

*А.Н. Шихов, Е.М. Связов*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА  
ПОГОДЫ WRF/ARW (НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРА ВОТКИНСКОГО  
ВОДОХРАНИЛИЩА)**

*A.N. Shikhov, E.M. Svyazov*

**THE STUDY OF SNOW ACCUMULATION PROCESSES USING THE WRF/  
ARW MESOSCALE WEATHER FORECASTING MODEL (ON EXAMPLE OF  
VOTKINSKOE RESERVOIR CATCHMENT AREA)**

*Предложена методика расчета запасов воды в снежном покрове на основе прогнозных полей осадков по мезомасштабной модели атмосферы WRF/ARW. Проведено сопоставление фактических и прогнозных сумм осадков холодного периода, а также фактических и расчетных снегозапасов на водосборе Воткинского водохранилища за холодный период 2012–2013 и 2013–2014 гг. Показано, что предложенная методика позволяет восстановить поле снегозапасов с высоким пространственным разрешением.*

*Ключевые слова: снежный покров, запас воды в снеге, модель WRF/ARW, осадки холодного периода.*

*This article describes the method of calculation of snow water equivalent using the forecasted precipitation data of mesoscale atmospheric model WRF/ARW. The authors have compared actual and forecasted cold season precipitation, and actual and estimated snow water equivalent in the the Votkinskoe reservoir catchment area, for the cold period 2012–2013 and 2013–2014 It is shown that the proposed method allows to evaluate snow water equivalent with high spatial resolution.*

*Key words: snow cover, snow water equivalent, WRF/ARW model, cold period precipitation.*

***Введение***

Сезонный снежный покров является важнейшей особенностью умеренного климата. Условия его формирования и таяния определяют многие природные процессы и влияют на все отрасли экономики, особенно на сельское хозяйство, строительство и транспорт. Одной из важных гидрологических задач является определение запаса воды в снежном покрове на водосборах рек к началу весеннего снеготаяния, поскольку снегозапас является основной величиной, необходимой для прогнозирования объемов стока, максимальных расходов и уровней воды в реках.

Традиционно для расчета запасов воды в снежном покрове на водосборах проводят интерполяцию данных маршрутных снегомерных съемок [Руководство..., 1989]. Однако в условиях сложного рельефа и редкой наблюдательной сети данный метод

имеет ряд недостатков. Редкая сеть снегосъемок не позволяет учесть мезомасштабные неоднородности поля снеготаяния, обусловленные влиянием рельефа и растительного покрова. Кроме того, не учитываются различия в продолжительности снегонакопления между различными высотными поясами. Как отмечено в работах В.А. Шутова, в некоторых случаях для прогноза весеннего стока горных рек Урала целесообразнее использовать не данные снегомерных наблюдений, а суммы осадков холодного периода [Шутов, 1997]. В свою очередь, станционные наблюдения за зимними осадками также имеют значительные погрешности, связанные с испарением и ветровым недоучетом осадков [Справочник..., 1969].

В связи с этим, актуальной задачей является совершенствование методов расчета снеготаяния. Одним из возможных его направлений является использование выходных данных мезомасштабных численных моделей прогноза погоды, позволяющих получать прогностические поля осадков с высоким пространственным разрешением (1–10 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.

Из существующих мезомасштабных моделей атмосферы, широкое распространение получила модель WRF/ARW (Weather Research and Forecasting), разработанная Национальным центром атмосферных исследований США (NCAR) совместно с Национальным центром прогнозирования состояния окружающей среды (NCEP). Опыт ее применения для прогноза сильных снегопадов на территории Пермского края показывает, что в большинстве случаев модель успешно воспроизводит пространственное положение зон осадков и их интенсивность. Однако оценка достоверности прогноза сильных снегопадов в марте-апреле 2013 г. показала, что в некоторых случаях модель может значительно (на 25–50 %) завышать количество выпавших осадков [Калинин, Попова, 2013; Шихов, Свиязов, 2013].

В России опыт применения мезомасштабных метеорологических моделей при расчетах снеготаяния и снеготаяния пока незначителен. Выполнялись, в частности, расчеты притока воды к Москворецким водохранилищам на основе модели формирования стока ECOMAG, в качестве исходных метеорологических данных для которой использовались результаты счета модели WRF/ARW [Антохина, 2012]. За рубежом мезомасштабные модели прогноза погоды часто используются в комплексе с гидрологическими моделями, для прогнозирования талого стока горных рек [Zhao et al, 2009].

