

МОНИТОРИНГ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА РЕКАХ ВОДОСБОРА ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В 2014 Г.

Шихов А.Н., Абдуллин Р.К.

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь, Россия (614990, г. Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15), e-mail: and3131@inbox.ru

В статье рассматривается опыт ведения комплексного мониторинга формирования и прохождения весеннего половодья на реках водосбора Воткинского водохранилища в 2014 г. Определены основные задачи мониторинга: оценка запасов воды в снежном покрове, расчет поступления талых вод на водосборы рек, наблюдение за развитием опасных гидрологических явлений на основе данных космической съемки. Описана методика расчета запасов воды в снежном покрове с использованием данных мезомасштабной модели прогноза погоды WRF/ARW. Проведено сравнение расчетного снеговзапаса с данными снегомерных съемок, и подтверждена достаточная точность полученных результатов. Рассмотрена также методика расчета интенсивности снеготаяния и поступления талых вод на водосборы рек. Проведена валидация результатов моделирования площади заснеженности по спутниковым данным Terra/Aqua MODIS. Также рассмотрены используемые при решении задач мониторинга данные космической съемки и области их применения.

Ключевые слова: весеннее половодье, снежный покров, опасные гидрологические явления, комплексный мониторинг.

MONITORING OF SPRING FLOOD FORMATION AND PASSING ON RIVERS OF THE VOTKINSKOE RESERVOIR CATCHMENT AREA IN 2014

Shikhov A.N., Abdullin R.K.

Perm State University, Perm, Russia (614990, Perm, 15 Bukireva street), e-mail: gis@psu.ru

The article describes the experience of complex monitoring of spring flood formation and passing on rivers of the Votkinskoe reservoir catchment area in 2014. It is determined the main objectives of monitoring. There are the evaluation of snow water equivalent, the calculation of meltwater inflow to the watershed and the observation of development of dangerous hydrological phenomena using the remote sensing data. It is described the method of evaluation of snow water equivalent using the WRF/ARW mesoscale weather forecast model. The comparison of the calculated snow water equivalent and snow survey data was confirmed the high accuracy of calculation results. It is described the method of calculation of snowmelt intensity and meltwater inflow to the watershed. The validation of the calculated snow cover area is based on Terra/Aqua MODIS satellite data. In addition, it is characterized the remote sensing data and their application at the solving of objectives of monitoring.

Keywords: spring flood, snow cover, dangerous hydrological phenomena, complex monitoring.

Введение

Прохождение весеннего половодья на реках, относящихся к водосбору Воткинского водохранилища, довольно часто сопровождается развитием опасных гидрологических явлений, которые в отдельные годы (например, в 1979, 1998 гг.) наносят значительный ущерб. В настоящее время применение распределенных моделей процесса формирования весеннего стока, средств и методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет значительно повысить эффективность мониторинга опасных гидрологических явлений и достоверность их прогноза, что способствует снижению ущерба. В ряде регионов России ведется комплексный мониторинг прохождения половодья на основе моделей формирования стока (блок краткосрочного прогноза) и данных ДЗЗ различного пространственного разрешения (оценка текущей ситуации) [1; 5]. Но для большинства регионов, в том числе для

Пермского края, проблема внедрения современных технологий в систему мониторинга остается актуальной на фоне произошедшего сокращения наблюдательной сети.

В то же время следует отметить, что процессы снеготаяния и формирования весеннего половодья на водосборе Воткинского водохранилища изучались многими авторами. В частности, в работе Н.Д. Лебедевой был предложен и протестирован на обширном материале метод расчета притока талых вод к створу Камской ГЭС [7]. Данный метод был адаптирован и усовершенствован В.Г. Калининным (с применением ГИС-технологий) [2; 3]. В 2009-2013 гг. проводился космический мониторинг паводкоопасных территорий Пермского края, мониторинг динамики снеготаяния по данным Terra/Aqua MODIS, выполнялись расчеты поступления талых вод на водосбор водохранилища на основе методов геоинформационного моделирования [9].

Целью настоящего исследования была валидация методов расчета запасов воды в снеге и интенсивности снеготаяния, изложенных в работе [9] на материалах 2014 г. В ходе мониторинга формирования и прохождения весеннего половодья на реках водосбора Воткинского вдхр. в 2014 г. решались несколько задач:

- расчет максимального запаса воды в снежном покрове;
- моделирование процесса снеготаяния и расчет поступления талых вод на водосбор;
- мониторинг схода снежного покрова по данным ДЗЗ Terra/Aqua MODIS;
- наблюдение за развитием весеннего половодья и ледовой обстановкой на реках с использованием данных ДЗЗ среднего пространственного разрешения (Landsat 7/8).

