

15. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland
16. ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), 2005: Impacts of a Warming Arctic. Scientific Report. Cambridge University Press, Cambridge, 1042 pp.
17. Паромов В.В., Савельева Н.И., Василевская Л.Н. Процессы макроциркуляции и изменение речного стока в бассейнах Верхней и Средней Оби // Вестник Томского государственного университета. 2001. - № 274. - С. 69-77.
18. Исследование последствий изменения климата на состояние водных объектов арктической зоны России в районах интенсивной хозяйственной деятельности : отчет о НИР (промежуточ.) / ААНИИ, отв. исполн. Третьяков М.В. – В рамках темы 1.3.3.1 Плана НИОКР Росгидромета на 2011 г. – СПб., 2011. – 95 с. Фонды ААНИИ, инв. № Р-5990
19. Шевнина Е.В. Анализ стационарности многолетних рядов слоя стока весеннего половодья на водосборах Российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 1 (87). С. 56–64.
20. Бубин М.Н. Ритмичность многолетних колебаний стока рек как интегральный показатель изменчивости климата (на примере Урала): монография / М.Н.Бубин, Н.С. Рассказова; Юргинский технологический институт. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013.
21. Юшкина О.А. Влияние режима стока рек и степени его естественной зарегулированности на параметры динамических систем речных бассейнов [Текст] / О.А. Юшкина, В.А. Земцов // Вестник Томского государственного университета. - 2008. - Вып. 316. - С. 213-218.
22. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчётных значений по неоднородным данным. – Санкт-Петербург, 2010. – 162 с.

Мониторинг и моделирование процессов формирования и таяния снежного покрова на водосборе Воткинского водохранилища

Шухов А.Н.

*Пермский государственный национальный исследовательский университет
and3131@inbox.ru*

Актуальность и необходимость исследований в области моделирования и прогнозирования процессов формирования весеннего стока не вызывает сомнений. Одним из направлений повышения качества прогнозов является совершенствование методов расчета запасов воды в снежном покрове и интенсивности снеготаяния. В условиях сложного рельефа и редкой наблюдательной сети для этого необходимо, во-первых, повысить детализацию и точность данных о пространственном распределении выпадающих на водосбор осадков, а во-вторых учесть перераспределение снежного покрова в зависимости от рельефа и преобладающих типов растительности. Первая задача в настоящее время может быть решена с помощью мезомасштабных численных моделей прогноза погоды, которые позволяют получать реалистичный прогноз осадков холодного периода с высоким пространственным разрешением. Для решения второй задачи используются цифровые модели рельефа, карты типизации растительности и инструментарий ГИС-технологий.

Целью настоящего исследования была оценка достоверности расчета снегозапасов с использованием выходных данных мезомасштабной модели прогноза погоды WRF-ARW. Расчеты проведены на материалах трех зимних сезонов (с 2012 по 2015 гг.), по территории

водосбора Воткинского водохранилища ($S=184$ тыс. км²). Для расчета пространственного распределения снеготазов с высоким пространственным разрешением (3000 м) использовалась методика, основанная на комплексировании фактической и прогностической информации. Реализация этой методики предполагает использование следующих входных данных:

- прогностических полей метеорологических величин, полученных по модели WRF с исходным пространственным разрешением 10 км;
- срочных данных наблюдений на сети метеостанций (температура и влажность воздуха, общая и нижняя облачность, суточные суммы осадков);
- данных о подстилающей поверхности: цифровой модели рельефа водосбора и актуальной карты типов растительности и землепользования, созданной на основе разносезонных снимков Terra/Aqua MODIS. Более подробное описание этой карты приведено в работе [3];
- для валидации результатов расчета снеготазов привлекались данные снегомерных съемок на сети метеостанций, а оценка достоверности расчета площади заснеженности в период весеннего снеготаяния выполнялась по космическим снимкам Terra MODIS.

Прогнозы по модели WRF составлялись с использованием динамического ядра ARW на срок 48 ч от 0 ч текущих суток по ВСВ. Модель запускалась с шагом, равным 10 км по пространству и 60 с по времени, с выдачей данных через каждые 3 ч. При дальнейших расчетах использовались данные на срок 15—39 ч от начала прогноза, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения выпавших осадков на метеостанциях.

Запас воды в снежном покрове в период снеготакпления рассчитывался путем суммирования осадков холодного периода с учетом их фазы, таяния снега при оттепелях и перехвата осадков лесной растительностью. Интенсивность снеготаяния при осенних оттепелях рассчитывалась с использованием температурных коэффициентов стаивания (мм/1°С), которые принимались различными для разных типов подстилающей поверхности (от 1,5 мм/1°С для темнохвойных лесов до 4,5 мм/1°С для безлесных территорий).

Для оценки соотношения между снеготазами в различных типах леса использовались соотношения, рекомендованные в работах [2, 4]. Для темнохвойных лесов доля перехвата твердых осадков кронами деревьев (с их последующим испарением) принималась равной 25% от количества выпавших осадков, для сосновых лесов 15%, для смешанных — 10%. В мелколиственных лесах перехват осадков кронами деревьев принимался равным нулю.

