8, 9]. В России опыт применения данных численных моделей прогноза погоды для расчёта снеготопливов пока весьма ограничен. В Гидрометцентре России разработана технология SnoWE, основанная на комбинации моделирования процесса снегонакопления по данным стандартных измерений на ГМС с полями первого приближения из системы численного прогноза погоды COSMO-Ru. Выполненное сравнение результатов моделирования с данными снегомерных и спутниковых измерений показало удовлетворительные результаты [1].

Авторы настоящей работы в 2013–2016 гг. проводили расчёты снегонакопления и снеготаяния для бассейна Воткинского водохранилища на основе прогноза осадков по модели Weather Research and Forecasting (WRF) с шагом сетки

Таблица. 1. Характеристика использованных глобальных моделей атмосферы [13]

Название модели, разработчик, страна	Шаг расчётной сетки	Число вертикальных уровней	Шаг сетки выходных данных	Источник данных
GFS, National Center for Environmental Prediction (NCEP), США	0,12°	64	0,25°	http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/
GEM, Canadian Meteorological Center (CMC), Канада	0,14°	120	0,24°	http://dd.weatheroffice.gc.ca/model_gem_global/25km/grib2/lat_lon/
ПЛ-АВ, ИВМ РАН, Гидрометцентр России, Россия	0,18° × 0,225°	51	0,18° × 0,225°	Получение по запросу от разработчиков модели

10 км [3, 11, 12]. Установлено, что модель WRF переоценивает количество осадков во второй половине холодного периода, что приводит к некоторому завышению снегозапасов. Источником ошибок, вероятно, были начальные условия – данные численного прогноза глобальной модели GFS/NCEP (США). В последние два–три года появилась возможность рассчитывать снегонакопление на основе не только мезомасштабных, но и глобальных моделей прогноза погоды, чему способствует рост их пространственного разрешения до 10–25 км [13]. Данные оперативного прогноза нескольких глобальных моделей есть в открытом доступе в формате GRIB2 по любой точке земного шара. Они публикуются на серверах национальных метеослужб США, Канады и Германии (ссылки приведены в табл. 1).

В 2017 г. проведён эксперимент по расчёту снегозапасов в бассейне Воткинского водохранилища на входных данных глобальной модели прогноза погоды GEM с шагом сетки 0,24°. Установлено некоторое завышение снегозапасов, но подтверждена перспективность дальнейших исследований в этом направлении [14]. Расчёт снегонакопления по данным глобальных моделей атмосферы позволяет значительно снизить вычислительные затраты. В перспективе при накоплении достаточного объёма данных появляется возможность обоснованно выбрать оптимальные начальные условия для мезомасштабного моделирования. В период снегонакопления 2017/18 г. авторами получены данные трёх моделей прогноза погоды: GFS/NCEP (США), GEM/CMC (Канада) и ПЛ-АВ (Россия). Цель настоящей работы – оценка возможности использования их выходных данных для получения оперативных оценок снегозапасов на крупном водосборе. В качестве территории исследования рассматривается бассейн р. Кама.

Область исследования

Границы исследуемого бассейна р. Кама определены по цифровой модели рельефа (ЦМР) GMTED-2010 и уточнены по гидрографической сети. Площадь бассейна составляет 507 тыс. км², средняя высота – 235 м. Для определения ряда параметров, необходимых при моделировании снегонакопления и снеготаяния (температурного коэффициента стаивания, скорости ветра в зависимости от типов растительности, кривых распределения снегозапасов по площади), должны быть известны данные о типах подстилающей поверхности на территории бассейна. Карта типов подстилающей поверхности (land cover map) создана путём объединения двух открытых источников данных о растительности – Карты лесов России [15] и Карты GlobCover-2009 [16], имеющих пространственное разрешение 350 м (рис. 1). Для актуализации карты использованы данные проекта Global Forest Change [17] о площади нарушений лесного покрова. На их основе создан дополнительный слой вырубок, пожаров и ветровалов за период с 2008 г. Таким образом, карта отражает актуальное состояние растительного покрова бассейна р. Кама и может использоваться для определения параметров при моделировании формирования и таяния снежного покрова. Лесистость бассейна, рассчитанная по созданной карте, составляет 55,2%.

Данные и методы

Исходными данными об осадках служили прогнозы с суточной заблаговременностью по трём глобальным моделям атмосферы (см. табл. 1) за весь период снегонакопления (с 19 ок-

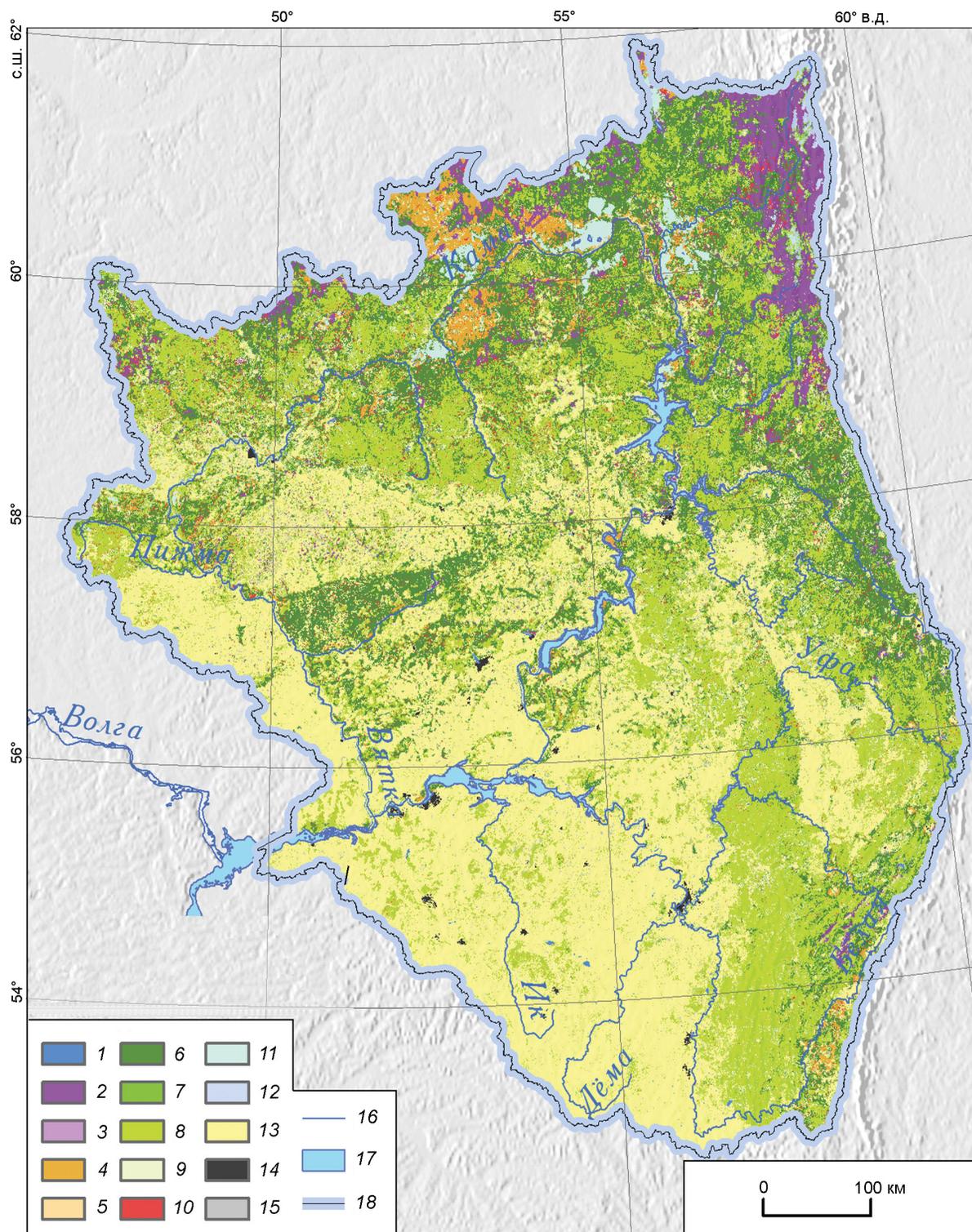


Рис. 1. Типы подстилающей поверхности в бассейне р. Кама:

1 – водная поверхность; 2, 3 – тёмнохвойные леса сомкнутые и несомкнутые; 4, 5 – сосновые леса сомкнутые и несомкнутые; 6, 7 – смешанные леса сомкнутые и несомкнутые; 8 – лиственные леса; 9 – участки лесовосстановления; 10 – вырубки и гари; 11 – болота; 12 – горные тундры; 13 – сельскохозяйственные угодья; 14 – крупные города; 15 – прочие не-лесные земли; 16 – реки; 17 – озёра и водохранилища; 18 – граница бассейна

Fig. 1. Land cover types of Kama river basin:

1 – water surface; 2, 3 – closed and open dark-coniferous forests; 4, 5 – closed and open pine forest; 6, 7 – closed and open mixed forests; 8 – deciduous forests; 9 – reforestation areas; 10 – logged and burned areas; 11 – wetlands; 12 – mountainous tundra; 13 – croplands and grasslands; 14 – large cities; 15 – other non-forested areas; 16 – rivers; 17 – lakes and reservoirs; 18 – basin boundary

тября 2017 г.). Использовались результаты счёта моделей от 12 часов Всемирного скоординированного времени (ВСВ) на срок три и 27 часов, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения количества осадков на метеостанциях (ГМС). Данные моделей получены в коде GRIB2. Для автоматизации их загрузки с серверов разработаны скрипты, позволяющие получать данные только по отдельным переменным. Дальнейшие вычисления вели с помощью средств программного продукта ArcGis 10*, который даёт возможность обрабатывать данные в коде GRIB как обычные наборы растровых данных. При предварительной обработке проводили проецирование данных с пересчётом на более мелкую сетку (с шагом 3000 м) методом билинейной интерполяции.

В течение исследуемого периода были пропуски в получении выходных данных моделей (до двух–трёх суток), вызванные сбоями на серверах метеослужб – поставщиков данных. Общая продолжительность периодов с пропусками (с октября 2017 г. по апрель 2018 г.) не превышала 5–7 суток для каждой модели. Для возмещения пропусков использованы результаты интерполяции данных об осадках по сети ГМС. Достоверность результатов расчёта оценивалась путём сопоставления фактических и прогностических сумм осадков на 101 ГМС, из которых 70 расположено в пределах бассейна р. Кама, а 31 – вблизи его границ. Для автоматизации получения оперативных данных ГМС с веб-сервиса <https://rp5.ru/> разработан инструмент на языке Python. На выходе рассчитываются и выводятся в табличный формат данные о среднесуточной температуре воздуха, температуре точки росы и суточной сумме осадков по данным ГМС из списка, сформированного пользователем.

Методика расчёта снегозапасов в основном аналогична использованной ранее применительно к данным модели WRF [3, 12]. В качестве важнейших составляющих баланса снегозапасов учитываются: осадки (с учётом их фазы); таяние снега при оттепелях; испарение с поверхности снежного покрова; перехват осадков растительностью с последующим испарением. Все перечисленные параметры рассчитывались с суточным шагом по времени. При расчёте снегонакопления возникает проблема недостаточного пространственного разрешения прогностических полей осадков, полученных по данным

глобальных моделей (см. табл. 1). Для её решения предложена схема повышения детальности (даунскейлинг), основанная на предположении о постоянстве увеличения осадков с высотой местности (высотного градиента), выраженного в относительных единицах, т.е. в процентах на 100 м высоты. По результатам анализа данных ранее существовавшей густой осадкомерной сети, опубликованных в Справочниках по климату СССР [18], установлено, что в холодный период года вертикальный градиент осадков на исследуемой территории может быть принят равным 10% на 100 м высоты.

Таким образом, для каждой ячейки расчётной сетки вычислялась разность между ЦМР, используемой в модели прогноза погоды (для каждой модели ЦМР несколько различаются), и более детальной «истинной» ЦМР с шагом сетки 1000 м. На основе разности высот в каждой ячейке вычислялись поправочные коэффициенты к полученному по модели количеству осадков. Сумма осадков в ячейках увеличивалась (уменьшалась) пропорционально разности высот между сглаженной ЦМР, используемой в модели прогноза погоды, и истинной ЦМР. Это позволило существенно повысить реалистичность данных о накопленных осадках и запасах воды в снеге в горной части бассейна. Более подробное обоснование предложенной схемы даунскейлинга применительно к данным канадской модели GEM приведено в работе [14].

Расходная составляющая баланса снежного покрова включает в себя потери на снеготаяние и испарение. Интенсивность снеготаяния при оттепелях рассчитывалась по температурным коэффициентам стаивания (мм/1 °С). Их значения определялись с учётом типа подстилающей поверхности (минимальное значение, равное 1,5 мм/1 °С для тёмнохвойных лесов, а максимальное – 5 мм/1 °С для урбанизированных территорий). Испарение с поверхности снежного покрова рассчитывалось по эмпирической формуле, рекомендованной П.П. Кузьминым [19] для проведения расчётов при отсутствии данных о температуре поверхности снега:

$$E = (0,24 + 0,05 U_{10})d,$$

где E – испарение с поверхности снега, мм; U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, м/с; d – дефицит влажности, гПа.

Необходимые для расчёта ежедневные поля пространственного распределения скорости ветра получены по данным моделей прогноза погоды и скорректированы для разных типов подстилающей поверхности на основе поправочных коэффициентов, предложенных в работе [20]. Поля температуры и влажности воздуха получены на основе интерполяции данных ГМС, так как данные моделей прогноза погоды о температуре и влажности в приземном слое часто содержат значительные ошибки. При интерполяции учитывался вертикальный градиент температуры и влажности в нижнем (1 км) слое атмосферы, который рассчитывался за каждый день на основе данных моделей о температуре и влажности воздуха на изобарической поверхности 850 гПа (приблизительно соответствующей высоте 1,5 км). Также при расчёте учитывалось испарение осадков, перехваченных кронами деревьев, которое в упрощённом виде может быть представлено как

$$E_i = kdLAI_n,$$

где LAI – листовой индекс; n – число дней, за которое проводился расчёт; k – эмпирический коэффициент, принятый равным 0,065 в соответствии с работой [21].