Расчет максимального запаса воды в снежном покрове

Расчет максимального снегозапаса в условиях сложного рельефа и редкой наблюдательной сети представляет определенную сложность вследствие высокой степени его пространственной изменчивости. Для решения этой задачи могут быть использованы как данные маршрутных снегомерных съемок, так и данные об осадках холодного периода, оба подхода имеют свои преимущества и недостатки [9; 10]. Ранее на материалах 2010-2013 гг. было установлено, что расчет снегозапасов путем интерполяции данных снегосъемок может в отдельных случаях сопровождаться значительными ошибками [9].

В связи с этим, а также по причине недоступности данных снегосъемок в оперативном режиме, в 2014 г. расчет снегозапасов был выполнен на основе данных о суммах осадков холодного периода. Были проведены эксперименты по расчету максимального снегозапаса на основе прогнозных полей осадков по мезомасштабной численной модели атмосферы WRF (Weather Research and Forecasting). Данная модель, разработанная Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR) совместно с Национальным центром прогнозирования состояния окружающей среды (NCEP), широко применяется как для

оперативного прогнозирования, так и в исследовательских целях. Опыт ее применения для прогноза сильных снегопадов на территории Пермского края показывает, что модель успешно воспроизводит пространственное положение зон осадков и их интенсивность [4]. Основными преимуществами использования модели WRF/ARW для расчета зимних осадков и снегозапасов являются объективный учет перераспределения осадков в зависимости от высоты местности, экспозиции склонов, скорости ветра, а также учет фазы осадков (выделяются снег, дождь, замерзающие осадки, ледяная крупа, град).

Сопоставление рассчитанных по модели месячных сумм осадков в холодный период (с ноября по март) 2013-2014 гг. с фактическими данными наблюдений указывает на отсутствие значительных систематических ошибок (в среднем по исследуемой территории) во все месяцы холодного периода, за исключением марта (когда наблюдалось систематическое завышение количества осадков в среднем на 50%).

Прогнозы по модели WRF/ARW составлялись в период с 13.10.2013 по 30.04.2014 г. на сервере Пермского государственного университета. Выходные поля метеозлементов имеют пространственное разрешение 10 км и временное разрешение 3 ч. Расчет производился для полигона 2000 x 2000 км. Данные были получены в формате *.dat и затем конвертировались в точечные векторные слои. Каждая точка такого слоя представляет собой узел расчетной сетки, а атрибутивная таблица содержит данные о твердых и жидких выпавших осадках. Далее производилась интерполяция этих данных методом сплайна, с пространственным разрешением 3000 м. Метод сплайн-интерполяции был выбран, поскольку он обеспечивает прохождение выходной растровой поверхности через все точки изменений без появления большого количества артефактов (локальных замкнутых пиков или впадин).

Запас воды в снеге определялся путем суммирования выпавших осадков холодного периода с учетом таяния снега при оттепелях и поправочных коэффициентов, характеризующих влияние различных типов растительного покрова на процесс снегонакопления, использованных в работе [9]. Применение более сложных моделей процесса снегонакопления требует наличия более детальной информации о лесной растительности, в частности данных о полноте леса, получение которой для обширной территории затруднительно [6]. При расчете максимального снегозапаса на основе модельных данных об осадках были выделены периоды неустойчивого и устойчивого снегонакопления. В период неустойчивого снегонакопления оттепели оказывают существенное влияние на формирование снегозапасов, прежде всего на равнинной части водосбора. При этом наблюдается устойчивый рост запаса воды в снеге в горных и предгорных районах водосбора, и многократное установление и сход снежного покрова – на равнинной территории. В 2013 г. период неустойчивого снегонакопления на водосборе

Воткинского водохранилища продолжался с 13 октября по 30 ноября. В период устойчивого снегонакопления (с устойчивой отрицательной температурой воздуха) влиянием оттепелей на формирование снегозапасов можно пренебречь. Продолжительность данного периода составила 99 сут. (с 01.12.2013 по 09.03.2014 г.).

Запас воды в снежном покрове за период устойчивого снегонакопления рассчитывался путем суммирования выпавших осадков, с введением поправок на тип подстилающей поверхности, предложенных в работе В.А. Шутова [10]. Для учета влияния фактора растительности использовалась карта типизации растительного покрова, созданная на основе разносезонных снимков Terra/Aqua MODIS (рис. 1). Ее более подробное описание представлено в работе [9].