### ***Исходные данные и методы исследования***

Целью данного исследования является оценка возможности применения выходных данных мезомасштабной численной модели прогноза погоды WRF/ARW для оценки запасов воды в снежном покрове на водосборе Воткинского водохранилища. Расчеты проведены за холодный период 2012–2013 и 2013–2014 гг. (от начала снеготаяния в горной части водосбора до начала интенсивного таяния снега).

В 2012–2013 гг. период расчета составил с 23.10.2012 по 31.03.2013, в 2013–2014 гг. — с 13.10.2013 по 31.03.2014.

В качестве входной информации для расчетов были использованы прогнозные поля осадков по модели WRF/ARW и данные наблюдений метеостанций. 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. Валидация полученных результатов выполнялась по данным снегомерных съемок.

Прогнозы по модели WRF составлялись с использованием динамического ядра ARW на срок 48 ч, от 0 ч текущего дня по Всемирному скоординированному времени. При дальнейших расчетах использовались данные на срок 15–39 ч от начала прогноза, чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения выпавших осадков на метеостанциях. Учитывался также тот факт, что в первые часы после запуска модели точность прогноза несколько ниже, чем в последующие сроки [Калинин, 2010].

При моделировании использовались следующие параметризации физических процессов:

- микрофизика облачности — схема Томпсона;
- потоки длинноволновой радиации — схема RRTM (Rapid Radiative Transfer Model);
- потоки коротковолновой радиации — схема Дудья;
- приземный слой — схема Монины-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия;
- подстилающая поверхность и почва — модель NOAH;
- пограничный слой — схема YSU (Yonsei State University, Юж. Корея);
- параметризация кучевой облачности — схема Каина-Фритша.

Полученные прогнозные поля осадков конвертировались в точечный векторный формат (в котором каждая точка представляет собой узел регулярной сетки модели, а атрибутивная таблица содержит данные о накопленных осадках). Далее выполнялось восстановление поля осадков на основе сплайн-интерполяции, с размером ячейки равным 3000 м. Таким образом, были вычислены суммы накопленных твердых и жидких осадков с суточным разрешением за весь период снегонакопления.

Расчет запасов воды в снеге на основе данных об осадках холодного периода требует учета снеготаяния при оттепелях и испарения снега (обусловленного, прежде всего, перехватом осадков кронами деревьев). В связи с этим, выделялись периоды устойчивого и неустойчивого снегонакопления. В период устойчивого снегонакопления влиянием оттепелей на процесс формирования снегозапасов можно пренебречь. В период неустойчивого снегонакопления на равнинной части исследуемого водосбора наблюдается, как правило, неоднократное установление и сход снежного покрова, а в горных районах — устойчивый рост снегозапасов.

Продолжительность периода неустойчивого снегонакопления в 2012 г. составила 34 сут. (с 23.10.2012 по 25.11.2012), а в 2013 г. — 49 сут. (с 13.10.2013 по 30.11.2013). Сумма осадков за этот период в горной части водосбора в обоих случаях значительно

превышала 100 мм. Период устойчивого снегонакопления в 2012–2013 гг. продолжался 125 сут. (с 26.11.2012 по 31.03.2013), а в 2013–2014 гг. — 97 сут. (с 01.12.2013 по 09.03.2014).

При выполнении расчетов за период неустойчивого снегонакопления было принято, что в формировании снежного покрова участвуют только твердые осадки. Интенсивность снеготаяния при осенних и весенних оттепелях рассчитывалась в зависимости от среднесуточной температуры воздуха и типа подстилающей поверхности. Выбор упрощенного метода расчета снеготаяния при оттепелях обусловлен тем, что интенсивные оттепели в ноябре и марте наблюдались при сплошной облачности, и в связи с этим доля радиационной составляющей снеготаяния была сравнительно мала. Среднесуточная температура воздуха интерполировалась по фактическим данным наблюдений метеостанций с учетом ее вертикального градиента. Водоотдача снежного покрова рассчитывалась по методике, изложенной в работе [Лебедева, 1963], с использованием разработанного программного модуля — расширения геоинформационной системы ArcGis 10.1 [Быков, Шихов, 2013].

В период устойчивого снегонакопления таяние снега при оттепелях не учитывалось (поскольку оттепели имели слабый и кратковременный характер). Прирост снегозапаса принимался равным сумме выпавших осадков.