Значения листового индекса LAI получены на основе тематического продукта обработки спутниковых данных MODIS – MOD15A2 (8-day LAI and FPAR) с веб-сервиса NASA (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>) с детальностью 1000 м. Использованы данные за март 2015 г., что связано с наличием нескольких безоблачных снимков за этот период. Средняя рассчитанная величина потерь снежного покрова на испарение по бассейну р. Кама за период с 01.12.2017 г. до 31.03.2018 г. составила 30,5 мм. Сопоставимые оценки потерь снежного покрова на испарение получены в работе [22] для Южного Урала и бассейна Воткинского водохранилища за холодный период 2016/17 г. [14]. Отметим, что в холодный сезон 2017/18 г. на открытых участках местности расчётное испарение оказалось в среднем на 4–5 мм выше, чем на лесопокрытой территории. Это обусловлено влиянием сильных ветров, наблюдавшихся в третьей декаде января и в отдельные дни марта 2018 г.

При расчёте интенсивности снеготаяния в весенний период необходимо учитывать как ад-

вективную, так и радиационную составляющие. Вместе с тем возможность корректного расчёта теплового баланса снежного покрова на крупном водосборе ограничена отсутствием необходимых данных, в частности, об облачности и альbedo поверхности снега. Поэтому были предложены различные упрощённые формулы, например формула И.Н. Гордеева [23], по которой оценивают два основных тепловых потока: теплообмен с атмосферой и суммарную солнечную радиацию:

$$M = K_1\theta + K_2(Q + q),$$

где M – интенсивность снеготаяния, мм; θ – среднесуточная температура воздуха, °C; $Q + q$ – суммарная радиация в условиях ясного неба, мДж/м²·сут, поступление которой рассчитывается средствами ГИС Saga на основе ЦМР по алгоритму, описанному в работе [24]; K_1 и K_2 – коэффициенты.

Значения коэффициентов K_1 и K_2 , определяющих вклад адвективной и радиационной составляющих снеготаяния, зависят от территории и погодных условий. В оригинальной работе [23] для южной части Красноярского края они были приняты равными соответственно 1,2 и 0,3 (для открытой местности). Для рассматриваемой территории вклад радиационной составляющей снеготаяния существенно ниже, а адвективной – выше из-за более северного положения, значительной облачности и более высокой влажности воздуха в период снеготаяния. В связи с этим коэффициент для температуры воздуха был увеличен до 2,2, а для радиационной составляющей снижен до 0,15. Для разных типов подстилающей поверхности введены поправочные коэффициенты, аналогичные тем, которые используются при расчёте интенсивности снеготаяния по среднесуточной температуре воздуха (от 0,3 для тёмнохвойных лесов до 1 для урбанизированных территорий). В остальном расчёт снеготаяния вели аналогично методике, изложенной в работах [11, 12].

Результаты

Оценка достоверности расчёта сумм осадков за холодный период. Результаты сопоставления фактических (по данным 101 метеостанции) и прогностических сумм осадков по моделям GFS, GEM и ПЛ-АВ приведены на рис. 2 и в табл. 2.

Таблица 2. Среднеквадратичная ошибка расчёта (RMSE) месячных сумм осадков по разным моделям (числитель) и её отношение к среднему фактическому количеству осадков (знаменатель)

Название модели	X.2017 г.	XI.2017 г.	XII.2017 г.	I.2018 г.	II.2018 г.	III.2018 г.	IV.2018 г.
GFS	8,0/0,30	9,17/0,26	11,6/0,26	9,2/0,32	8,2/0,36	14,5/0,53	25,5/0,55
GEM	7,9/0,30	11,2/0,32	16,5/0,38	13,6/0,47	7,1/0,31	11,1/0,40	14,8/0,32
ПЛ-АВ	9,0/0,34	9,8/0,28	16,7/0,38	9,7/0,33	8,1/0,36	18,2/0,66	40,4/0,87

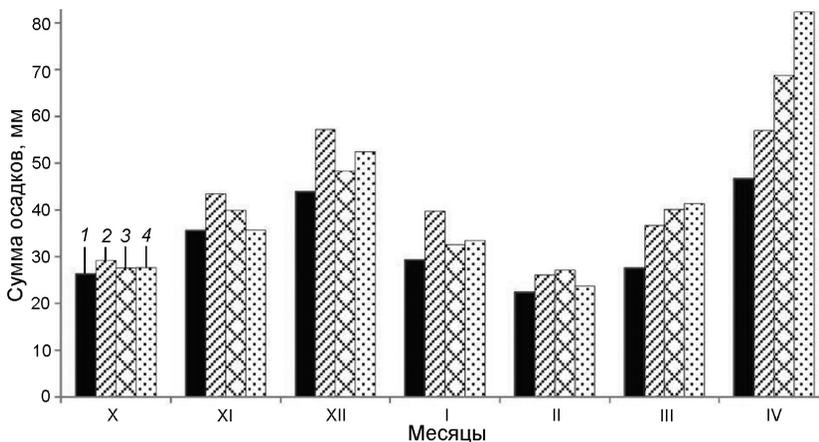


Рис. 2. Фактические (1) и прогностические суммы осадков по моделям GEM (2), GFS (3) и ПЛ-АВ (4) за период снегонакопления и снеготаяния в 2017–2018 гг. в бассейне р. Кама
 Fig. 2. Measured (1) and simulated precipitation amount by GEM (2), GFS (3) and PL-AV (4) atmospheric models for snow accumulation and snowmelt season in Kama river basin

Данные за октябрь приведены с 19 октября, т.е. с начала периода снегонакопления. Как следует из рис. 2, в период с октября 2017 г. по февраль 2018 г. суммы осадков по данным ГМС и всем трём глобальным моделям (GEM, GFS и ПЛ-АВ) в среднем по изучаемой территории различаются не более чем на 30%, что создаёт предпосылки для расчёта снегонакопления с приемлемой точностью. Модель GEM наиболее существенно завышала количество осадков в течение всего периода. По данным других моделей количество осадков также переоценивалось по сравнению с измерениями ГМС, но величина завышения меньше (не более 20%). Среднеквадратичная ошибка расчёта (RMSE) месячных сумм осадков с октября по февраль находилась в пределах 26–38% среднего фактического количества осадков, что также может оцениваться как удовлетворительный результат, и лишь при расчёте по модели GEM за январь RMSE была существенно выше (47%). В марте и особенно в апреле ситуация меняется – по всем моделям количество осадков завышается, причём наиболее сильно по модели ПЛ-АВ. Таким образом, установленный ранее применительно к модели WRF эффект завышения количества осадков в весенний период [3, 12] характерен и для других моделей.

При сопоставлении количества твёрдых осадков по данным ГМС и результатам числен-

ного моделирования необходимо иметь в виду эффект их выдувания из осадкомеров, в результате чего количество осадков может существенно занижаться (особенно на ГМС, расположенных на открытой местности). Согласно выводам, полученным в работе [25], на исследуемой территории до 30% и более выпадающих твёрдых осадков может выдуваться из осадкомеров. Сопоставление фактических и модельных данных позволяет предположить, что на некоторых ГМС измеренное количество твёрдых осадков сильно недооценивается из-за выдувания. Наибольшее систематическое завышение осадков по данным моделей зафиксировано для ГМС 28419 (Янаул), 28502 (Вятские Поляны), 28602 (Чистополь), 28615 (Бакалы) и 28704 (Чулпаново). Все эти ГМС расположены на открытых безлесных участках местности, где условия для выдувания снега наиболее благоприятны.