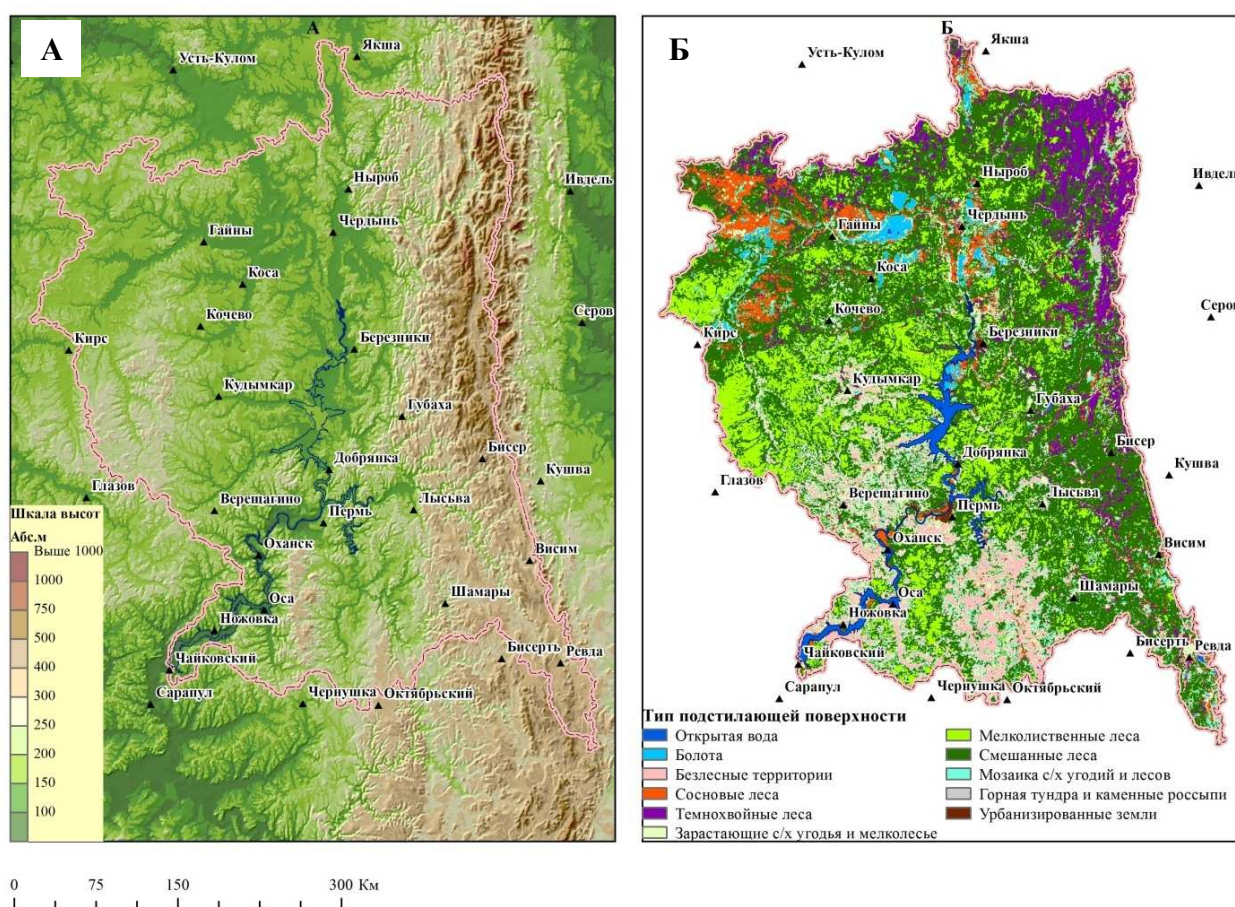


Рис. 1. Характеристика исследуемого водосбора Воткинского водохранилища:
А – цифровая модель рельефа; Б – карта типизации растительного покрова.

При выполнении расчетов за период неустойчивого снегонакопления учитывалось снеготаяние при оттепелях. Интенсивность снеготаяния определялась в зависимости от среднесуточной температуры воздуха (с учетом ее вертикального градиента) и типов растительного покрова.

Также был выполнен расчет запасов воды в снежном покрове на основе фактических данных о накопленных осадках холодного периода (по наблюдениям 34-х метеостанций) по

методике, описанной в работе [9]. Расчет производился отдельно за периоды устойчивого и неустойчивого снегонакопления. Проведено сопоставление результатов расчета максимального снегозапаса на основе фактических данных об осадках, и по прогнозным полям осадков, полученным по модели WRF/ARW (рис. 2).

