Моделирование пространственного распределения снегозапасов на крупном водосборе с применением спутниковой информации

С.В. Пьянков, А.Н. Шихов

Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, 614990, Россия
E-mail: gis@psu.ru

Предложена и протестирована на материалах трех зимних сезонов (2012−2015 гг.) методика оценки влагозапасов снега, основанная на комбинировании данных наземных, спутниковых наблюдений и краткосрочных прогнозов осадков по мезомасштабной модели атмосферы WRF. Для расчета интенсивности снеготаяния и испарения снежного покрова использованы спутниковые данные о подстилающей поверхности (актуальная карта типов растительности и листовой индекс LAI), что позволяет объективно учитывать влияние ландшафтных условий на эти процессы. Реализация расчетов средствами ГИС-технологий обеспечивает получение реалистичных карт распределения снегозапасов с высоким пространственным разрешением. Валидация результатов моделирования выполнена путем сопоставления фактических и расчетных снегозапасов, а также площади заснеженности исследуемого водосбора. Площадь заснеженности оценивалась по спутниковым данным MODIS. Алгоритм определения заснеженности по данным MODIS (ATBD-MOD10) был адаптирован к условиям изучаемого водосбора, в результате чего удалось устранить ошибки, возникающие при создании маски снега на залесенные территории. В целом предложенная методика обеспечивает удовлетворительные результаты расчета максимальных снегозапасов. В период весеннего снеготаяния точность несколько снижается, причем площадь заснеженности водосбора воспроизводится с более высокой достоверностью, чем запас воды в снеге. Расхождения расчетного и фактического снегозапаса обусловлены как завышением количества осадков по модели WRF–ARW, так и нерепрезентативностью данных снегомерных съемок.

Ключевые слова: снежный покров, снегонакопление, снеготаяние, влагозапасы снега, модель WRF, данные MODIS

Одобрена к печати: 17.06.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-29-41

Введение

Водный режим большинства рек России во многом определяется процессами формирования и таяния снежного покрова. Доля талого стока составляет 60–70%, а в отдельных районах и до 90% объема годового стока. В период снеготаяния возникают опасные гидрологические явления − наводнения и ледовые заторы, которые наносят значительный ущерб.

Одним из путей повышения предсказуемости характеристик талого стока является учет неоднородностей пространственного распределения снегозапасов, обусловленных взаимодействием процессов снегонакопления, снеготаяния, сублимации и ветрового перераспределения снега (Кузьмин, 1961; Pomeroy et al., 1998). Для расчета пространственного распределения запасов воды в снежном покрове используются физически обоснованные модели его формирования и таяния (Tarboton, Luce, 1996; Kuchment, Gelfan, Demidov, 2000) или геостатистические методы, основанные на интерполяции (Шутов, Калюжный, 1997; Шутов, 1998). Физически обоснованные распределенные модели снежного покрова предполагают решение балансовых уравнений в ячейках регулярной сетки. Ограничением для их использования является малая доступность исходных данных, особенно для обширных водосборов с редкой сетью метеонаблюдений. В России известны лишь немногочисленные примеры расчета снегозапасов с помощью физически обоснованной модели для крупного водосбора (Kuchment et al., 2010).

Геостатистические методы оценки распределения снегозапасов также имеют свои ограничения. Редкая сеть снегосъемок не позволяет учесть неоднородности поля снегозапасов, обусловленные влиянием орографии и разнообразием растительного покрова. По этой причине интерполяция данных снегомерных съемок в районах со сложным рельефом часто не имеет смысла. Более надежные результаты дает интерполяция сумм осадков холодного периода, на основе которых также может быть выполнен расчет снегозапаса (Шутов, Калюжный, 1997; Шутов, 1998).

В связи с этим в последние годы для расчета влагозапасов снега используются выходные данные мезомасштабных моделей прогноза погоды. Высокая надежность и пространственная детализация краткосрочного прогноза осадков в холодный период года позволяет применять их в комплексе с гидрологическими моделями. Такой подход реализован для прогнозирования талого стока горных рек (Verbunt et al., 2006; Zhao et al., 2009). В России одно из первых подобных исследований было проведено нами для территории водосбора Воткинского водохранилища. При этом было получено удовлетворительное соответствие между фактическим и расчетным снегозапасом (Калинин, Шихов, Свиязов, 2015).

Ряд характеристик снежного покрова (площадь заснеженности, температура поверхности снега, снегозапас) могут быть измерены на основе данных спутниковой съемки. Недостатком этих измерений являются частые пропуски по причине влияния облачности, а также низкая точность (в особенности для залесенных водосборов) (Kuchment et al., 2010). Наиболее надежно по спутниковым снимкам оценивается площадь заснеженности. Спутниковые данные о динамике заснеженности могут использоваться как в целях мониторинга процесса снеготаяния, так и при калибровке гидрологических моделей, и для текущей корректировки их входных параметров (Бураков, Гордеев, Ромасько, 2010). Что касается оценки снегозапасов по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне спектра, то ее точность пока не позволяет использовать эти данные на практике (Носенко, Долгих, Носенко, 2006).

Помимо самих характеристик снежного покрова, по данным ДЗЗ определяются ключевые параметры подстилающей поверхности, необходимые для расчета испарения со снежного покрова и интенсивности снеготаяния (тип растительного покрова и листовой индекс). В целом использование данных ДЗЗ является важной составляющей современных методов мониторинга и моделирования характеристик снежного покрова, особенно в районах со сложным рельефом и редкой сетью наблюдений.

В настоящей работе представлены результаты расчета снегозапасов и площади заснеженности, полученные на основе комбинирования фактической, прогностической и спутниковой информации средствами ГИС-технологий (использован программный пакет ArcGis). Исследуемая территория – водосбор Воткинского водохранилища (S=184 тыс. км^2), характеризуется разнообразными природными условиями и неравномерным размещением пунктов наблюдательной сети (Калинин, Пьянков, 2002). Расчеты проведены на материалах трех зимних сезонов (с 2012 г. по 2015 г.).