Особый интерес вызывает оценка точности расчёта глобальными моделями количества осадков в горной части водосбора, однако она несколько затруднена из-за низкой плотности сети ГМС. Для сопоставления были выбраны три ГМС – Бисер, Губаха и Златоуст, которые характеризуют условия западных (наветренных) склонов Урала. Как следует из табл. 3, для этих ГМС в период с октября 2017 г. по февраль 2018 г. все модели недооценивали количество осадков

Таблица 3. Сопоставление фактических и расчётных месячных сумм осадков по метеостанциям, расположенным в горной части водосбора р. Кама (средние значения)

Источник данных	X.2017 г.	XI.2017 г.	XII.2017 г.	I.2018 г.	II.2018 г.	III.2018 г.	IV.2018 г.
Метеостанции	41,1	49,2	43,1	31,7	21,2	42,8	62,5
Модель GEM	32,2	43,0	46,0	26,2	23,1	42,6	62,3
Модель GFS	28,1	44,7	38,1	20,0	22,8	44,7	86,3
Модель ПЛ-АВ	26,3	32,5	37,4	20,6	16,8	41,2	94,6

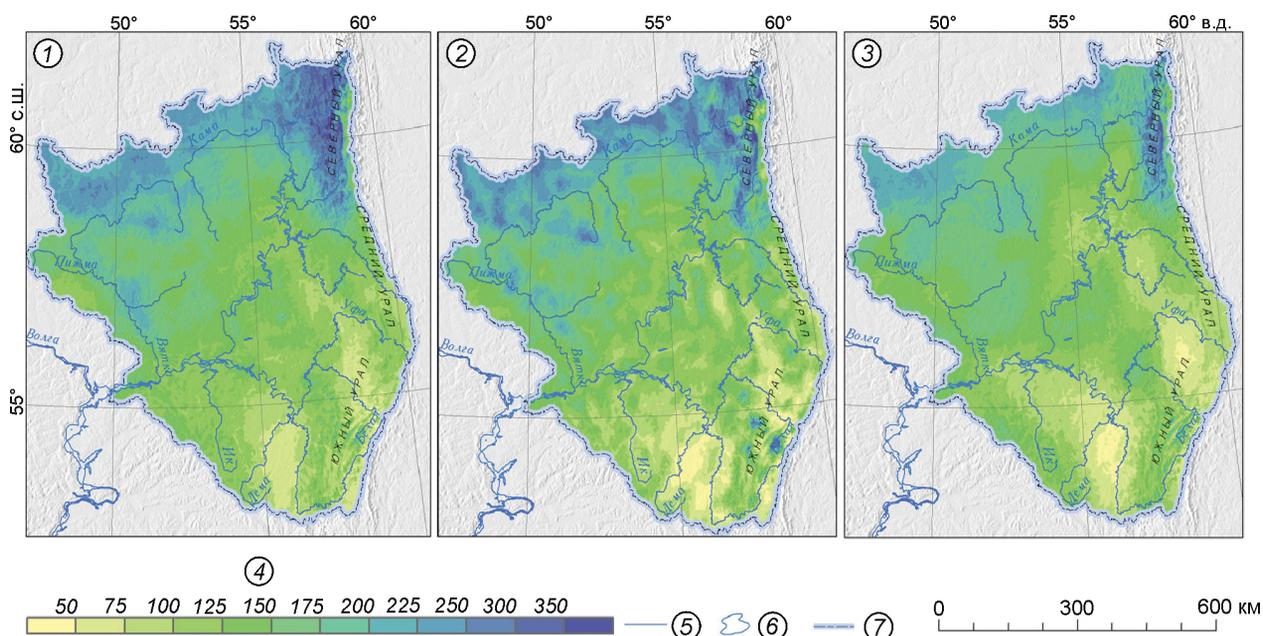


Рис. 3. Результаты расчёта снеговзапасов в бассейне р. Кама на 31.03.2018 г. с использованием данных моделей: 1 – GEM; 2 – GFS; 3 – ПЛ-АВ; 4 – шкала запасов воды в снежном покрове, мм; 5 – реки; 6 – водохранилища и озёра; 7 – граница бассейна

Fig. 3. Snow water equivalent on Kama river basin simulated with the use models: 1 – GEM; 2 – GFS; 3 – PL-AV atmospheric models data (for 31.03.2018); 4 – snow water equivalent scale, mm; 5 – rivers; 6 – lakes and reservoirs; 7 – basin boundary

(в наибольшей степени – модель ПЛ-АВ). В марте расчётное и фактическое количество осадков по данным ГМС различалось незначительно, а в апреле модели уже завышали количество осадков (в наибольшей степени – модель ПЛ-АВ). В целом из табл. 3 следует, что наиболее корректные оценки количества осадков для ГМС горной части бассейна получены по модели GEM.

Оценка достоверности расчёта запаса воды в снеге. В холодный период 2017/18 г. максимальный снеговзапас в бассейне Камы сформировался к концу марта, а интенсивное таяние снега началось с 4 апреля. Результаты расчёта пространственного распределения снеговзапасов по состоянию на 31.03.2018 г. с использованием данных моделей GEM, GFS и ПЛ-АВ приведены на рис. 3. Средние рассчитанные снеговзапасы по

водосбору на 31.03.2018 г. составляют 151,7, 145,5 и 135,5 мм соответственно при использовании данных моделей GEM, GFS и ПЛ-АВ. Возможность сопоставить полученные значения с данными снегомерных съёмок существует для территории Пермского края, Кировской области и Удмуртии (по которой были получены данные снегомерных съёмок с 69 маршрутов). В пределах этих субъектов РФ средний снеговзапас по результатам моделирования составил 180,7, 174,2 и 157,3 мм соответственно при использовании данных моделей GEM, GFS и ПЛ-АВ. Средний снеговзапас по данным снегомерных съёмок на данной территории равен 148,1 мм. С одной стороны, это указывает на существенную переоценку снеговзапасов по данным моделей GEM и GFS; с другой стороны, в горах Урала снегомерных маршрутов

Таблица 4. RMSE расчётных снегозапасов (числитель) и отношение RMSE к среднему фактическому снегозапасу (знаменатель), полученные при сопоставлении расчётных снегозапасов с данными снегомерных съёмов (средние значения по данным полевых и лесных маршрутов)

Модель	Тип снегомерных маршрутов	20.XII	20.I	31.I	10.II	20.II
GEM	Поле	17,8/0,44	17,5/0,25	25,2/0,28	30,0/0,31	27,5/0,27
	Лес	23,1/0,60	29,8/0,45	35,6/0,41	37,5/0,38	37,1/0,35
GFS	Поле	12,9/0,32	14,5/0,21	21,6/0,24	26,7/0,28	25,9/0,25
	Лес	21,3/0,55	29,0/0,43	34,3/0,39	37,7/0,38	39,1/0,37
ПЛ-АВ	Поле	15,3/0,39	14,3/0,20	20,2/0,23	22,7/0,24	20,7/0,20
	Лес	16,8/0,44	15,9/0,24	21,0/0,24	24,8/0,28	26,0/0,25
		28.II	10.III	20.III	31.III	
GEM	Поле	26,9/0,23	27,5/0,22	30,2/0,22	30,4/0,21	
	Лес	37,4/0,33	35,5/0,28	32,8/0,22	35,3/0,23	
GFS	Поле	26,5/0,23	26,6/0,21	31,0/0,23	31,6/0,22	
	Лес	40,1/0,35	39,3/0,30	39,6/0,27	40,6/0,27	
ПЛ-АВ	Поле	22,4/0,20	24,8/0,20	29,7/0,22	29,1/0,20	
	Лес	26,7/0,24	23,8/0,18	23,2/0,16	24,6/0,16	

крайне мало, что приводит к занижению снегозапасов в среднем по бассейну при использовании данных снегомерных съёмов.