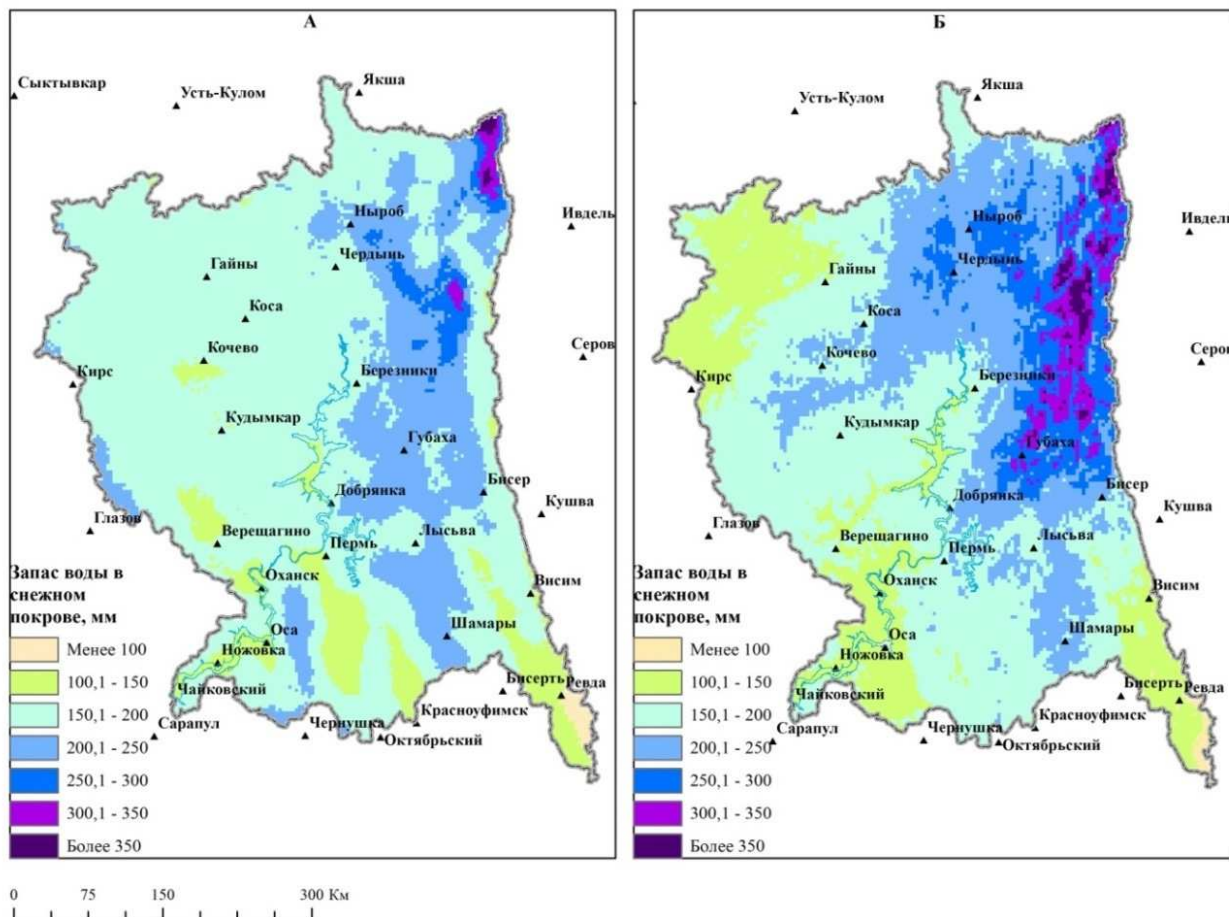


Рис. 2. Расчетный запас воды в снежном покрове на водосборе Воткинского водохранилища на 28.02.2014 г.: А – по данным модели WRF/ARW; Б – по данным об осадках на сети метеостанций.

Достоверность результатов расчета запасов воды в снежном покрове оценивалась путем сопоставления с данными маршрутных снегомерных съемок на 28.02.2014 г. по метеостанциям Пермского края. Данные снегосъемки на гидропостах не использовались по причине их низкой надежности. Для сравнения с данными снегосъемок были извлечены значения расчетного снегозапаса из ячеек регулярной сетки, пространственное положение которых соответствует положению снегомерных маршрутов. При этом не удастся учесть локальные ландшафтные характеристики участка снегомерного маршрута, влияющие на процесс снегонакопления (мезорельеф, породный состав и полнота лесонасаждений). Была вычислена среднеквадратическая ошибка (СКО) расчета снегозапасов по формуле:

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

где n – число метеостанций, по которым выполнялось сопоставление (в данном случае - 34); $SWE_{ф}$ – запас воды в снежном покрове по данным снегосъемок (фактический); $SWE_{л}$ – запас воды в снежном покрове, рассчитанный по модельным данным.

Также определялось отношение СКО к среднему фактическому снегозапасу. Результаты приведены в табл. 1. Из нее видно, что при расчете запасов воды в снежном покрове по прогнозным данным об осадках модели WRF/ARW СКО оказывается существенно меньше, чем при расчете снегозапасов по данным об осадках на метеостанциях.