Использовался также альтернативный способ расчета испарения снега с крон деревьев, основанный на эмпирической зависимости испарения от площади листового покрытия (Leaf Area Index, LAI) и дефицита влажности воздуха, предложенный в работе [1]. Значение индекса LAI было получено на основе тематического продукта обработки спутниковых данных MODIS MCD15A2 (8-ми дневные композиты LAI). Для расчетов использовались безоблачные данные за март 2015 г. (когда снег на кронах деревьев уже отсутствовал на всей исследуемой территории). Полученные значения суммарного испарения с крон за период с декабря 2014 по февраль 2015 г. оказались неправдоподобно высокими (до 30 мм в мелколиственных лесах, до 55 мм в смешанных лесах). В связи с чем, было решено в дальнейших расчетах использовать эмпирические соотношения снеготазов в различных типах леса.

На рис. 1. приведены результаты расчета максимальных снеготазов. Значительная неоднородность пространственного распределения снеготазов, показанная на рис. 1, обусловлена особенностями выпадения осадков в холодный период (в частности, орографическим увеличением количества осадков на западных склонах Урала). Большое

значение имеет также различная продолжительность периода снегонакопления на разных высотах.

В весенний период расчеты интенсивности снеготаяния выполнялись по известному методу П.П. Кузьмина, основанному на решении уравнения теплового баланса снежного покрова в предположении, что температура тающего снега равна 0°C [2].

Валидация результатов расчета запасов воды в снежном покрове на водосборе Воткинского водохранилища выполнена по данным маршрутных снегомерных съемок на 24 метеостанциях. Примеры приведены на рис. 2.

В период весеннего снеготаяния репрезентативность и надежность данных снегомерных съемок снижается, а частота их получения становится недостаточной. Поэтому для валидации результатов моделирования в этот период используется спутниковая информация о заснеженности территории (на основе снимков Terra/Aqua MODIS).

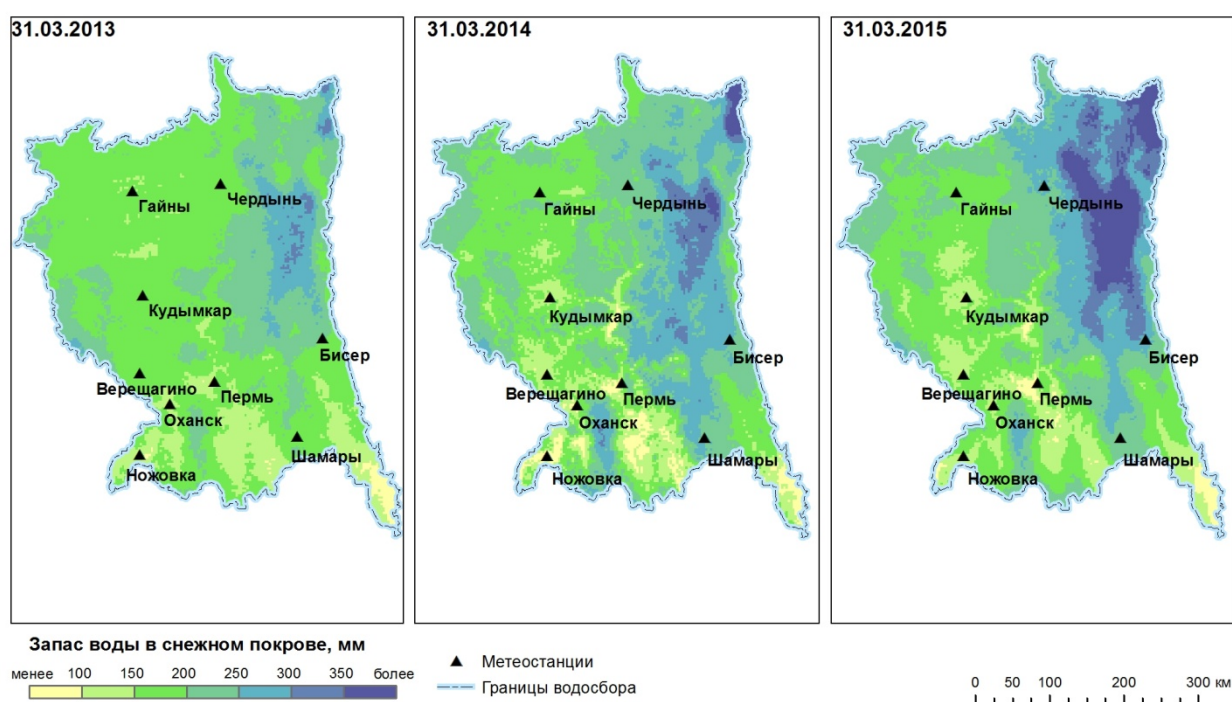


Рис. 1 Результаты расчета запасов воды в снежном покрове (в мм слоя) на водосборе Воткинского водохранилища в 2013-2015 гг.

