

## Моделирование процессов формирования и таяния снежного покрова на водосборе Воткинского водохранилища

*Шихов А.Н., Связзов Е.М.*

*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, And3131@inbox.ru*

**Ключевые слова:** снежный покров, снеготаяние, запас воды в снеге, геоинформационное моделирование, космический мониторинг.

На реках водосбора Воткинского водохранилища, расположенного в пограничной зоне между Восточно-Европейской равниной и Уральскими горами, наиболее значимой фазой гидрологического режима является весеннее половодье, обусловленное таянием накопленного за зиму снежного покрова. Сток весеннего половодья составляет 60% и более объема годового стока, в период половодья регулярно подвергаются затоплению населенные пункты и сельскохозяйственные земли. В связи с этим, мониторинг и прогноз хода весеннего половодья является весьма актуальной задачей.

Важнейшим фактором, определяющим объем стока, максимальные уровни и расходы воды весеннего половодья является процесс снеготаяния. Интенсивность таяния снежного покрова и объем поступающих на водосборы талых вод обусловлены сложным взаимным влиянием комплекса гидрометеорологических условий и свойств подстилающей поверхности. В связи с этим, при расчетах и прогнозах интенсивности снеготаяния используются цифровые модели рельефа и карты типизации растительного покрова (Land Cover/Land Use maps) [5, 6].

Целью настоящего исследования является разработка и валидация пространственной модели процессов формирования и таяния снежного покрова на водосборе Воткинского водохранилища средствами ГИС-технологий. Площадь исследуемого водосбора составляет 184 тыс. км<sup>2</sup>. Большая его часть расположена на востоке Восточно-Европейской равнины, около 30% территории относится к Северному и Среднему Уралу. Преобладающим типом растительности являются вторичные темнохвойно-мелколиственные среднетаежные и южнотаежные леса.

С учетом плотности наблюдательной сети, размер ячейки раstra при моделировании принят равным 3000 м. Подготовка данных и расчеты выполнялись средствами программных продуктов ArcGis 10.1, Scanex Image Processor 3.6.12 и SAGA 2.0. Расчет интенсивности снеготаяния выполняет-



шагом 12 ч, а водоотдачи снежного покрова – с суточным шагом. Перспектива исследования охватывает 2010–2014 гг., достаточно разнообразные и репрезентативные по условиям формирования и таяния снежного покрова.

В качестве входной информации в модели формирования и таяния снежного покрова используются ежедневные данные наблюдений на сети метеостанций и прогнозные поля осадков по мезомасштабной модели прогноза погоды WRF/ARW. Высотные зависимости и влияние различных типов растительного покрова учитывались с использованием цифровой модели рельефа и карты типов подстилающей поверхности, созданной по разносезонным снимкам Terra MODIS. Для калибровки модели и проверки результатов использованы также данные ДЗЗ низкого и среднего разрешения и данные снегомерных съемок. Выходные данные модели — площадь заснеженности, запас воды в снеге и поступление талых вод на водосборы рек (с суточным шагом).

*Расчет максимального запаса воды в снежном покрове* за 2010–2012 гг. выполнялся на основе данных маршрутных снегомерных съемок. Интерполяция этих данных выполнялась по методу В.А. Шутова [4], с учетом высотного градиента снеготаяния и поправочных коэффициентов характеризующих влияние различных типов растительного покрова. Данный метод оценки снеготаяния имеет ряд недостатков, обусловленных низкой плотностью и нерепрезентативностью сети снегомерных наблюдений. Также он не позволяет учесть значительные различия в продолжительности снеготаяния между различными высотными поясами.

В связи с этим, в 2013–2014 гг. были проведены численные эксперименты по расчету запасов воды в снежном покрове на основе суммирования данных об осадках холодного периода, полученных по мезомасштабной модели прогноза погоды WRF/ARW с пространственным разрешением 10 км. Важными преимуществами мезомасштабных моделей прогноза погоды, которые могут быть использованы при расчетах снеготаяния, является объективный учет перераспределения осадков в зависимости от рельефа, направления и скорости воздушных потоков, и высокая достоверность определения фазы осадков.