Таблица 1

Оценка достоверности результатов расчета снегозапасов на 28.02.2014 г.

Тип снегомерного маршрута	Лес		Поле	
Число снегомерных маршрутов	16		15	
Метод расчета	По данным об осадках на метеостанциях	По прогнозным данным об осадках модели WRF/ARW	По данным об осадках на метеостанциях	По прогнозным данным об осадках модели WRF/ARW
СКО, мм	38,6	19,3	35,8	18,5
% СКО от среднего значения снегозапаса	0,22	0,11	0,21	0,11

Моделирование процесса снеготаяния

Снеготаяние – важнейший фактор, определяющий объем стока, максимальные уровни и расходы воды во время прохождения весеннего половодья. Расчет интенсивности снеготаяния и поступления талых вод на водосборы выполнялся средствами ГИС-технологий на основе методов растровой алгебры. Подготовка данных и расчеты выполнены средствами программного продукта ArcGis. Для исследуемой территории характерна низкая плотность сети наблюдения. Исходя из этого, размер ячейки раstra при моделировании принят равным 3000 м. Временной шаг модели снеготаяния принимается равным 24 ч.

Интенсивность снеготаяния рассчитывалась в зависимости от средней суточной температуры воздуха с учетом типа подстилающей поверхности. Коэффициент стаивания изменялся от 1,5 мм/1 °С×сут для темнохвойных лесов до 5 мм/1 °С×сут для урбанизированных территорий. Коэффициенты стаивания определялись по результатам калибровки с учетом условий исследуемой территории, проведенной на материалах 2010-2013 гг. Выбор упрощенного метода расчета снеготаяния был обусловлен необходимостью ведения расчетов в оперативном режиме для обширной территории, а также достаточной надежностью данного метода для территорий, расположенных севернее 55° с.ш. [7].

При расчете интенсивности снеготаяния для учета влияния фактора высоты местности и типов растительности использовались цифровая модель рельефа водосбора и карта типизации растительного покрова (рис. 2). В качестве входной информации в модели использованы данные о запасе воды в снежном покрове на момент начала снеготаяния (методика расчета которого описана выше) и ежедневные данные наблюдений сети метеостанций (среднесуточная температура воздуха и суммы осадков).

Восстановление полей температуры воздуха и сумм осадков по данным сети метеостанций выполнялось интерполяционными методами. При этом учитывался вертикальный градиент температуры воздуха и зависимость сумм осадков от высоты местности. Подробнее методика интерполяции описана в работе [9].

Выходными данными модели снеготаяния являются площадь заснеженности, поступление талых вод на водосбор и остаточный снегозапас. Расчет площади заснеженности, водоотдачи и остаточного снегозаписа на каждый день периода снеготаяния выполнялся в программном модуле (расширение AddIn ArcGis 10.1), написанном на языке программирования C# (авторы Шихов А.Н. и Быков А.В.), реализующем расчет водоотдачи по методике, описанной в работе Н.Д. Лебедевой [7]. При этом параметр водоудерживающей способности снега принимался равным для безлесной территории – 15%, для леса – 20%. Выпадающие в период снеготаяния осадки разделялись на твердые и жидкие, в зависимости от температуры воздуха в приземном слое и на изобарических поверхностях 925 и 850 гПа.

За дату начала снеготаяния было принято 09.03.2014, когда произошел переход среднесуточной температуры воздуха через 0 °С по западу исследуемой территории. Процесс снеготаяния весной 2014 г. имел неустойчивый характер в связи с аномально теплой погодой в марте и неоднократными сильными похолоданиями в апреле. В связи с этим местами на равнинной части территории снижение снегозаписа началось в середине марта, а в горной части водосбора увеличение снегозаписов продолжалось до второй декады апреля (рис. 3). В среднем по исследуемой территории запас воды в снежном покрове был выше нормы.

Для отслеживания динамики схода снежного покрова и контроля результатов моделирования использовались данные ДЗЗ со спутников Terra/Aqua MODIS. Детектирование снежного покрова по данным MODIS основано на расчете «Нормализованного дифференциального снежного индекса» (NDSI) с пространственным разрешением 1000 м. Основными препятствиями для надежного определения заснеженности по спутниковым данным являются облачность и залесенность территории. За период мониторинга лишь каждый пятый из полученных снимков имел незначительную облачность. Для оценки достоверности расчетов при моделировании процесса снеготаяния сравнивалась

фактическая (определенная по спутниковым данным) и расчетная площадь, занятая снежным покровом (табл. 2). Для сравнения были выбраны дни с минимальной облачностью.