На залесенных водосборах большое влияние на распределение снежного покрова оказывает характер лесной растительности. Вопрос о соотношении запасов воды в снежном покрове на лесных и безлесных участках, а также в различных типах леса рассматривался многими авторами, в частности П.П. Кузьминым [Кузьмин, 1961] и В.А. Шутовым [Шутов, 1994]. Ими было установлено, что обычно запас воды в снежном покрове в хвойных лесах оказывается существенно меньше, чем на безлесных участках, вследствие перехвата осадков кронами деревьев и их последующего испарения. В то же время, в мелколиственных лесах запас воды в снеге практически равен количеству выпавших осадков, за вычетом таяния при оттепелях.

Известны физически обоснованные модели процесса снегонакопления в лесу, позволяющие учесть процесс перехвата осадков растительностью и их последующее испарение. Такие модели разработаны как российскими, так и зарубежными авторами [Кучмент, Гельфан, 2004; Ellis et al, 2010]. Однако их использование требует наличия достаточно детальных данных о породном составе, полноте, возрасте и ярусности насаждения. В связи с этим, они используются обычно для небольших хорошо изученных бассейнов. При необходимости расчета снегозапасов на крупных водосборах с крайне неоднородным растительным покровом чаще применяются усредненные соотношения между снегозапасами в различных типах леса.

В данном исследовании использовались соотношения между снегозапасами в различных типах леса, рекомендованные В.А. Шутовым в работе [Шутов, 1997], а также в работе П.П. Кузьмина [Кузьмин, 1961]. Они приведены в табл. 1. Для выполнения расчетов использовалась карта типизации лесной растительности на водосборе, которая была создана на основе разновременных снимков Terra/Aqua MODIS (рис. 1). Результаты расчета запасов воды в снежном покрове за 2012–2013 и 2013–2014 гг. приведены на рис. 2, 3.

Таблица 1

**Использованные в работе соотношения между выпавшими осадками и снегозапасами  
для различных типов подстилающей поверхности**

Тип растительности	Поправочный коэффициент при расчете снегонакопления
Мелколиственный лес	1
Зарастающие сельхозугодья, мозаика сельхозугодий и лесов	0,95
Безлесная территория, болота, горные тундры	0,91
Смешанный лес	0,85
Темнохвойный лес	0,76
Сосновый лес	0,76
Урбанизированные земли	0,85

### *Результаты и их обсуждение*

#### **Оценка достоверности прогноза сумм зимних осадков по данным модели WRF/ARW.**

Достоверность прогноза зимних осадков по модели WRF/ARW является основным фактором, определяющим точность расчета снегозапасов по вышеописанной методике. Она оценивалась путем сопоставления фактических и прогнозных месячных сумм осадков в период снегонакопления в 2012–2013 и 2013–2014 гг. по 34 метеостанциям Пермского края и сопредельных территорий. Было выполнено сравнение сумм осадков на метеостанциях и в ячейках регулярной сетки, соответствующих положению метеостанций, и определена величина среднеквадратической ошибки прогноза по формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{\text{ф}} - Q_{\text{п}})^2},$$

где  $RMSE$  — среднеквадратическая ошибка прогноза;  $n$  — число метеостанций, по которым выполнялось сопоставление (в данном случае — 34);  $Q_{\text{ф}}$  — месячная сумма осадков по данным метеостанции;  $Q_{\text{п}}$  — месячная сумма осадков по модельным данным.

Также вычислялась отношение среднеквадратической ошибки прогноза к фактической сумме осадков, число станций на которых прогнозная сумма осадков оказалась больше (меньше) фактической и средняя величина превышения (занижения) прогноз-ной суммы осадков в сравнении с фактическими данными. Результаты проведенного сопоставления приведены в табл. 2, 3.

Сравнение сумм осадков по фактическим и прогнозным данным показывает, что в большинстве случаев модель завышает количество осадков. Значительное систематическое завышение количества осадков по модели в сравнении с фактическими данными имеет место в феврале, марте 2013 г. и в марте 2014 г. В остальных случаях завышение незначительно, и не превышает 12 % от количества выпавших осадков. В феврале 2014 г. в среднем по 34 метеостанциям прогнозная сумма осадков оказалась ниже фактической.