Расчет снеготаяния на основе данных модели WRF/ARW выполнялся путем суммирования осадков холодного периода, с учетом снеготаяния при оттепелях и влияния различных типов растительного покрова. При этом выделялись периоды неустойчивого снеготаяния и устойчивых морозов (когда влиянием оттепелей можно пренебречь).

Валидация результатов расчета снеготаяния выполнена по данным снегомерных съемок. Результаты сопоставления расчетного и фактического



снегозапаса (по снегомерным маршрутам) в холодный период 2012–2013 гг. показаны на рис. 1. Можно отметить, что достоверность оценки снегозапасов во второй половине зимы оказывается удовлетворительной. Среднеквадратическая ошибка расчета не превышает 20% от фактического снегозапаса на метеостанциях, но на отдельных метеостанциях она может быть больше (до 50 мм). Отклонения результатов расчета от фактического запаса воды в снежном покрове объясняются как систематическим завышением сумм осадков по модели WRF/ARW в марте 2013 г., так и локальными особенностями расположения снегомерных маршрутов, которые не учитываются в модели.

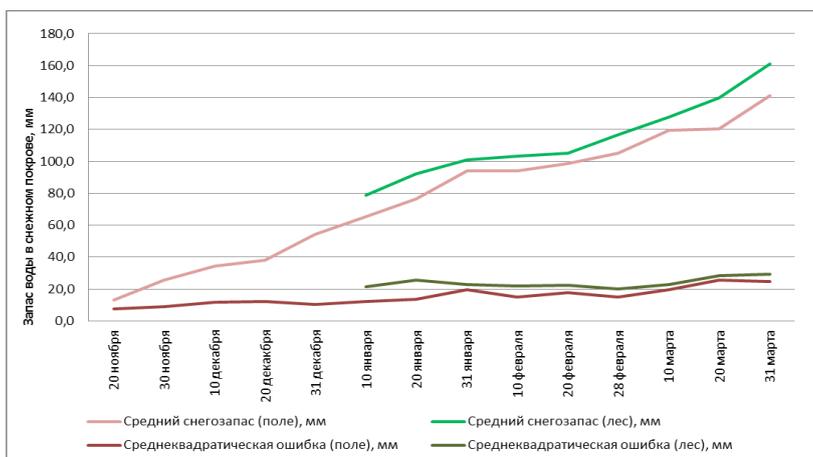


Рис. 1. Сопоставление фактического и расчетного запаса воды в снежном покрове в холодный период 2012–2013 гг.

**Расчет интенсивности снеготаяния на водосборах рек** выполнялся на основе упрощенного метода теплового баланса, предложенного П.П. Кузьминым [1]. Сходный метод используется также в модели формирования и таяния снежного покрова, разработанной Институтом водных проблем РАН [6]. Метод П.П. Кузьмина основан на решении уравнения теплового баланса снежного покрова в предположении, что температура тающего снега равна 0°. При расчетах интенсивности снеготаяния выделяются ее адвективная и радиационная составляющие, и учитывается испарение со снежного покрова.

В качестве входных метеорологических данных для расчета снеготаяния используются поля температуры и влажности воздуха, скорости ветра, суммарной солнечной радиации, общей и нижней облачности, жидких и твер-



осадков. Восстановление входных полей метеоэлементов за каждый день периода снеготаяния выполнялось средствами ГИС-технологий. При этом использовались как фактические данные наблюдений, так и данные объективного анализа глобальной модели прогноза погоды GFS/NCEP и мезомасштабной модели WRF/ARW. При интерполяции данных наблюдений сети метеостанций учитывались зависимости метеовеличин от высоты местности и типа растительного покрова. Более подробно методика восстановления полей метеоэлементов при моделировании процесса снеготаяния рассмотрена в работе [3].