В большинстве случаев расчетная заснеженность территории оказывается выше фактической (5 и 10 мая превышение значительное). Это связано с тем, что оценка заснеженности по величине NDSI на территориях, покрытых хвойным лесом, ненадежна. Поэтому спутниковые данные о заснеженности несколько занижены. Наибольшее расхождение наблюдается 5 и 10 мая, когда вся территория за исключением северо-западной части водосбора Воткинского вдхр. была свободна от облачности. К тому времени в южной части исследуемой территории снег практически сошел и остался лишь в восточной и северо-восточной части, где растительность в основном представлена темнохвойными лесами. В отдельных случаях, по южной части водосбора фактическая заснеженность несколько превышала расчетную. Это связано с некоторым завышением расчетной интенсивности снеготаяния на безлесных участках.

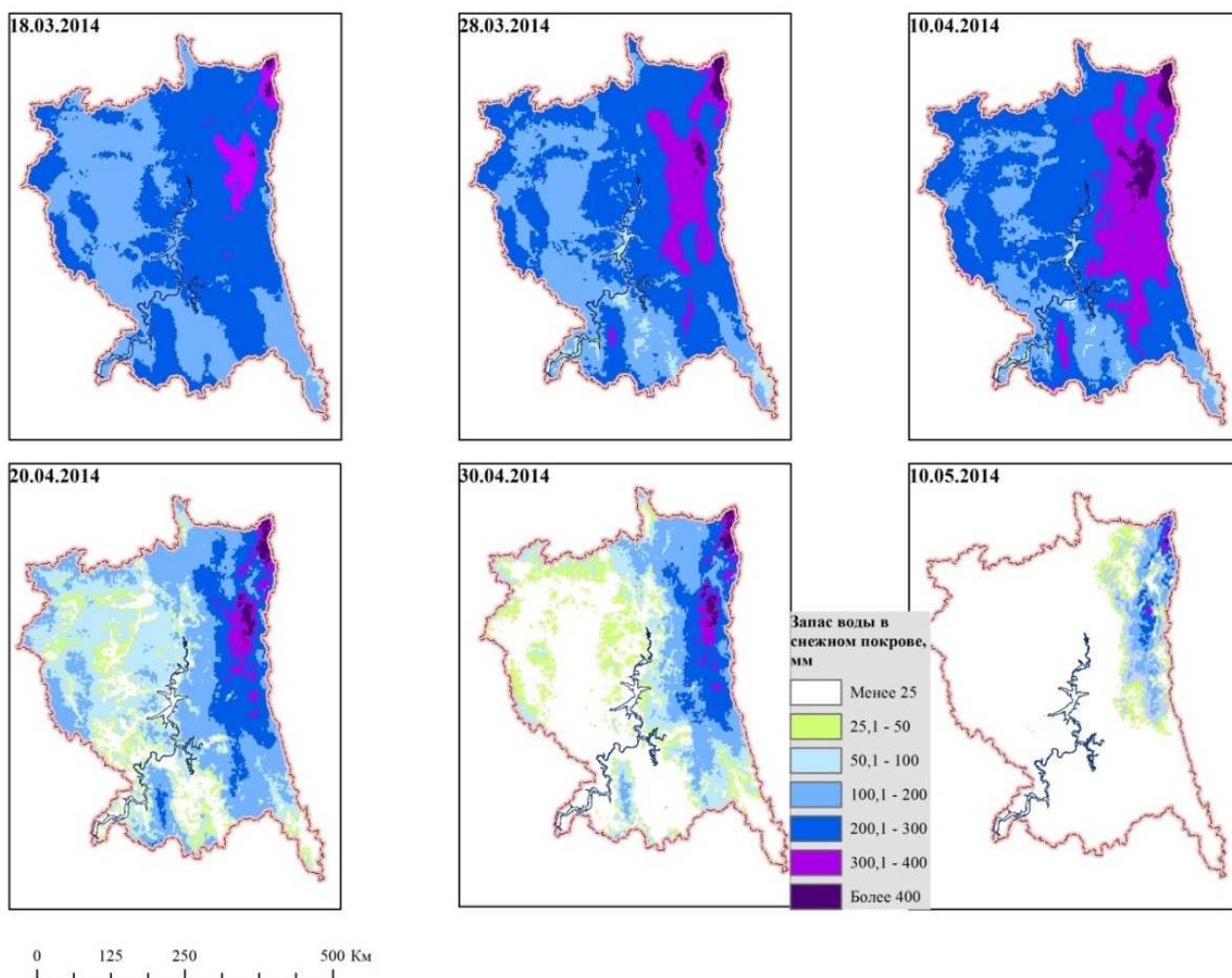


Рис. 3. Динамика процесса снеготаяния весной 2014 г.