Традиционно «маска снежного покрова» по данным MODIS строится по величине «нормализованного дифференциального снежного индекса» NDSI, в качестве порогового значения которого принимается 0,4 (за вычетом ячеек, занятых облачностью). При использовании данного порога происходит ошибочная классификация снежного покрова в лесу (снег надежно идентифицируется только в лиственных лесах низкой полноты). Для исключения данного недостатка алгоритма были определены региональные пороговые значения NDSI для выделения областей, занятых снежным покровом: на безлесных участках порог равен 0,35; а на залесенных участках – 0,15. В качестве маски лесов для проведения вычислений использовался продукт MCD12Q1 (Land Cover Type), также использовался порог яркости в ближнем ИК канале для отсеивания пикселей, покрытых водой. Результаты сопоставления фактической заснеженности, определенной по данному алгоритму, и расчетной заснеженности приведены на рис. 3.

В целом предложенная методика позволяет восстановить пространственное распределение снегозапасов с высоким пространственным разрешением, объективно учитывая влияние ландшафтных условий снегонакопления. Среднеквадратичная ошибка результатов расчета к концу зимнего сезона, когда достигаются максимальные значения влагозапасов снега, составляет 15—20% от фактически наблюдаемого снегозапаса. Основными источниками ошибок при расчете снегозапасов являются систематическое завышение сумм осадков по модели WRF–ARW в весенний период и сложность учета перехвата твердых осадков кронами деревьев и их последующего испарения (в результате чего снижается достоверность расчета снегозапасов в лесу). Перспективы повышения точности расчета снегозапаса связаны с уменьшением имеющихся ошибок.

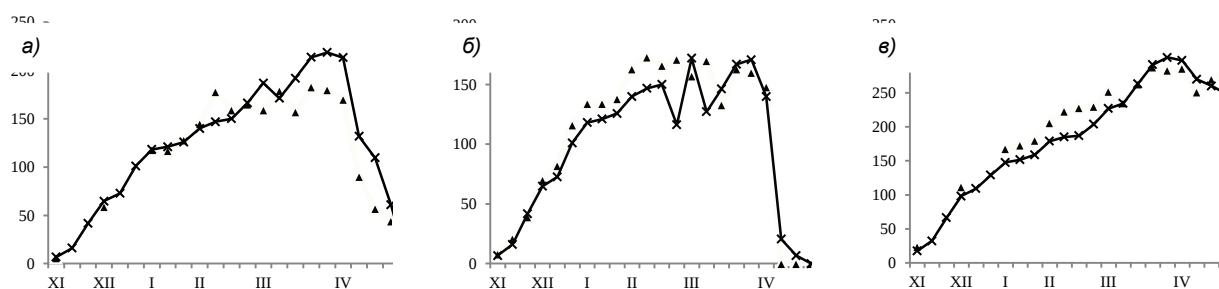


Рис. 2 Сезонная динамика фактического (точки) и расчетного (кривые) запаса воды в снежном покрове в 2013—2014 гг.: а) Пермь (поле); б) Пермь (лес); в) Бисер (лес)

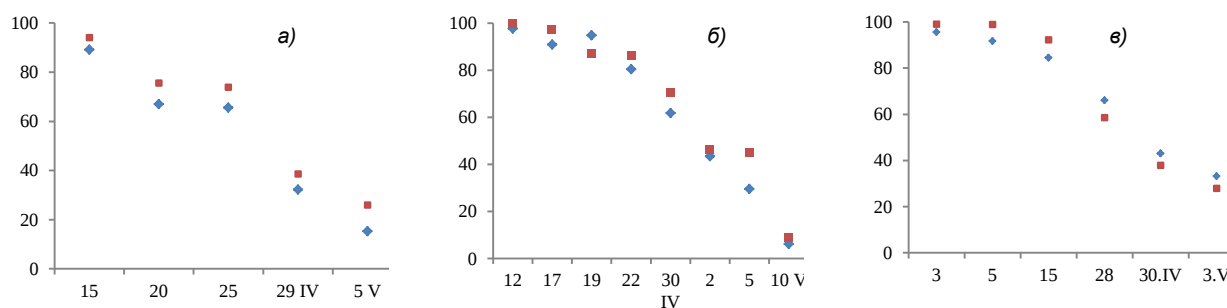


Рис. 3 Сопоставление определенной по спутниковым данным MODIS (синий символ) и расчетной (красный символ) заснеженности водосбора: а – 2013 г., б – 2014 г., в – 2015 г.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 14-05-00317_а, 14-05-31220 мол_а).

Литература

1. 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.
2. Кузьмин П. П. Процесс таяния снежного покрова. – Л., Гидрометеиздат, 1961, 346 с.
3. Шихов А. Н. Комплексный мониторинг и оценка геоэкологических последствий опасных гидрометеорологических явлений на территории Уральского Прикамья. /Диссертация канд. геогр. наук. – Пермь, выполнена в Пермском государственном национальном исследовательском университете, 2014-03-27, 2014, 216 с.
4. Шутов В. А., Калужный И. Л. Анализ пространственного распределения зимних осадков и снегозапасов в бассейне р. Белой. – Метеорология и гидрология, 1997, № 1, с. 105–114.