Вычисленные величины интенсивности снеготаяния и испарения суммировались за суточные интервалы времени. Дальнейший расчет площади заснеженности, водоотдачи и остаточного снеговзапаса, выполнялся с суточным шагом. Площадь снежного покрова определялась по методу А.Г. Ковзеля, на основе типовых кривых распределения снеговзапаса для лесных и нелесных участков. Используемые параметры кривых распределения снеговзапаса для исследуемой территории представлены в работе [2]. Водоотдача снежного покрова рассчитывалась по известной методике, с учетом водоудерживающей способности снега, которая принимается равной для леса — 20%, для поля — 15%. Поступление талых вод на водосбор складывается из водоотдачи снежного покрова и выпадающих на водосбор твердых и жидких осадков. При моделировании учитывалось также формирование и таяние временного снежного покрова в весенний период (что особенно характерно для горной части водосбора).

Для автоматизации вычислений разработан программный модуль (расширение AddIn ArcGis 10.1) на языке C++. Пример результатов моделирования (за 2013 г.) приведен на рис. 2.

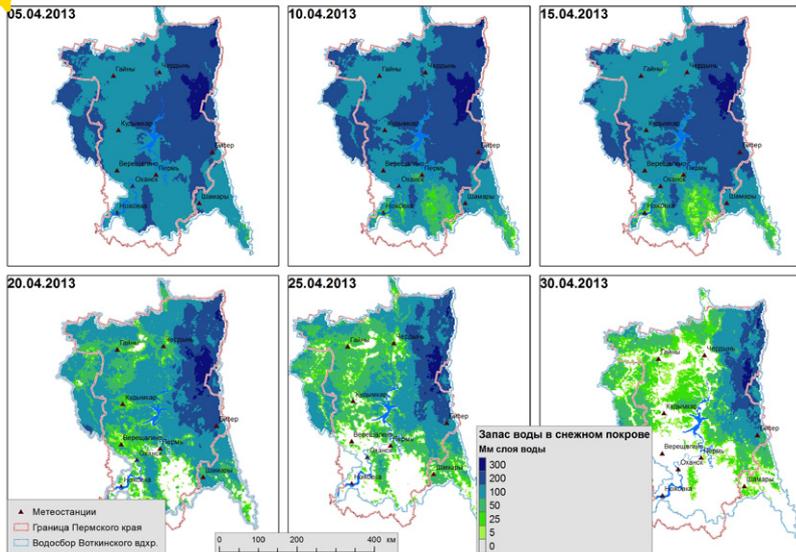


Рис. 2. Динамика процесса снеготаяния на водосборе Воткинского водохранилища в апреле 2013 г.

### Анализ результатов моделирования

Валидация результатов моделирования процесса снеготаяния выполнена двумя способами:

1. По данным снегомерных съемок сопоставлены расчетные и фактические запасы воды в снежном покрове.
2. По данным космического мониторинга сопоставлена фактическая и расчетная заснеженность водосбора.

Валидация результатов по данным космического мониторинга основана на использовании данных Terra/Aqua MODIS. Дешифрирование снежного покрова основано на расчете нормализованного дифференциального снежного индекса NDSI. Пороговое значение NDSI принималось равным 0,35. Все пиксели, имеющие значение NDSI больше порогового, рассматривались как заснеженные: на безлесных участках — на 50% и более площади, на лесных участках — на 80% и более площади. Эти соотношения были получены в результате сравнительного анализа снимков Terra/Aqua MODIS со снимками более высокого разрешения. Таким образом, была сопоставлена фактическая и расчетная заснеженность на участках, не закрытых облачностью, за



дольные (малооблачные) дни в период снеготаяния. Полученные результаты, на примере 2013 г., приведены в табл. 1.

В большинстве случаев получено хорошее совпадение фактической и расчетной заснеженности территории (за исключением темнохвойных лесов, в которых оценка заснеженности по спутниковым данным недостоверна). Это указывает на объективность используемых в модели зависимостей максимального снегозапаса и других входных параметров от высоты местности и типов растительного покрова.

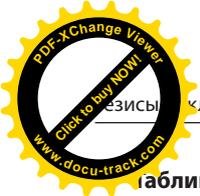
**Таблица 1.** Сопоставление расчетной и фактической заснеженности территории весной 2013 г.