Пространственное распределение снегозапасов, рассчитанное с помощью разных моделей, различается весьма существенно. Так, по данным модели GFS установлено множество локальных максимумов и минимумов снегонакопления, которые не выделяются по материалам других моделей. В горах Северного Урала максимальный расчётный снегозапас по данным модели GFS превышает 500 мм, а минимальные значения в межгорных понижениях составляют всего 80–100 мм. Также снегозапас существенно занижается в лесостепных районах Предуралья, находящихся в зонах барьерной тени от возвышенностей. Здесь по данным на 31.03.2018 г. его величина составляла всего 50–80 мм (более чем в полтора раза ниже, чем по данным снегосъёмов). С использованием моделей GEM и ПЛ-АВ воспроизводится более сглаженное и реалистичное поле снегозапасов, однако по данным модели ПЛ-АВ снегозапас значительно меньше. Существенная недооценка снегонакопления по модели ПЛ-АВ отмечается в горных районах и лесостепной зоне, что подтверждается материалами снегосъёмов. Занижение снегозапаса в горах Урала по модели ПЛ-АВ, очевидно, связано с недооценкой количества осадков (см. табл. 3). Причиной занижения снегозапаса в лесостепной зоне может быть не только занижение

количества осадков, но и завышение расчётного испарения со снежного покрова, которое в лесостепной зоне достигает 40–45 мм с декабря по март). В свою очередь, по модели GEM в северной части водосбора снегозапас завышается на 30–50% по сравнению с данными снегосъёмов.

Достоверность расчёта снегонакопления оценивалась на основе сравнения с данными маршрутных снегомерных съёмов. Получены данные по 40 полевым и 29 лесным снегомерным маршрутам на территории Пермского края, Удмуртии и Кировской области. Два лесных снегомерных маршрута были отбракованы по причине очевидного несоответствия измерений толщины снежного покрова и снегозапасов (ГМС Кирс), а также в связи с тем, что маршрут отражал лишь локальные условия снегонакопления (ГМС Вая). Общая оценка достоверности расчёта снегозапасов (по всем снегомерным маршрутам) приведена в табл. 4, а сопоставление по отдельным станциям – на рис. 4. Сопоставление с данными снегомерных съёмов показало, что данные всех трёх моделей прогноза погоды (GEM, GFS и ПЛ-АВ) имеют перспективы применения для расчёта снегозапасов в бассейне р. Кама. Среднеквадратичная ошибка расчёта снегозапасов на 31.03.2018 г. находится в пределах 23–40 мм, что составляет 16–27% среднего фактического значения по данным снегосъёмов. Наилучший результат (RMSE – 25 мм) получен по модели ПЛ-АВ при сравнении с данными лесных снего-

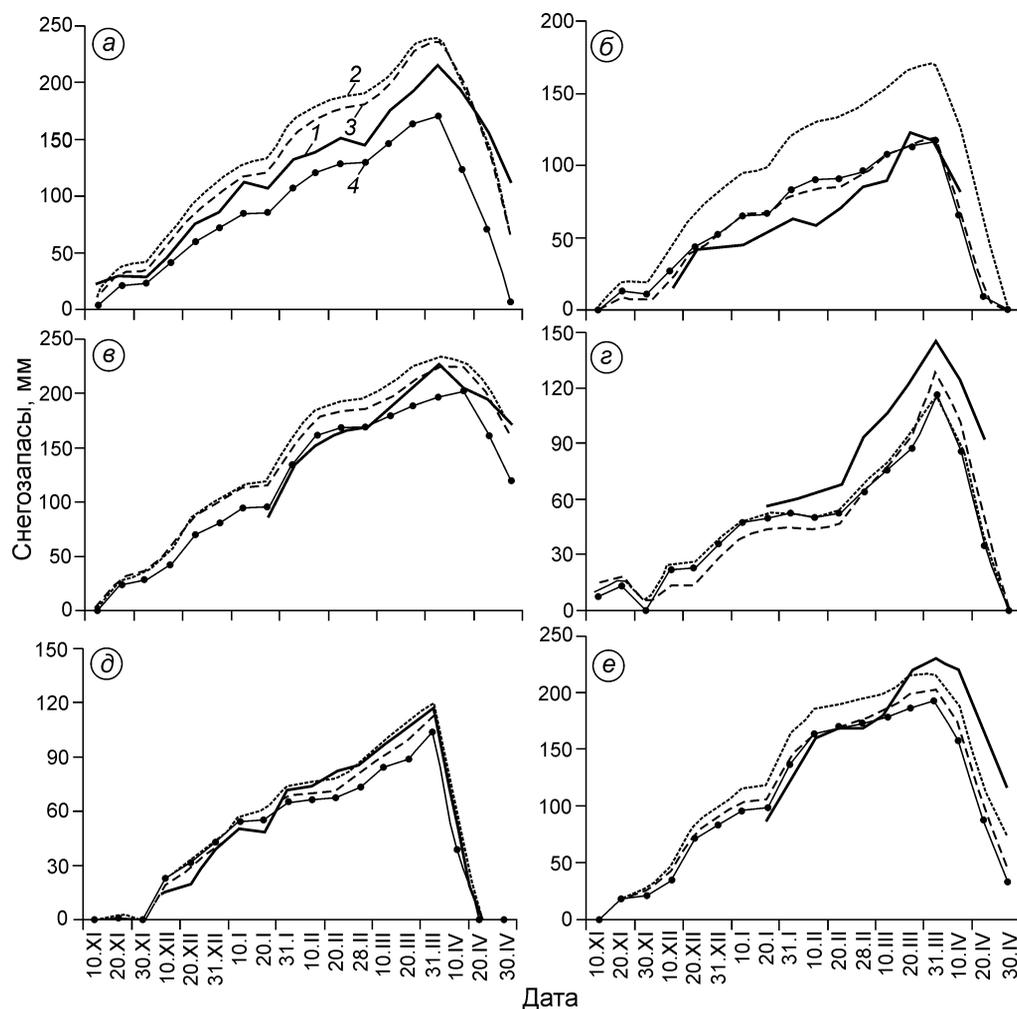


Рис. 4. Сопоставление расчётного и фактического снеговзапаса по отдельным снегомерным маршрутам: а – Чердынъ (поле); б – Кудымкар (поле); в – Усть-Черная (лес); г – Октябрьский (лес); д – Бол. Соснова (поле); е – Нагорское (лес); 1 – данные снегомерных съёмок; 2 – модель GEM; 3 – модель GFS; 4 – модель ПЛ-АВ

Fig. 4. Comparison of simulated and measured SWE by some snow survey routes:

а – Cherdyn', treeless area; б – Kudimkar, treeless area; в – Ust'Chornaya, forest; г – Oktyabr'skiy, forest; д – Bol. Sosnova, treeless area; е – Nagorskoe, forest; 1 – snow survey data; 2 – GEM model; 3 – GFS model; 4 – PL-AV model

мерных маршрутов. Однако эти оценки точности получены по материалам только одного сезона, поэтому имеют предварительный характер.