Моделирование пространственного распределения снегозапасов

Методика расчета влагозапасов снега с высоким пространственным разрешением (3000 м) основана на суммировании осадков холодного периода 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, скорости ветра на высоте 10 м, температуры и влажности воздуха на изобарической поверхности 850 гПа, полученные по мезомасштабной модели атмосферы WRF с шагом сетки 10 км;
- срочные данные наблюдений на сети метеостанций (приземная температура и влажность воздуха, общая и нижняя облачность, суточные суммы осадков);
- данные о подстилающей поверхности: цифровая модель рельефа водосбора, полученная на основе матрицы высот GMTED2010, и актуальная карта типов растительности, созданная на основе разносезонных снимков Terra/Aqua MODIS. Более подробное описание этой карты приведено в работе (Пьянков, Шихов, 2014);
- данных снегомерных съемок на сети метеостанций для валидации результатов расчета снегозапасов, а также спутниковых снимков Terra MODIS для оценки адекватности расчета площади заснеженности в период весеннего снеготаяния.

В качестве входных данных о количестве твердых и жидких осадков (на основе которых рассчитывался снегозапас) использовались прогностические поля, полученные по мезомасштабной модели WRF. Запуск модели WRF производился на вычислительном кластере Пермского государственного университета. Расчеты производились с использованием динамического ядра ARW на срок 48 ч, от 0 ч текущих суток по ВСВ. Модель запускалась с шагом 10 км по пространству и 60 с по времени, с выдачей данных через каждые 3 часа. Размер расчетной области составлял 2000×2000 км. При дальнейших расчетах использовались данные на срок 15–39 ч от начала прогноза, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения выпавших осадков на метеостанциях. Начальными условиями для запуска модели WRF были данные глобальной модели GFS/NCEP.

Достоверность результатов расчета оценивалась путем сопоставления фактических и прогностических месячных сумм осадков по 34 метеостанциям, расположенным в пределах водосбора Воткинского водохранилища и в сопредельных районах. Ранее (на материалах 2012–2015 гг.) было установлено, что в большинстве случаев модель WRF завышает количество осадков в холодный период. Наиболее существенное завышение (на 35–50%) отмечается в марте. При этом в зимние месяцы среднеквадратичная ошибка (RMSE) расчета месячных сумм осадков по модели составляла 18–31% от количества выпавших осадков. Такие ошибки можно считать приемлемыми, поскольку их величина близка к погрешностям измерения твердых осадков на метеостанциях. Более подробно данный вопрос рассмотрен в работе (Шихов, Свиязов, 2015).

Другие поля метеоэлементов, необходимые для расчета снегозапасов и интенсивности снеготаяния (температура и влажность воздуха, скорость ветра, общая и нижняя

облачность) восстанавливались по фактическим данным наблюдательной сети, с учетом орографии местности. Методика интерполяции описана в работе (Калинин, Шихов, Свиязов, 2015).

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

Потери на испарение со снежного покрова включают две составляющие: испарение с поверхности снежного покрова, интенсивность которого зависит от дефицита влажности воздуха и скорости ветра, и испарение твердых осадков, перехваченных растительностью.

Расчет испарения снежного покрова за холодный период производился по методике, описанной в работе (Карпечко, Бондарик, 2010):

$$E_{sum} = E_i + E, \qquad (1)$$

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

$$E_i = k \times d \times LAI \times n, \qquad (2)$$

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

$$E = (0,24 + 0,05 \times U_{10}) \times d \times n, \qquad (3)$$

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

Листовой индекс LAI характеризует тип и густоту лесной растительности и применяется для расчета перехвата твердых осадков в моделях снежного покрова (Pomeroy, 1998; Kuchment et al., 2010). Он 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. Более подробное описание этого продукта представлено в работе (Myneni et al., 2002). Использованы данные за март 2015 г., что связано с отсутствием облачности над исследуемой территорией в этот период.

Результаты расчетов испарения со снежного покрова показаны на *рис. 1*. Суммарное испарение снега за холодный период, определенное по вышеописанной методике, составляет от 10–15 мм в мелколиственных лесах до 50 мм и более – в темнохвойных и сосновых лесах (имеющих максимальную емкость перехвата твердых осадков). Это в целом соответствует данным, приведенным в литературе (Шутов, Калюжный, 1997). До 40% суммарного испарения снега приходится на март.

В южной части водосбора потери снежного покрова на испарение значительно больше, чем в северной, что объясняется увеличением дефицита влажности воздуха.