Дата		15.04.13	20.04.13	21.04.13	25.04.13	05.05.13
Площадь, свободная от облачности, тыс.кв.км		156,3	65,3	65,1	62,1	150,6
Площадь снежного покрова, %	Факт	91	68	34	62	15
	Расчет	97	70	49	50	18

**Валидация результатов моделирования по данным снегомерных съемок** выполнена за 2010–2013 гг. Сравнение фактических и расчетных запасов воды в снежном покрове выполнено отдельно для полевых, лесных снегомерных маршрутов, и для пунктов, в которых снегомерные съемки проводятся как в лесу, так и в поле. Достоверность результатов расчета оценивалась по величинам среднеквадратических ошибок, которые приведены в табл. 2.

Основными причинами отклонений расчетного снегозапаса от фактического являются:

- завышение интенсивности снеготаяния (чаще в лесу) или занижение (обычно в поле);
- недооценка водоудерживающей способности снега в лесу;
- ошибки при расчете максимального накопленного снегозапаса;
- нерепрезентативность снегомерного маршрута в сравнении с окружающей территорией (типичная для водосборов горных рек);
- ошибки в снегомерных наблюдениях на гидропостах.

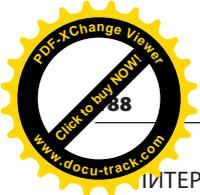
**Таблица 2.** Среднеквадратические ошибки результатов расчета запаса воды в снежном покрове (мм)

Год	Тип снегомерного маршрута	Среднеквадратическая ошибка расчета
2010	Только лес	39,4
	Только поле	22,8
	Среднее (для станций с двумя маршрутами)	27,4
2011	Только лес	43,5
	Только поле	27
	Среднее (для станций с двумя маршрутами)	33,3
2012	Только лес	28
	Только поле	27,8
	Среднее (для станций с двумя маршрутами)	26,4
2013	Только лес	47
	Только поле	57,1
	Среднее (для станций с двумя маршрутами)	41,9

### Заключение

Рассмотренная методика позволяет рассчитать запасы воды в снеге, поступление талых вод на водосборы и площадь заснеженности с учетом мезомасштабных неоднородностей распределения снежного покрова (обусловленных характером рельефа и растительности). В результате сопоставления расчетной и фактической заснеженности водосборов (определенной по данным ДЗЗ) установлено, что в большинстве случаев модель адекватно описывает динамику снеготаяния, как в равнинных, так и в горных районах. При сопоставлении расчетного и фактического запаса воды в снеге в ряде случаев выявлены существенные расхождения, которые могут быть связаны с ненадежностью данных снегомерных съемок в весенний период. Предложенная методика может быть использована в краткосрочных гидрологических прогнозах, как составной элемент модели формирования весеннего стока.

*Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проекты № 14-05-00317 А, 14-05-31220 мол\_а).*



## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 346 с.
2. Лебедева Н.Д. Методика краткосрочного прогноза гидрографа притока воды к водохранилищу Камской ГЭС // Труды ЦИП. Л.: Гидрометеиздат, 1963. Вып. 130. с. 87–125.
3. Шихов А.Н. Комплексный мониторинг и оценка геоэкологических последствий опасных гидрометеорологических явлений на территории Уральского Прикамья: дис. канд. геогр. наук. Пермь, 2014. 216 с.
4. Шутов В.А. Методы анализа пространственной изменчивости снегозапасов // Известия РАН, Серия географическая. 1998. №1. с. 122–132.
5. Яковченко С.Г. Создание геоинформационных систем в инженерной гидрологии: дис. д-ра техн. наук. Барнаул, 2007. 406 с.
6. Kuchment L.S. Use of satellite-derived data for characterization of snow cover and simulation of snowmelt runoff through a distributed physically based model of runoff generation / L. Kuchment, P. Romanov, A. Gelfan, V. Demidov // Hydrology and Earth system science, 2010. Vol. 14. pp. 339–350.