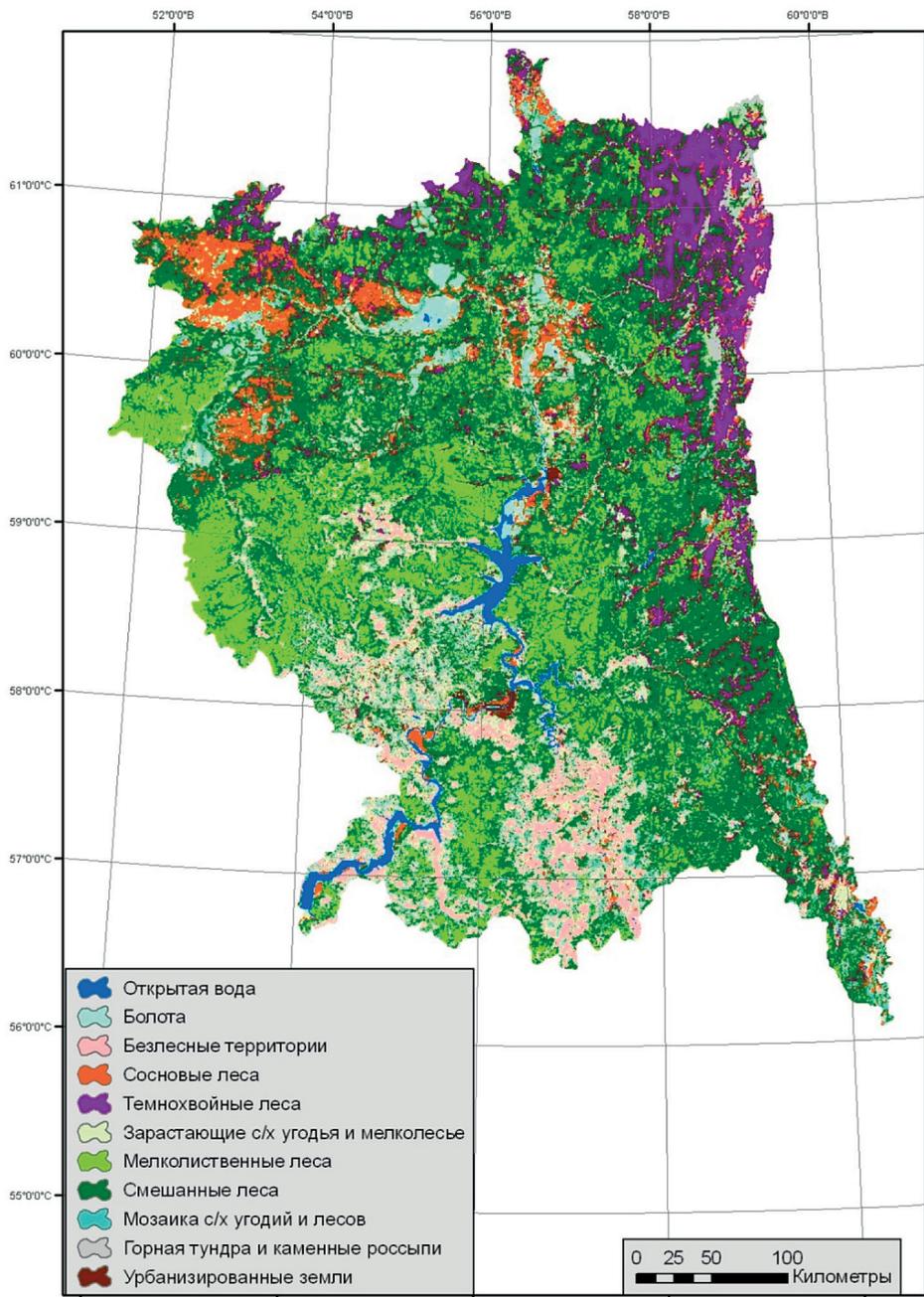


Рис. 1. Карта типизации растительного покрова на водосборе Воткинского водохранилища, используемая при моделировании процессов формирования и таяния снежного покрова