Средняя ошибка (bias) расчёта снеговзапаса составляет: для полевых и лесных снегомерных маршрутов соответственно $-9,8$ и $-19,2$ мм для модели GEM; $-2,9$ и $-19,8$ мм для модели GFS; $6,2$ и $2,0$ мм для модели ПЛ-АВ. Таким образом, по модели GEM снеговзапасы в среднем завышаются как по полевым, так и по лесным маршрутам, что вполне ожидаемо, учитывая систематическое завышение осадков по этой модели в течение всего периода снегонакопления (см. рис. 2). По модели GFS завышение снеговзапаса наблюдается только для лесных маршрутов; по модели ПЛ-АВ в среднем снеговзапасы близки к измеренным значениям, однако для востока территории отмечается их занижение. Наблюдаемое расхождение по точности расчёта снеговзапасов для полевых и лесных маршрутов может

быть связано с особенностями пространственного размещения этих маршрутов. Большинство станций с лесными снегомерными маршрутами находится на севере рассматриваемой территории, в лесной зоне, а многие полевые маршруты – на юге, в лесостепной зоне. Как уже отмечалось, одна из причин недооценки снеговзапаса в лесостепной зоне – завышение расчётного испарения со снежного покрова.

Оценка достоверности расчёта площади, покрытой снегом в бассейне р. Кама, в период снеготаяния по спутниковым данным. Расчёт площади, покрытой снегом, по космическим снимкам разного пространственного разрешения и спектрального диапазона ведётся достаточно давно. В основе лежат отражательные свойства снега в различных участках спектра [26]. В настоящее время разработан и опробован ряд индексов для расчёта доли площади снежного покрова в пикселе изображения. Наиболее распространён-

Таблица 5. Сопоставление фактической (рассчитанной по спутниковым данным MODIS/Aqua) и расчётной площади, покрытой снегом в бассейне р. Кама в период снеготаяния в апреле 2018 г.

Источник данных о заснеженности	Доля площади, покрытой снегом, от наблюдаемой (безоблачной) площади бассейна, %		
	06.04.2018 г.	14.04.2018 г.	18.04.2018 г.
Спутниковые (MODIS/Aqua)	84,6	96,1	76,2
Расчёт по модели GEM	100,0	92,0	72,3
Расчёт по модели GFS	98,9	88,5	70,6
Расчёт по модели ПЛ-АВ	97,6	80,7	71,6
Доля безоблачной площади от общей площади бассейна, %	81,4	65,2	88,2

ный – нормализованный относительный индекс снега NDSI (normalized difference snow index), а для лесопокрытых территорий – нормализованный относительный индекс снега в лесах NDFSИ (normalized difference forest snow index) [27]. Индексы рассчитываются по следующим формулам:

$$NDSI = (green - swir) / (green + swir);$$

$$NDFSИ = (nir - swir) / (nir + swir),$$

где *green* – яркость в зелёном канале; *nir* – яркость в ближнем инфракрасном канале; *swir* – яркость в среднем инфракрасном канале.

Для расчёта площади, покрытой снегом в период снеготаяния в 2018 г., и последующей оценки достоверности аналогичных расчётов по выходным данным моделей GEM GFS, и ПЛ-АВ были использованы космические снимки съёмочной системы MODIS/Aqua. Данные доступны на веб-сервисе NASA (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>). Расчёт проводился на основе продукта MYD09GA, для которого уже выполнены необходимые радиометрическая и атмосферная коррекции. При интерпретации значений индекса NDFSИ принято, что значения, превышающие 0,4, относятся к территориям со снежным покровом (включая лесопокрытые), а значения меньше 0,4 соответствуют бесснежной поверхности [27]. За апрель 2018 г. получено только три снимка с облачностью около трети площади бассейна и менее (6, 14 и 18 апреля), которые и были использованы для верификации модельных расчётов (табл. 5, рис. 5).

Полученные результаты указывают на хорошее соответствие спутниковых и модельных данных, однако спутниковые данные за вторую половину периода снеготаяния отсутствуют. В начале периода снеготаяния спутниковая оценка площади, покрытой снегом, несколько занижена, затем её достоверность повышается.

К 14 апреля в среднем по бассейну наблюдается недооценка площади снегового покрытия по данным всех трёх моделей (наиболее значительная – по модели ПЛ-АВ, что обусловлено существенным занижением снегозапаса в южной части бассейна по этой модели). В результате сход снежного покрова в лесостепных районах бассейнов рек Белая и Уфа по моделям произошёл на несколько дней раньше, чем фактически (по спутниковым данным). К 18 апреля, когда безлесные территории в южной части бассейна уже полностью освободились от снега, наблюдалось наилучшее совпадение расчётной и фактической площади, покрытой снегом. Однако по модели ПЛ-АВ её недооценка в лесостепной зоне сохранялась.

Заключение

До последнего времени применение общедоступных данных глобальных моделей прогноза погоды для решения гидрологических задач было невозможно из-за их низкого пространственного разрешения. Однако с ростом детальности и повышением точности краткосрочных прогнозов осадков открываются новые перспективы в этом направлении. Выполненное исследование применимости данных моделей прогноза погоды GEM, GFS и ПЛ-АВ для расчёта снегонакопления на крупном водосборе – одна из первых подобных работ в России. В условиях холодного периода 2017/18 г. удалось оценить снегозапасы с ошибкой в пределах 25% их фактического значения по выходным данным всех трёх рассмотренных моделей. Правда, этот вывод – предварительный и требует проверки по материалам нескольких сезонов.