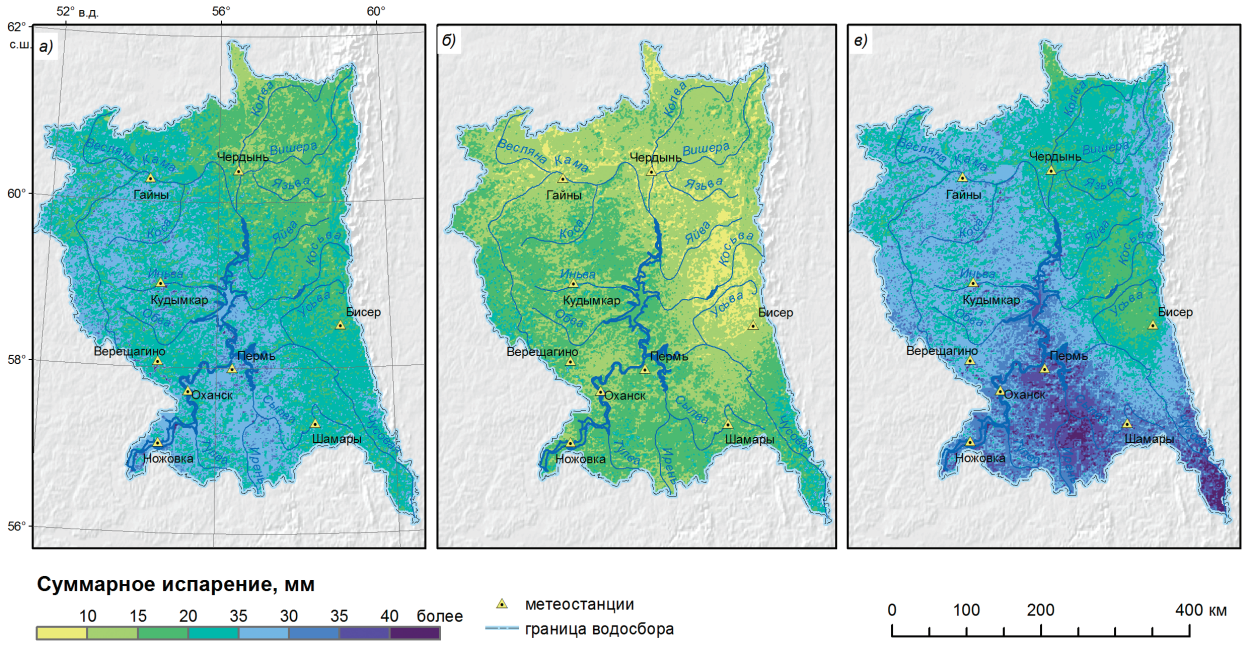

Рис. 1. Испарение со снежного покрова за холодный период: а) – 2012/13 гг.; б) – 2013/14 гг.; в) – 2014/15 гг.

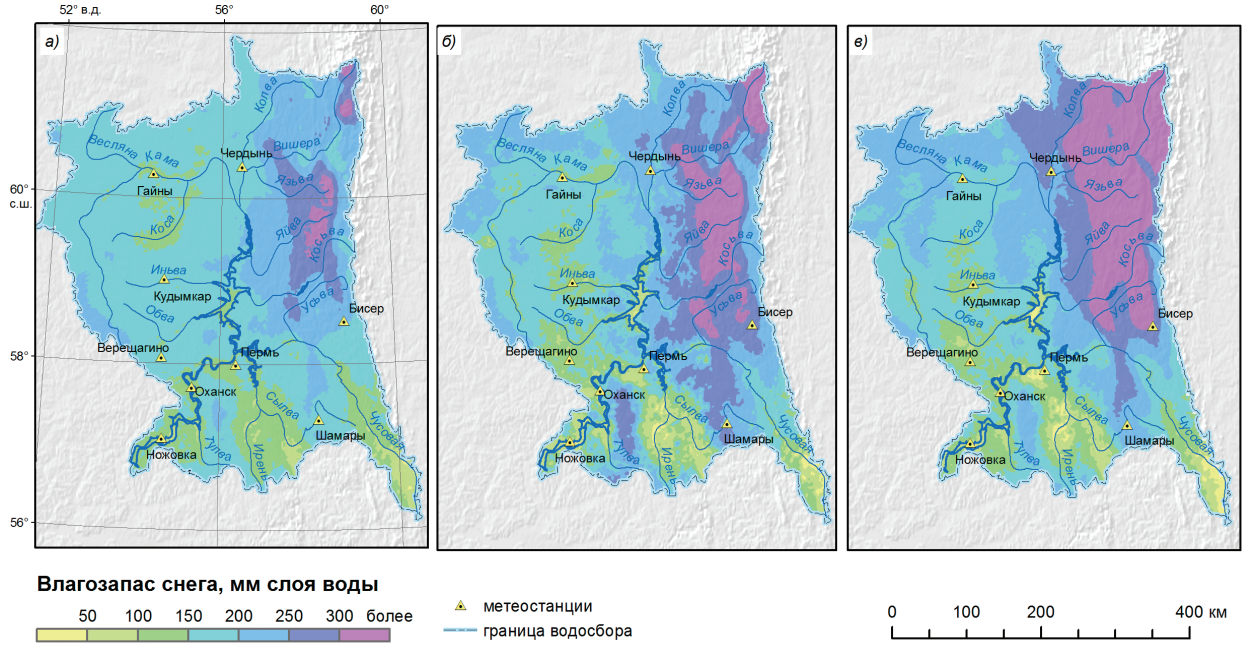

Рис. 2. Расчет пространственного распределения снегозапасов: а) – 01.04.2013 г.; б) – 01.04.2014 г.; в) – 01.04.2015 г.

Также суммарное испарение снежного покрова подвержено изменениям в зависимости от погодных условий холодного периода. Так, в холодный период 2014/15 гг. потери снега на испарение были в 2 раза больше, чем в 2013/14 гг., по причине преобладания антициклональной погоды с низкой относительной влажностью воздуха в марте.

Результаты расчета максимального снегозапаса за холодный период 2012/13 гг., 2013/14 гг. и 2014/15 гг. приведены на *рис. 2*. Они характеризуются существенной пространственной неоднородностью и межгодовой изменчивостью по причине различных циркуляционных условий. В 2014/15 гг. большую часть холодного периода преобладала

зональная циркуляция, а в 2012/13 гг. – меридиональная. В холодный период 2013/14 гг. в ноябре–декабре преобладал зональный перенос, а в январе–феврале – меридиональная циркуляция. Вследствие этого суммы осадков за данные периоды существенно различались. В горной части водосбора наибольшие снегозапасы сформировались в 2015 г., а на равнинной территории – в 2014 г.

Расчет интенсивности снеготаяния в весенний период

Блок расчета пространственного распределения интенсивности снеготаяния реализован средствами ГИС-технологий на основе известного метода П.П. Кузьмина (Кузьмин, 1961). Метод Кузьмина позволяет определить составляющие теплового баланса снежного покрова на основе данных стандартных сетевых метеонаблюдений и расчетных сумм приходящей солнечной радиации (с учетом облачности). Более подробное описание его реализации представлено в работе (Калинин, Шихов, Свиязов, 2015). Помимо метода П.П. Кузьмина, использовалась упрощенная версия модели, в которой интенсивность снеготаяния рассчитывается в зависимости только от среднесуточной температуры воздуха и свойств подстилающей поверхности, и было проведено сопоставление результатов расчета по двум методам.

При расчете снеготаяния по методу теплового баланса определенные сложности представляет оценка приходящей солнечной радиации и альбедо снежного покрова. Суточные суммы радиации в период снеготаяния рассчитывались на основе данных о широте местности и цифровой модели рельефа по алгоритму, реализованному в ГИС SAGA. Его подробное описание приведено в работе (Wilson, Gallant, 2000). Влияние общей и нижней облачности, а также лесной растительности учитывалось с помощью коэффициентов, предложенных в работе П.П. Кузьмина (Кузьмин, 1961). Общая и нижняя облачность интерполировалась по данным сети метеостанций.