**Сопоставление фактической и расчетной заснеженности территории водосбора
Воткинского водохранилища весной 2014 г.**

Дата		12.04.	16.04.	17.04.	20.04.	22.04.	30.04.	02.05.	05.05.	10.05.
Доля площади водосбора, свободная от облачности, %		80,1	39,9	35,2	51,5	45,5	45,4	54,6	71,1	92,2
Площадь снежного покрова, %	Факт	91,4	86,3	84,3	84,9	75,2	59,0	41,9	28,5	6,0
	Расчет	99,3	94,3	88,4	75,0	85,4	58,9	37,1	42,2	12,8

Космический мониторинг затопления территорий

В период прохождения весеннего половодья в 2014 г. с 1 по 19 мая неоднократно наблюдались подтопления населенных пунктов (г. Кудымкар, Чусовой, Красновишерск, пос. Яйва, с. Усть-Коса и др.), расположенных в поймах рек Иньвы, Косы, Вишеры, Яйвы, Усьвы, Чусовой, Чермоза, Велвы, Лолога. Для мониторинга затопления территории и ледовой обстановки на реках водосбора Воткинского вдхр. в апреле-мае 2014 г. использовались космические снимки со спутников Landsat 7/8. Снимки Landsat были получены с интернет-ресурсов NASA, где они находятся в свободном доступе и выкладываются на сервер через несколько часов после пролета спутника. Выбор данных был обусловлен открытым режимом доступа, временным разрешением съемки (8 сут.), точной пространственной привязкой снимков. Для выявления зон затоплений по снимкам LANDSAT использовались ближний и средний ИК-каналы (рис. 4). Для оценки состояния ледового покрова на реках применяется визуальное дешифрирование в синтезе каналов Средний ИК – Ближний ИК – Красный. 17.04.2014 были выявлены заторы льда в нижнем течении р. Чусовая у гидропоста Лямино и выше по течению от пос. Верхнечусовские Городки. Фрагменты снимков паводкоопасных территорий в оперативном режиме публиковались на сайте «Опасные природные явления Пермского края» [8].

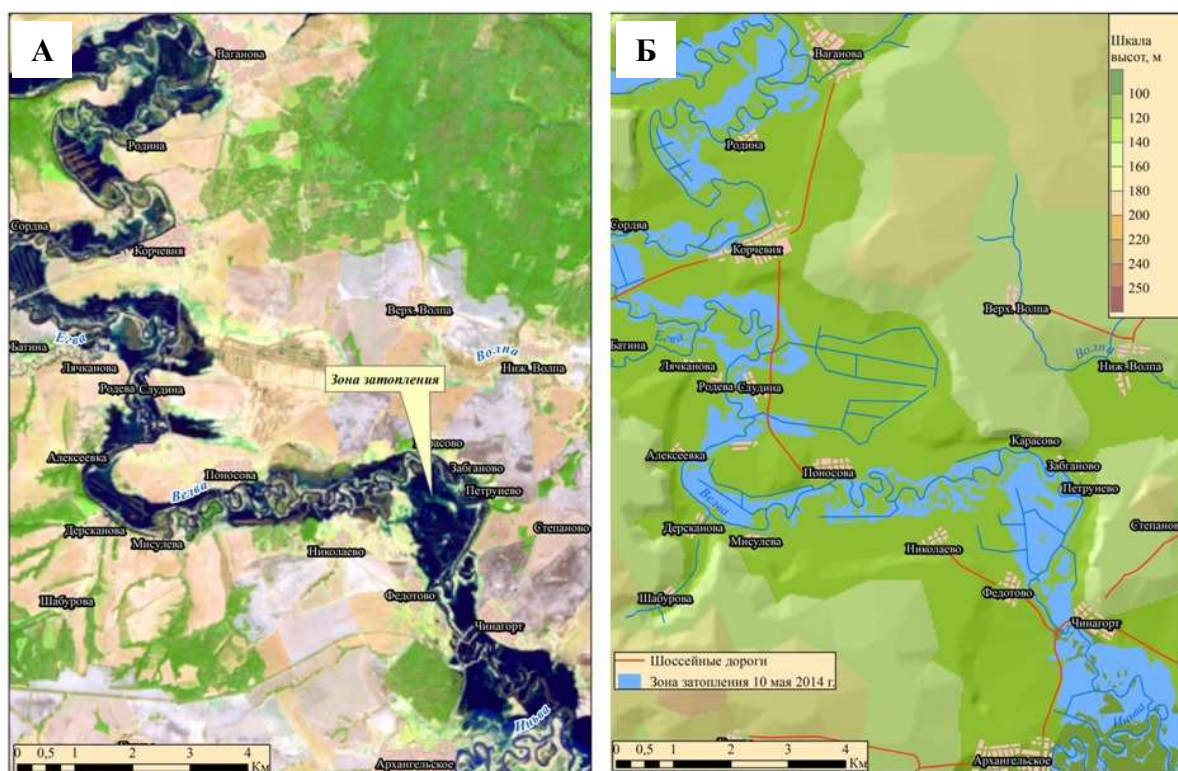


Рис. 4. Зона затопления на р. Велва (10.05.2014): А - снимок Landsat 8, Б - карта, полученная по снимку.