Полученные результаты сопоставимы по точности с полученными ранее на основе дан-

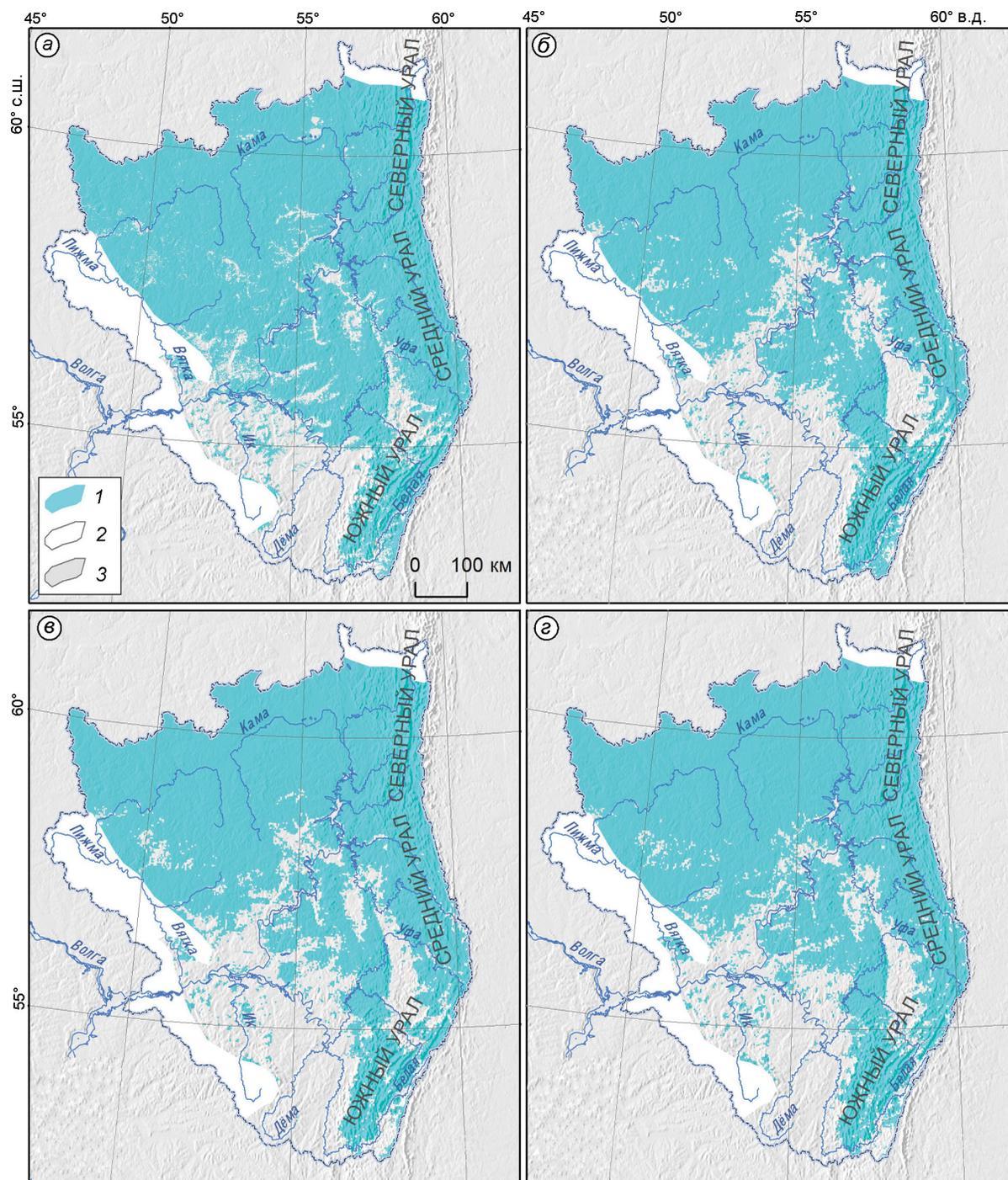


Рис. 5. Сопоставление фактической (по спутниковым данным) и расчётной площади, покрытой снегом в бассейне р. Кама, по данным на 18.04.2018 г.:

a – спутниковые данные; *б* – модель ПЛ-АВ; *в* – модель GFS; *г* – модель GEM; 1 – снежный покров; 2 – облачность; 3 – отсутствие снежного покрова

Fig. 5. Comparison of satellite-derived and simulated snow-covered area on the Kama river basin (for 18 April 2018): *a* – satellite data; *б* – PL-AV model; *в* – GFS model; *г* – GEM model; 1 – snow cover; 2 – cloudiness; 3 – snow-free area

ных модели WRF [16, 17]. Сложно определить, какая модель обеспечивает максимальную точность расчёта снеготпасов, так как каждая из

них имеет свои ограничения. По данным модели ПЛ-АВ среднеквадратичная ошибка расчёта снеготпасов оказалась минимальной, однако при

этом отмечается существенная недооценка снегонакопления в горной части бассейна. По данным модели GEM снегозапасы систематически завышаются на 10–25%. При расчёте по данным модели GFS выделяется множество локальных максимумов и минимумов в поле снегозапасов, которые не подтверждаются данными метеостанций. В целом предложенная методика перспективна для оперативного расчёта снегозапасов в районах со сложной орографией и редкой сетью наблюдений. Основные источники неопределённости при расчёте снегозапасов – возможные систематические ошибки в численных прогнозах осадков, а также эмпирические коэффициенты, используемые при расчёте интенсивности снеготаяния и испарения с поверхности снега.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-05-01001-а. Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра

коллективного пользования высокопроизводительными вычислительными ресурсами (ЦКП ВВР) Пермского государственного национального исследовательского университета за помощь в получении и обработке данных моделей прогноза погоды, а также сотрудникам лаборатории перспективных численных методов в моделях атмосферы Гидрометцентра России и лично М.А. Толстых за предоставленные данные модели ПЛ-АВ.

Acknowledgments. The study was funded by RFBR grant № 17-05-01001-a. The authors are grateful to the team of the Center for collective usage of high-performance computing resources of the Perm State University for assistance in obtaining and processing atmospheric models data, and also thank the team of the Laboratory of advanced numerical methods in atmospheric models of the Hydro-meteorological Center of Russia and M.A. Tolstykh personally for the providing of the PL-AV atmospheric model data.

Литература

1. Чурюлин Е.В., Копейкин В.Н., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 120–143.
2. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966 // Environment Research Letters. 2011. V. 6. L045204. doi: 10.1088/17489326/6/4/045204.
3. 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 // Russian Meteorology and Hydrology. 2015. V. 40 (11). P. 749–757.
4. Турков Д.В., Сократов В.С. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального теплообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 369–380. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-369-380.
5. Телегина А.А., Фролова Н.Л., Китаев Л.М., Туткова Т.Б. Оценка точности спутниковой информации о снегозапасах крупных водосборов Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 38–49.

References

1. Churyulin E.V., Kopeikin V.N., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churyulina A.G. Analysis of snow cover characteristics using satellite and model data for various basins on the European territory of Russian Federation. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. Hydro-meteorological studies and forecasts. 2018, 368: 120–143. [In Russian].
2. Bulygina O.N., Groisman P.Ya., Razuvaev V.N., Korshunova N.N. Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966. *Environment Research Letters*. 2011, 6: L045204. doi: 10.1088/17489326/6/4/045204.
3. 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. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015, 40 (11): 749–757.
4. Turkov D.V., Sokratov V.S. Calculation of snow cover characteristics on lowland areas with the use of the SPONSOR model of local heat and moisture exchange and reanalysis data on the example of the Moscow region. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 369–380. doi: 10.15356 / 2076-6734-2016-3-369-380. [In Russian].
5. Telegina A.A., Frolova N.L., Kitaev L.M., Titkova T.B. Assessment of the accuracy of satellite information on snow water equivalent on large-scale basins of the European Russia. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. Modern problems of the Earth remote sensing from space. 2014, 11 (2): 38–49. [In Russian].
6. Kuchment L.S., Romanov P.Yu., Gelfan A.N., Demidov V.N. Use of satellite-derived data for characteriza-