Расчет альбедо снежного покрова представляет наибольшие сложности, поскольку его величина зависит от возраста верхнего слоя снега и структуры его поверхности, высоты снежного покрова, доли площади, покрытой снегом, облачности и других факторов. Основные факторы, определяющие изменение альбедо, учтены в расчетной методике (Гордеев, 2013). Однако данная методика использовалась автором лишь для расчета альбедо на открытой местности. Ее адаптация в распределенную модель снежного покрова предполагала учет влияния лесной растительности. В работе (Melloh et al., 2002) показано, что максимальные значения альбедо снежного покрова наблюдаются на открытой местности, а в лесу альбедо существенно ниже. В связи с этим, адаптация методики И.Н. Гордеева производилась путем ввода понижающих коэффициентов для максимального значения альбедо в различных типах леса, что позволило получить реалистичную оценку его пространственного распределения (*рис. 3*).

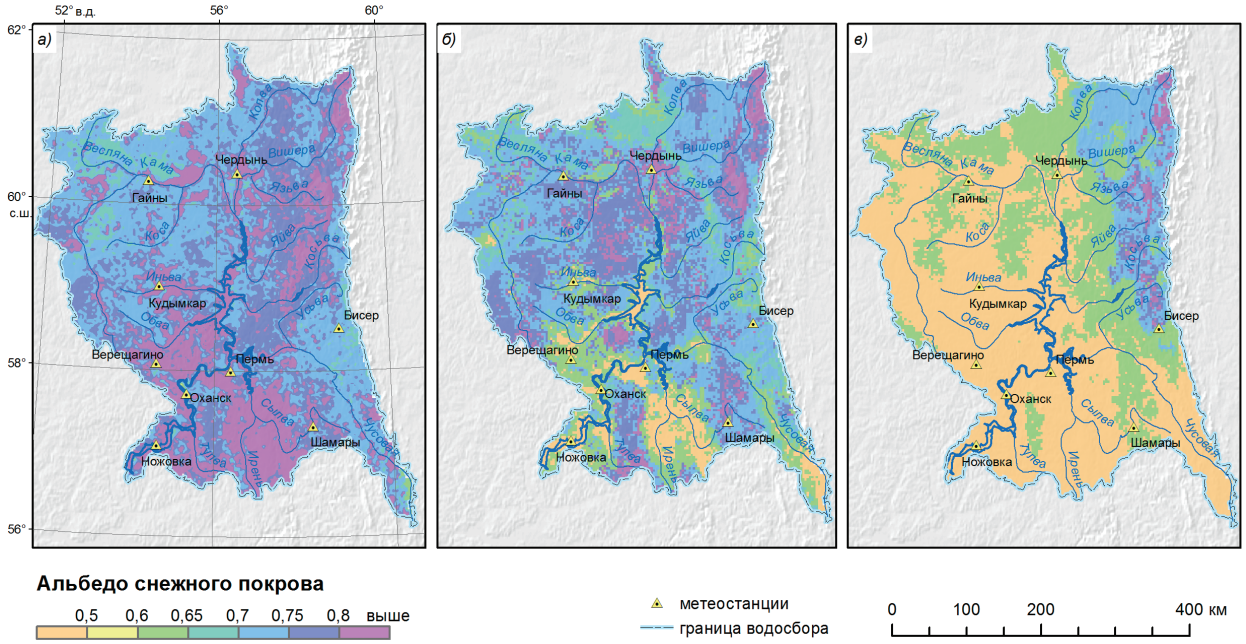

Рис. 3. Расчет альбедо снежного покрова: а) – начальный период снеготаяния (15.03.2015); б) – период интенсивного снеготаяния (15.04.2015); в) – завершающий период снеготаяния (05.05.2015)

Оценка достоверности расчета влагозапасов снега

Валидация результатов расчета снегозапасов на водосборе Воткинского водохранилища выполнена по данным маршрутных снегомерных съемок. Использованы данные с 22 полевых и 24 лесных снегомерных маршрутов. Для сравнения с данными снегосъемок были извлечены значения расчетного снегозапаса из ячеек регулярной сетки, пространственное положение которых соответствует положению снегомерных маршрутов. В период весеннего снеготаяния была сопоставлена достоверность расчета снегозапасов по методу Кузьмина и по среднесуточной температуре воздуха.

На *рис. 4* показаны средний снегозапас по полевым и лесным маршрутам и среднеквадратичная ошибка его расчета (RMSE). Из него следует, что абсолютные ошибки расчета в течение периода снегонакопления возрастают. Однако на момент формирования максимального снегозапаса (в марте) RMSE не превышала 20% от фактически наблюдавшегося запаса воды в снеге (за исключением одного случая в 2015 г.). Такую величину ошибок можно считать удовлетворительной, поскольку сами данные снегосъемок не являются репрезентативными (прежде всего в горной части водосбора). В период весеннего снеготаяния ошибки расчета снегозапасов резко увеличиваются, поскольку большую роль начинают играть локальные факторы перераспределения снега.

В весенний период при расчете снеготаяния по методу теплового баланса имеет место некоторое занижение интенсивности снеготаяния в лесу и завышение – в поле. При расчете по среднесуточной температуре, наоборот, отмечено завышение интенсивности снеготаяния в лесу. В целом метод теплового баланса обеспечивает получение несколько более достоверного результата, чем расчет по среднесуточной температуре.