Заключение

В ходе мониторинга формирования и прохождения весеннего половодья в 2013-2014 гг. на реках водосбора Воткинского водохранилища был выполнен расчет максимальных снеготаяния и водоотдачи снежного покрова, а также получены и обработаны снимки паводкоопасных территорий. На основе полученных данных были выявлены особенности процессов снегонакопления и снеготаяния в 2013-2014 гг. на исследуемой территории (аномально позднее установление снежного покрова на большей части территории, превышение снеготаяния относительно нормы, продолжительное перебойное снеготаяние и, как следствие, – многопиковый характер половодья), а также сделаны более общие выводы.

Установлено, что для расчета запасов воды в снежном покрове на исследуемой территории могут быть использованы прогнозные поля осадков по мезомасштабной модели прогноза погоды WRF/ARW. Изложенная методика обеспечивает восстановление поля снеготаяния с достаточно высоким пространственным разрешением и с приемлемой точностью.

Моделирование процесса снеготаяния на основе метода температурных коэффициентов таяния позволило оценить пространственное распределение снеготаяния в весенний период. Отклонения результатов расчета от фактических данных обусловлены некоторым

завышением интенсивности снеготаяния на безлесных участках по южной части водосбора в апреле, а также недостоверностью оценки площади заснеженности по спутниковым данным для залесенных участков севера Пермского края.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проекты № 14-05-31220, 14-05-00317).

Список литературы

1. Бураков Д.А. Автоматизированная технология мониторинга весеннего половодья на сибирских реках / Д.А. Бураков, В.Н. Копылов, В.Ю. Ромасько, Е.В. Швецова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2009. - Т. 6, № 2. - С. 528–534.
2. Калинин В.Г. Оценка влияния рельефа при расчете пространственного распределения снежного покрова в период снеготаяния / В.Г. Калинин, К.Д. Микова, Е.В. Трифонова, В.С. Русаков, Л.С. Русаков // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : в 4 т. Т. III: Управление водными ресурсами речных водосборов : тр. Междунар. науч. - практ. конф. (17-22 мая 2011 г., Пермь) / Перм. гос. ун-т. - Пермь, 2011. - С. 93–96.
3. Калинин В.Г. Усовершенствование метода расчета снеготаяния с применением ГИС-технологий / В.Г. Калинин, К.Д. Микова, Е.В. Трифонова, В.С. Русаков, Л.С. Русаков // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий : материалы межрегион. науч. - практ. конф. Челябинск, 2010. - С. 62–66.
4. Калинин Н.А., Попова Е.В. Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15-16 марта 2013 г. // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. - 2013. - № 6. - С. 7-16.
5. Копылов В.Н. Космический мониторинг окружающей среды. - Ханты-Мансийск : Полиграфист, 2008. - 216 с.
6. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Физико-математическая модель формирования снежного покрова и снеготаяния в лесу // Метеорология и гидрология. – 2004. - № 5. - С. 85-95.
7. Лебедева Н.Д. Методика краткосрочного прогноза гидрографа притока воды к водохранилищу Камской ГЭС // Труды ЦИП, Вып. 130. - М. : Гидрометеоиздат, 1963. - С. 87 – 125.
8. Опасные природные явления Пермского края. Космический мониторинг прохождения половодья [Электронный ресурс]. – URL: <http://accident.perm.ru/index.php/monitoring/flood-monitoring> (дата обращения: 01.06.2014).

9. Шихов А.Н. Комплексный мониторинг и оценка геоэкологических последствий опасных гидрометеорологических явлений на территории Уральского Прикамья : дис. канд. ... геогр. наук. - Пермь, 2013. - 216 с.
10. Шутов В.А. Методы анализа пространственной изменчивости снеготпасов // Известия РАН, Сер. Географическая. - 1998. - № 1. - С. 122-132.

Рецензенты:

Калинин Н.А., д.г.н., профессор, зав. кафедрой метеорологии и охраны атмосферы ПГНИУ, г. Пермь.

Калинин В.Г., д.г.н., профессор кафедры физической географии и ландшафтной экологии ПГНИУ, г. Пермь.