6. 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 // *Hydrology and Earth system science*. 2010. V. 14 (2). P. 339–350. doi: 10.5194/hess-14-339-2010.
7. Шмакин А.Б., Турков Д.В., Михайлов А.Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // *Криосфера Земли*. 2009. Т. 13. № 4. С. 69–79.
8. Bellaire S., Jamieson J.B., Fierz C. Forcing the snow-cover model SNOWPACK with forecasted weather data // *The Cryosphere*. 2011. V. 5. P. 1115–1125. doi: 10.5194/tc-5-1115-2011.
9. Quéno L., Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M., Karbou F. Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometric-resolution meteorological forecasts // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. P. 1571–1589. doi: 10.5194/tc-10-1571-2016.
10. Verbunt M., Zappa M., Gurtz J., Kaufmann P. Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin // *Journ. of Hydrology*. 2006. V. 324. P. 224–238. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.036.
11. Пьянков С.В., Шухов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. Пермь: изд. Пермского гос. нац. исслед. ун-та, 2017. 148 с.
12. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin // *Journ. of Geographical Sciences*. 2018. V. 28 (2). P. 221–237. doi: 10.1007/s11442-018-1469-x.
13. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // *Тр. Гидрометцентра России*. 2016. № 1. С. 5–33.
14. Шухов А.Н., Быков А.В. Расчет снегозапасов на крупном водосборе с использованием данных глобальных моделей прогноза погоды // *Гидромет. исследования и прогнозы*. 2018. № 1 (367). С. 64–79.
15. Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Potapov P.V., Turubanova S.A., Yaroshenko A.Yu. Russia's Forests – Dominating Forest Types and Their Canopy Density. Moscow: Greenpeace Russia and RAS Centre for Forest Ecology and Productivity. 2004. (Map, scale 1:14 000 000).
16. Arino O., Bicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J.-L. GlobCover: the most detailed portrait of Earth // *European Space Agency Bulletin*. 2008. V. 136. P. 24–31.
17. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O. Townshend J.R.G. High-resolution of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation. *Hydrology and Earth system science*. 2010, 14 (2): 339–350. doi: 10.5194/hess-14-339-2010.
18. Shmakin A.B., Turkov D.V., Mikhailov A.Yu. Snow cover model considering its layered structure and seasonal evolution. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2009, 13 (4): 69–79. [In Russian].
19. Bellaire S., Jamieson J.B., Fierz C. Forcing the snow-cover model SNOWPACK with forecasted weather data. *The Cryosphere*. 2011, 5: 1115–1125. doi: 10.5194/tc-5-1115-2011.
20. Quéno L., Vionnet V., Dombrowski-Etchevers I., Lafaysse M., Dumont M., Karbou F. Snowpack modelling in the Pyrenees driven by kilometric-resolution meteorological forecasts. *The Cryosphere*. 2016, 10: 1571–1589. doi: 10.5194/tc-10-1571-2016.
21. Verbunt M., Zappa M., Gurtz J., Kaufmann P. Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. *Journ. of Hydrology*. 2006, 324: 224–238. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.09.036.
22. Pyankov S.V. *Geoinformatsionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov i yavleniy*. GIS-based support of modeling hydrological processes and phenomena. Perm: Perm State university, 2017: 148 p. [In Russian].
23. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Kalinin N.A., Sviyazov E.M. A GIS-based modeling of snow accumulation and melt processes in the Votkinsk reservoir basin. *Journ. of Geographical Sciences*. 2018, 28 (2): 221–237. doi: 10.1007/s11442-018-1469-x.
24. Tolstykh M.A. Global atmospheric models: Current state and development prospects. *Trudy Gidromettsentra Rossii*. Proc. of the Hydrometeorological Center of Russia. 2016, 1: 5–33. [In Russian].
25. Shikhov A.N., Bykov A.V. Snow water equivalent calculation on a large-scale basin with the use of global weather forecast models. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. Hydrometeorological studies and forecasts. 2018, 1 (367): 64–79. [In Russian].
26. Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Potapov P.V., Turubanova S.A., Yaroshenko A.Yu. Russia's Forests – Dominating Forest Types and Their Canopy Density. Moscow: Greenpeace Russia and RAS Centre for Forest Ecology and Productivity. 2004. (Map, scale 1:14 000 000).
27. Arino O., Bicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J.-L. GlobCover: the most detailed portrait of Earth. *European Space Agency Bulletin*. 2008, 136: 24–31.
28. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O. Townshend J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 2013, 342: 850–853. doi: 10.1126/science.1244693.
29. *Spravochniki po klimatu SSSR*. Reference books on the USSR climate. Is. 1–34. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965–1974. [In Russian].

- tion global maps of 21st-century forest cover change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853. doi: 10.1126/science.1244693.
18. Справочники по климату СССР. Вып. 1–34. Л.: Гидрометеоиздат, 1965–1974.
 19. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 346 с.
 20. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 199 с.
 21. 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.
 22. Шутлов В.А., Калюжный И.Л. Анализ пространственного распределения зимних осадков и снегозапасов в бассейне р. Белой // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 105–114.
 23. Гордеев И.Н. Методика расчета интенсивности снеготаяния в прогнозах весеннего стока сибирских рек: Науч.-практич. школа-семинар молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии. Новосибирск, 2012. URL: <http://sibnigmi.ru/documents/school/Gordeev.pdf>.
 24. Wilson J.P., Gallant J.C. Terrain Analysis – Principles and Applications. John Wiley & Sons Inc., 2000. 479 p.
 25. Гаврилова С.Ю. Устранение неоднородности временных рядов атмосферных осадков и их использование для анализа изменений режима увлажнения на территории России: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. СПб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2010. 111 с.
 26. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // Remote Sensing of Environment. 1995. V. 54. P. 127–140.
 27. Wang X., Wang J., Che T., Huang X., Hao X., Li H. Snow Cover Mapping for Complex Mountainous Forested Environments Based on a Multi-Index Technique // IEEE Journ. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018. V. 11 (5). P. 1433–1441. doi: 10.1109/JSTARS.2018.2810094.
 19. Kuzmin P.P. *Protsess tayaniya snezhnogo pokrova*. The process of snow cover melting. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1961: 346 p. [In Russian].
 20. Koren' V.I. *Matematicheskie modeli v prognozakh rechnogo stoka*. Mathematical models for streamflow forecasts. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991: 199 p. [In Russian].
 21. Karpechko Yu.V., Bondarik N.L. *Gidrologicheskaya rol' lesokhozyaistvennykh i lesopromyshlennykh работ v taezhnoy zone Evropeyskogo Severa Rossii*. Hydrological role of forestry and logging in the taiga zone of the Russian European North. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyi tsentr RAN, 2010: 225 p. [In Russian].
 22. Shutov V.A., Kalyuzhnyi I.L. Analysis of the spatial distribution of winter precipitation and snow water equivalent in the Belaya river basin. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 1997, 1: 105–114. [In Russian].
 23. Gordeev I.N. The method of snowmelt intensity calculation for the forecasts of spring runoff of Siberian rivers. Scientific-practical school-seminar for young scientists and specialists in the field of hydrometeorology. Novosibirsk, 2012. URL: <http://sibnigmi.ru/documents/school/Gordeev.pdf>.
 24. Wilson J.P., Gallant J.C. Terrain Analysis – Principles and Applications. John Wiley & Sons Inc., 2000: 479 p.
 25. Gavrilova S.Yu. *Ustraneniye neodnorodnosti vremennykh ryadov atmosferynykh osadkov i ikh ispol'zovanie dlya analiza izmeneniy rezhima uvlazhneniya na territorii Rossii*. Elimination of the non-stationarity of precipitations time series and their use for the analysis of changes in the moisture regime in Russia. PhD. Sankt-Petersburg: Main Geophysical Observatory, 2010: 111 p.
 26. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. Remote Sensing of Environment. 1995, 54: 127–140.
 27. Wang X., Wang J., Che T., Huang X., Hao X., Li H. Snow Cover Mapping for Complex Mountainous Forested Environments Based on a Multi-Index Technique. IEEE Journ. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018, 11 (5): 1433–1441. doi: 10.1109/JSTARS.2018.2810094.