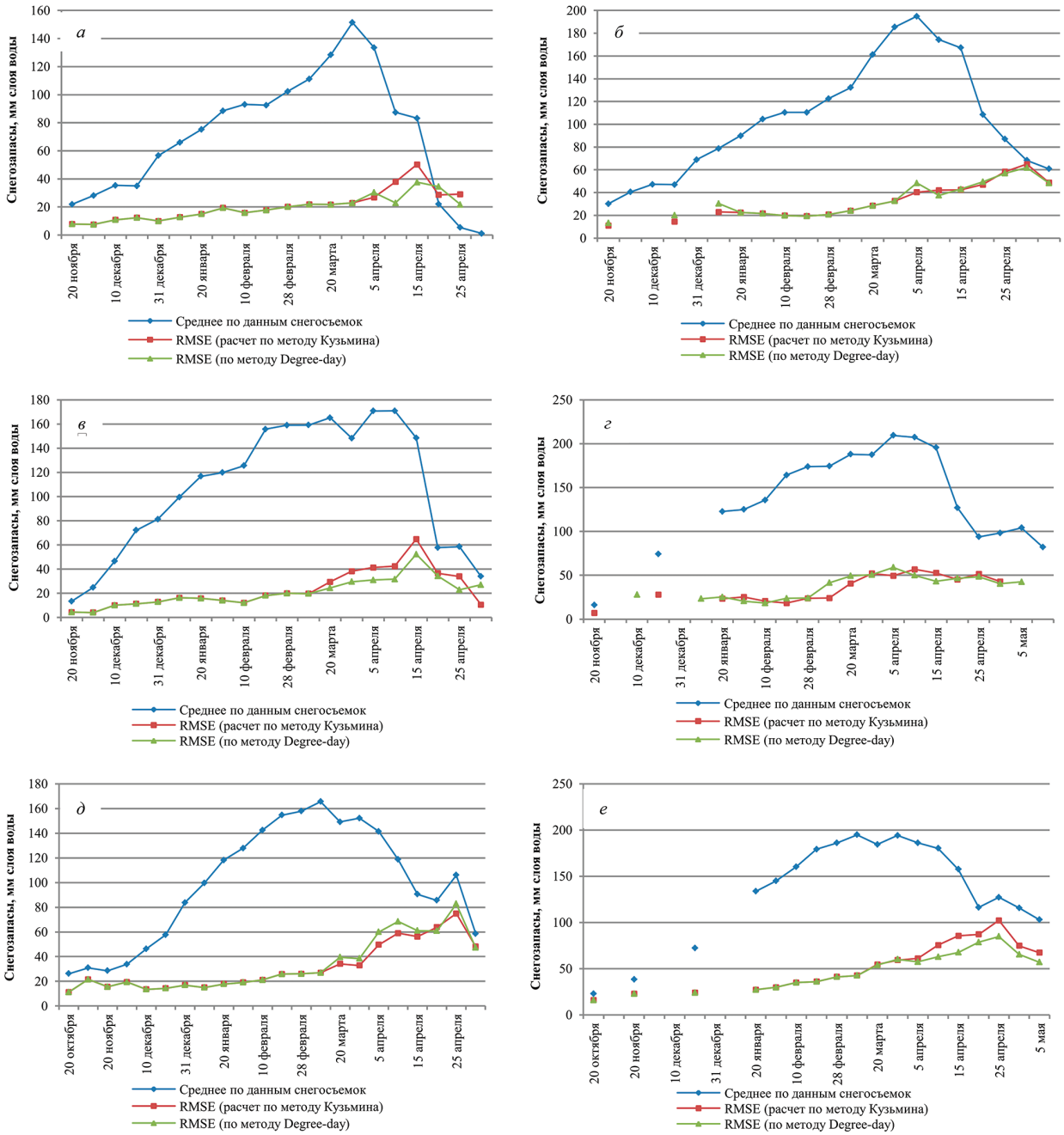

Рис. 4. Оценка достоверности расчета снегозапасов: а) – 2012/13 гг., полевые маршруты, б) – 2012/13 гг., лесные маршруты, в) – 2013/14 гг., полевые маршруты, г) – 2013/14 гг., лесные маршруты , д) – 2014/15 гг., полевые маршруты , е) – 2014/15 гг., лесные маршруты

В отдельных случаях расхождения фактического и расчетного снегозапаса на исследуемой территории имели систематический характер. Например, систематическое завышение снегозапаса наблюдалось в феврале–марте 2015 г., что вызвано завышением сумм осадков по модели WRF в этот период. Наибольшие расхождения между данными снегосъемок и расчетным снегозапасом характерны для метеостанций Вая и Губаха, снегомерные маршруты которых проложены в глубоких долинах рек и нерепрезентативны для прилегающей территории.

Оценка достоверности расчета площади заснеженности

В период весеннего снеготаяния репрезентативность и надежность данных снегомерных съемок снижается, а частота их получения становится недостаточной. В связи с этим возрастает ценность спутниковой информации о заснеженности территории. Основным источником оперативных данных о заснеженности является радиометр MODIS, установленный на спутниках Terra и Aqua. В основу алгоритма картирования снежного покрова по данным MODIS (ATBD-MOD10) положен нормализованный дифференциальный снежный индекс NDSI (Hall, Riggs, Salomonson, 2001). Пороговое значение NDSI, по которому происходит отделение снежного покрова, рекомендовано принимать равным 0,4. Этот порог по NDSI был проверен разработчиками алгоритма путем сопоставления большого числа снимков MODIS с данными более высокого разрешения (LANDSAT).

На исследуемой территории при использовании порога NDSI, равного 0,4, происходит ошибочная классификация снежного покрова на залесенной территории. Снег надежно идентифицируется только в лиственных лесах. Для исключения этого недостатка алгоритма были определены (путем сопоставления со снимками LANDSAT) региональные пороговые значения NDSI для выделения областей, занятых снежным покровом. На безлесных участках порог принят равным 0,35, а на залесенных участках – 0,1. В качестве маски лесов для проведения вычислений использовался продукт MCD12Q1 (Land Cover Type). Также применялся дополнительный тест для отсечения пикселей, покрытых водой. Впервые подобный подход был предложен в работах Д.А. Буракова («Внедрить автоматизированные технологии...», 2007).

Сравнение карт заснеженности водосбора, полученных по стандартному и адаптированному алгоритму, приведено на *рис. 5*. На момент съемки все безлесные участки водосбора были покрыты снегом (что хорошо видно на исходном снимке). Однако по данным, полученным с помощью алгоритма ATBD-MOD10, заснеженность водосбора составляет всего 77,9%. Заснеженность, определенная по адаптированной методике, составляет 96,1%. Таким образом, изменение пороговых значений, рекомендованных в ATBD-MOD10, позволяет значительно повысить надежность распознавания снежного покрова по спутниковым данным MODIS.

Определенная таким способом фактическая площадь заснеженности была сопоставлена с результатами моделирования (*рис. 6*). Как видно, в большинстве случаев расхождение фактической и расчетной заснеженности не превышает 10%. При расчете по методу Кузьмина в 2013 г. и 2015 г. заснеженность оказывается несколько завышенной, а при расчете по среднесуточной температуре воздуха (Degree-day factor, DDF) чаще наблюдается занижение площади заснеженности. Выделить способ, обеспечивающий получение более достоверного результата, в данном случае не удается.

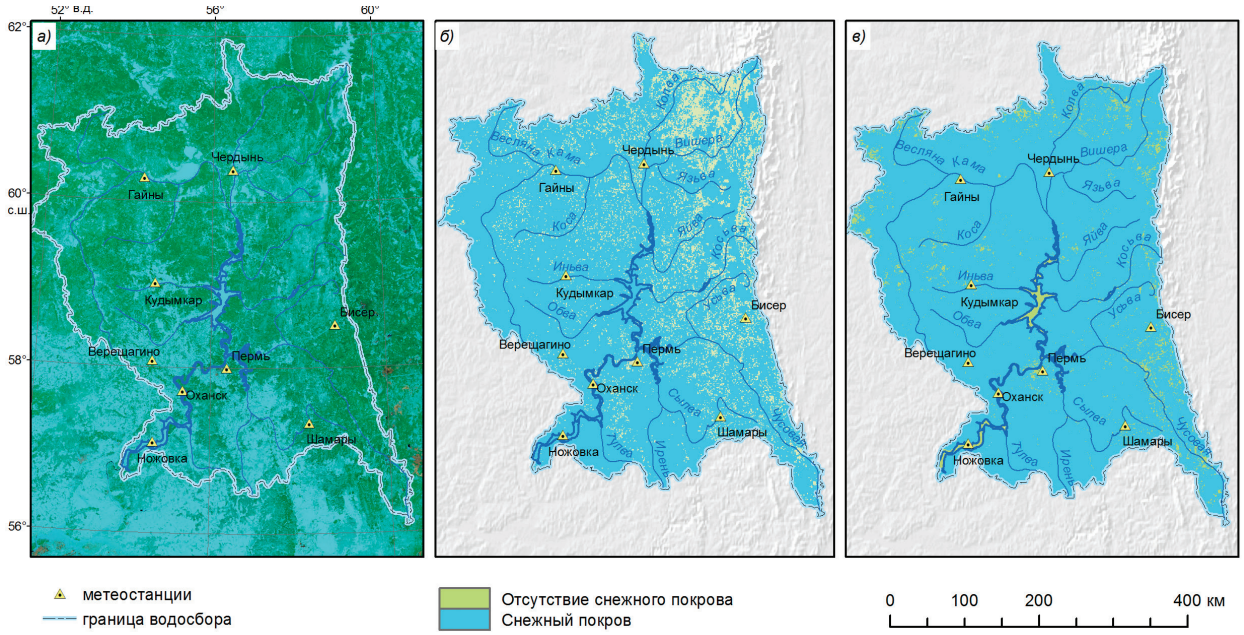

Рис. 5. Оценка заснеженности водосбора по спутниковым данным MODIS на 03.04.2015 г. а) – исходный снимок в синтезе SWIR-NIR-RED; б) – маска снежного покрова по ATBD-MOD10; в) – маска снежного покрова по адаптированной методике

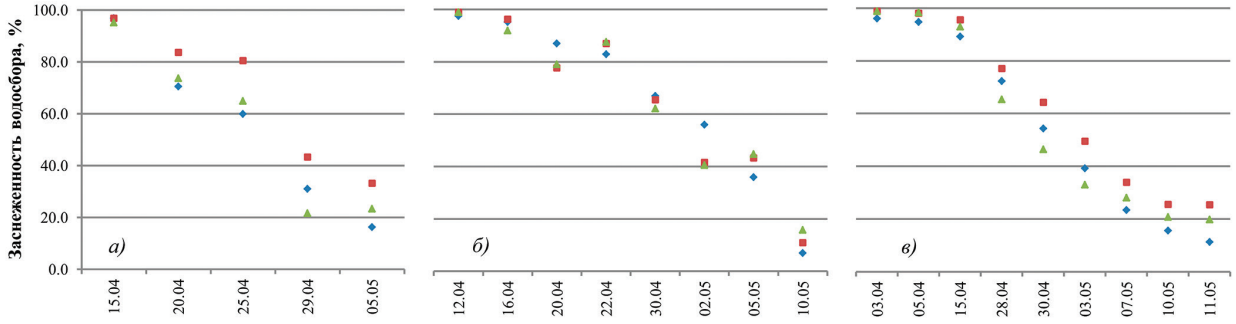

Рис. 6. Сопоставление площади заснеженности водосбора, определенной по спутниковым данным MODIS (синий символ), с результатами ее расчета по методу Кузьмина (красный символ) и по методу degree-day (зеленый символ): а) – 2013 г., б) – 2014 г., в) – 2015 г.

Заключение

Комбинирование данных наземных, спутниковых наблюдений и результатов моделирования с использованием ГИС-технологий является одним из основных способов повышения точности расчета влагозапасов снега на крупных водосборах. Результаты проведенных исследований на материалах 2012–2015 гг. показывают актуальность и реалистичность применения такого подхода для территории водосбора Воткинского водохранилища и перспективность его развития на смежных и аналогичных территориях. Установлено, что прогностические поля осадков по модели WRF могут быть использованы для расчета пространственного распределения снегозапасов. Значительные ошибки, выявленные в ряде случаев при сопоставлении данных снегосъемок и результатов моделирования, частично обусловлены локальными особенностями расположения снего-

мерных маршрутов. Использование цифровой модели рельефа и тематических продуктов обработки данных MODIS (карт типов растительного покрова и листового индекса LAI) позволяет восстановить пространственное распределение снегозапасов с высоким пространственным разрешением, объективно учитывая влияние ландшафтных условий снегонакопления. На этой основе производится расчет расходной части баланса снежного покрова (интенсивности снеготаяния и испарения).

Также в ходе работы выполнена адаптация алгоритма распознавания снежного покрова по данным MODIS (ATBD-MOD10) для использования на залесенной территории. Это позволяет устранить ошибки при определении заснеженности по спутниковым данным.

В перспективе планируется реализация предложенной методики расчета снегозапасов в оперативном режиме на более обширной территории, с использованием открытых данных канадской модели прогноза погоды GEM.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-05-00317-А).

Литература

1. *Бураков Д.А., Гордеев И.Н., Ромасько В.Ю.* Использование спутниковой информации для оценки динамики снегового покрытия в гидролого-математической модели стока весеннего половодья на примере бассейна Саяно-Шушенской ГЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. №. 2. С. 113–121.
2. «Внедрить автоматизированные технологии расчета притока воды в водохранилища Сибирских ГЭС на основе наземной и спутниковой информации среднего разрешения. Разработать методики прогноза максимальных уровней воды на затороопасных участках рек Сибири». Отчет о НИР Росгидромета. Отв. исполнитель Д.А. Бураков. Красноярск, 2007. 138 с.
3. *Гордеев И.Н.* Расчет динамики альбедо снежного покрова в период снеготаяния в бассейне реки Енисей // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 1. С. 47–50.
4. *Калинин В.Г., Пьянков С.В.* Гидрологическая геоинформационная система «Бассейн Воткинского водохранилища» // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 95–100.
5. *Калинин Н.А., Шихов А.Н., Свиязов Е.М.* Моделирование процессов снегонакопления и снеготаяния на водосборе Воткинского водохранилища с использованием модели WRF–ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 57–68.
6. *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.
7. *Кузьмин П.П.* Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 346 с.
8. *Носенко А.А., Долгих Н.А., Носенко Г.А.* Снежный покров центра Европейской части России по данным AMSR-E и SSM/I // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. №. 1. С. 296–301.
9. *Пьянков С.В., Шихов А.Н.* Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Перм. гос. нац. иссл. ун–т. Пермь: Изд–во ООО «Раритет–Пермь», 2014. 296 с.
10. *Шутов В.А.* Методы анализа разномасштабной пространственной изменчивости снегозапасов // Известия РАН. Серия геогр. 1998. № 1. С. 122–132.
11. *Шутов В.А., Калюжный И.Л.* Анализ пространственного распределения зимних осадков и снегозапасов в бассейне р. Белой // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 105–114.
12. *Шихов А.Н., Свиязов Е.М.* Оценка сумм осадков за холодный период на Западном Урале с помощью модели WRF // Географический вестник. 2015. № 3. С. 67–74.
13. *Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V.* Algorithm Theoretical Basis Document for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. 2001. 45 p.
14. *Kuchment L.S., Gelfan A.N., Demidov V.N.* A distributed model of runoff generation in the permafrost regions // Journal of Hydrology. 2000. Vol. 240. No. 1–2. P. 1–22.
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 // Hydrology and Earth system science. 2010. Vol. 14. No. 2. P. 339–350.
16. *Melloh R.A., Hardy J.P., Bailey R.N, Hall T.J.* An efficient snow albedo model for the open and sub-canopy // Hydrological Processes. 2002. Vol. 16. No. 18. P. 3571–3584.

17. *Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J.T., Votava P., Nemani R.R., Running S.W.* Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. No. 1–2. P. 214–231.
18. *Pomeroy J.W., Gray D.M., Shook K.R., Toth B., Essery R.L., Pietroniro A., Hedstrom N.* An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surface modelling // Hydrological Processes. 1998. Vol. 12. No. 15. P. 2339–2367.
19. *Tarboton D.G., Luce C.H.* Utah energy balance snow accumulation and melt model (UEB): Computer model technical description and user's guide. Utah Water Research Laboratory and USDA Forest Service Intermountain Research Station, Logan, Utah. 1996. 64 p.
20. *Verbunt M, Zappa M, Gurtz J, Kaufmann P.* Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin // Journal of Hydrology. 2006. Vol. 324. No. 1–4. P. 224–238.
21. *Wilson, J.P., Gallant, J.C.* (Eds.). Terrain analysis – principles and applications. New York: John Wiley & Sons, 2000. 520 pp.
22. *Zhao Q., Liu Z., Ye B., Qin Y., Wei Z., Fang S.* A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM // Hydrology and Earth Systems sciences. 2009. Vol. 13. No. 10. P. 1897–1906.

Modeling the spatial distribution of snow cover on a large catchment area using satellite data

S.V. Pyankov, A.N. Shikhov

Perm State National Research University, Perm 614990, Russia
E-mail: pyankovsv@gmail.com

The article describes the method of snow water equivalent estimation, on the basis of combining ground-based and satellite observations data, and short-term precipitation forecasts of mesoscale atmospheric WRF model. The method was tested on the three winter seasons of 2012−2015. We used satellite data of the underlying surface (the actual vegetation types map and leaf area index) to calculate the snowmelt intensity and snow evaporation on the catchment area. This allowed us to take into account the influence of landscape conditions on snow accumulation and snowmelt processes. The GIS-based modeling provided reliable and highly detailed maps of the snow cover distribution with high spatial resolution.
Validation of simulation results was performed by comparing the actual and estimated snow water equivalents and snow covered area. Snow covered area was estimated using MODIS satellite data. The algorithm for determining snow covered area by MODIS data (ATBD-MOD 10) was adapted to the conditions of the studied catchment. As a result, we eliminated errors occurring at creating the snow cover mask on forested areas.
In general, the proposed method provides satisfactory calculation results of maximum snow water equivalent. The calculation accuracy is somewhat reduced during the spring snowmelt. Snow covered area is simulated with a higher reliability than the snow water equivalent. The differences in the simulated and actual snow water equivalents are caused by overestimation of precipitation amount by the WRF model and unrepresentative snow survey data.

Keywords: snow cover, snow accumulation, snowmelt, snow water equivalent, the WRF model, MODIS data

Accepted: 17.06.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-29-41

References

1. Burakov D.A., Gordeev I.N., Romas'ko V.Yu., Ispol'zovanie sputnikovoi informatsii dlya otsenki dinamiki snegovogo pokrytiya v gidrologo-matematicheskoi modeli stoka vesennego polovod'ya na primere basseina Sayano-Shushenskoi GES (Using satellite data to assessment of snow cover dynamics in the hydrological model of spring flood formation on example of the Sayano-Shushenskaya HPP catchment), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 2. pp. 113–121.
2. "*Vnedrit' avtomatizirovannye tekhnologii rascheta pritoka vody v vodokhranilishcha Sibirskikh GES na osnove nazemnoi i sputnikovoi informatsii srednego razresheniya. Razrabotat' metodiki prognoza maksimal'nykh urovnei vody na zatoroopasnykh uchastkakh rek Sibiri*" ("Implement automated technology for calculating the water inflow in the reservoir Siberian hydroelectric power station on the basis of terrestrial and satellite data of medium resolution. Develop the methods of forecast maximum water level in the places of ice jams occurrence on the Siberian rivers"), Roshydromet science project report, responsible executive D.A. Burakov, Krasnoyarsk, 2007, 138 p.
3. Gordeev I.N., Raschet dinamiki al'bedo snezhnogo pokrova v period snegotayaniya v basseine reki Enisei (Simulation of the dynamics of snow albedo during the snowmelt in the basin of the Yenisey river), *Kriosfera*

Zemli, 2013, Vol. 17, No. 1, pp. 47–50.
4. Kalinin V.G., P'yankov S.V., Gidrologicheskaya geoinformatsionnaya sistema "Bassein Votkinskogo vodokhranilishcha" (Hydrological geoinformation system "Basin of Votkinsk reservoir"), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2002, No. 5, pp. 95–100.
5. Kalinin N.A., Shikhov A.N., Sviyazov E.M., Modelirovanie protsessov snegonakopleniya i snegotayaniya na vodosbore Votkinskogo vodokhranilishcha s ispol'zovaniem modeli WRF–ARW (Modeling of processes of snow accumulation and snowmelt on a Votkinsk reservoir catchment area using the WRF-ARW model), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2015, No. 11, pp. 57–68.
6. Karpechko Yu.V., Bondarik N.L., *Gidrologicheskaya rol' lesokhozyaistvennykh i lesopromyshlennykh rabot v taezhnoi zone Evropeiskogo Severa Rossii* (The hydrological role of agricultural and timber activities in the taiga zone of the European North of Russia), Petrozavodsk, Karel'skii nauchnyi tsentr RAN, 2010, 225 p.
7. Kuz'min P.P. *Protsess tayaniya snezhnogo pokrova* (The process of snowmelt), Leningrad, Gidrometeoizdat, 1961, 346 p.
8. Nosenko A.A., Dolgikh N.A., Nosenko G.A., Snezhnyi pokrov tsentra Evropeiskoi chasti Rossii po dannym AMSR-E i SSM/I (Snow cover of the center of the European part of Russia, according to the AMSR-E and SSM / I data*)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 1, pp. 296–301.
9. P'yankov S.V., Shikhov A.N., *Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya: rezhim, monitoring, prognoz* (The hazardous hydrometeorological phenomena: regime, monitoring and forecasting), Perm. gos. nats. issl. un–t, Perm', Izd–vo OOO «Raritet–Perm'», 2014, 296 p.
10. Shutov V.A., Metody analiza raznomasshtabnoi prostranstvennoi izmenchivosti snegozapasov (Methods of analysis of multiscale spatial variability of snow water equivalent), *Izvestiya RAN, Seriya geogr*, 1998, No. 1, pp. 122–132.
11. Shutov V.A., Kalyuzhnyi I.L., Analiz prostranstvennogo raspredeleniya zimnikh osadkov i snegozapasov v basseine r. Beloi (Analysis of the spatial distribution of winter precipitation and snow water equivalent in the White river basin), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1997, No. 1, pp. 105–114.
12. Shikhov A.N., Sviyazov E.M., Otsenka summ osadkov za kholodnyi period na Zapadnom Urale s pomoshch'yu modeli WRF (Evaluation of precipitation during the cold period in the Western Urals using the WRF model), *Geograficheskii vestnik*, 2015, No. 3, pp. 67–74.
13. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., *Algorithm Theoretical Basis Document for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms*, 2001, 45 p.
14. Kuchment L.S., Gelfan A.N., Demidov V.N., A distributed model of runoff generation in the permafrost regions, *Journal of Hydrology*, 2000, Vol. 240, No. 1–2, pp. 1–22.
15. Kuchment L.S., Romanov P.Ju., 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, Vol. 14, No. 2, pp. 339–350.
16. Melloh R.A., Hardy J.P., Bailey R.N, Hall T.J., An efficient snow albedo model for the open and sub-canopy, *Hydrological Processes*, 2002, Vol. 16, No. 18, pp. 3571–3584.
17. Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lotsch A., Friedl M., Morisette J.T., Votava P., Nemani R.R., Running S.W., Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 83, No. 1–2, pp. 214–231.
18. Pomeroy J.W., Gray D.M., Shook K.R., Toth B., Essery R.L., Pietroniro A., Hedstrom N., An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surface modelling, *Hydrological Processes*, 1998, Vol. 12, No. 15, pp. 2339–2367.
19. Tarboton D.G., Luce C.H.*, Utah energy balance snow accumulation and melt model (UEB): Computer model technical description and user's guide*, Utah Water Research Laboratory and USDA Forest Service Intermountain Research Station, Logan, Utah, 1996, 64 p.
20. Verbunt M., Zappa M., Gurtz J., Kaufmann P., Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin, *Journal of Hydrology*, 2006, Vol. 324, No. 1–4, pp. 224–238.
21. Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain analysis – principles and applications*, New York, John Wiley & Sons, 2000, 520 pp.
22. Zhao Q., Liu Z., Ye B., Qin Y., Wei Z., Fang S., A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM, *Hydrology and Earth Systems sciences*, 2009, Vol. 13, No. 10, pp. 1897–1906.