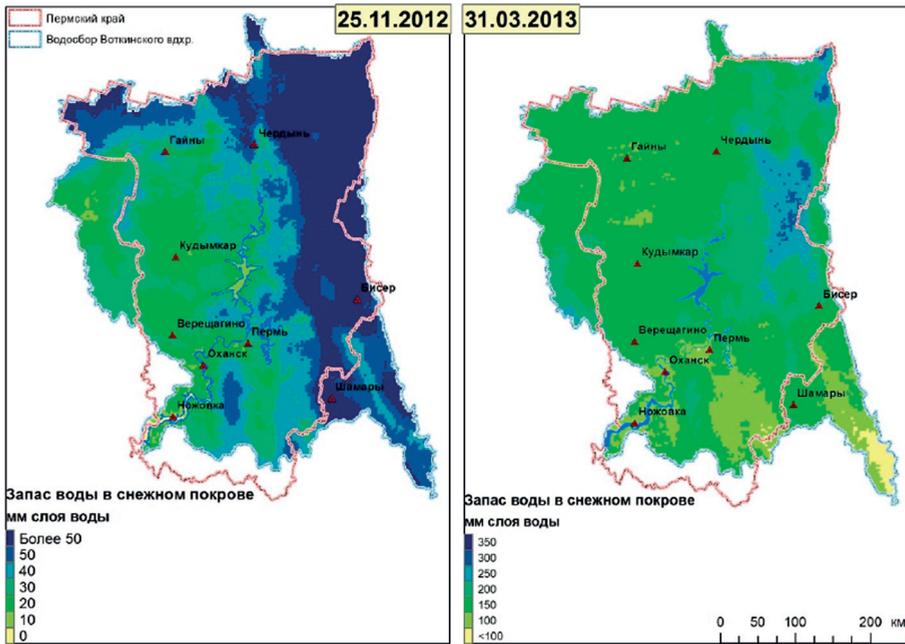


Рис. 2. Результаты расчета запасов воды в снежном покрове за 2012–2013 гг.

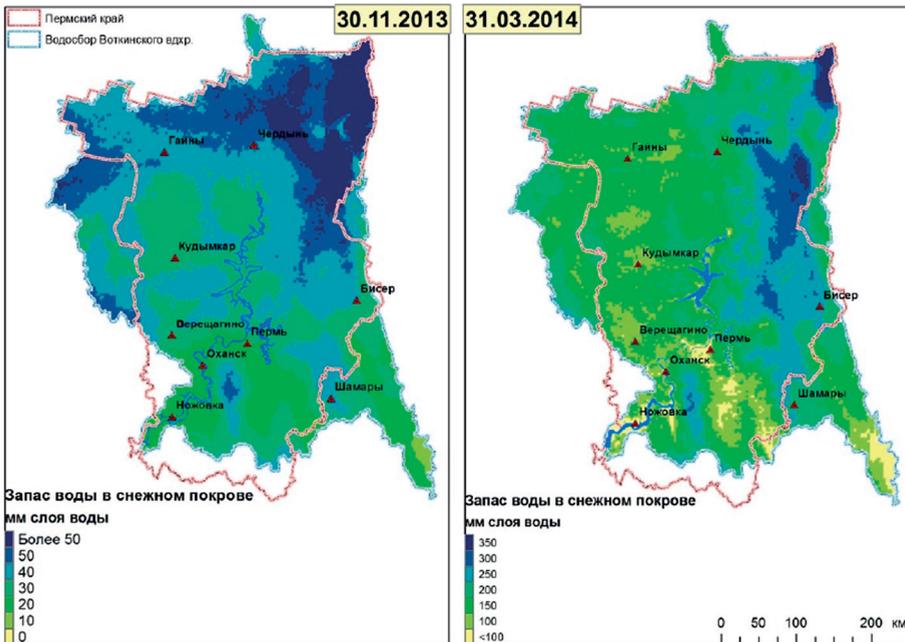


Рис. 3. Результаты расчета запасов воды в снежном покрове за 2013–2014 гг.

*Таблица 2*

**Оценка достоверности прогнозных сумм зимних осадков по модели WRF/ARW  
в холодный период 2012–2013 гг.**

Критерии оценки достоверности прогноза сумм осадков	Ноябрь 2012 г.	Декабрь 2012 г.	Январь 2013 г.	Февраль 2013 г.	Март 2013 г.
Средняя сумма осадков по фактическим данным 34-х метеостанций, мм	61,8	29,5	33,8	15,1	50,5
Средняя сумма осадков по данным модели WRF/ARW, мм	65,0	32,6	33,9	21,9	66,6
Среднеквадратическая ошибка прогнозной суммы осадков, мм	12,1	6,9	6,2	8,6	21,1
Отношение среднеквадратической ошибки к фактической сумме осадков, мм	20 %	23 %	18 %	57 %	42 %
Число метеостанций, на которых прогнозная сумма осадков оказалась ниже фактической	9	10	16	4	4
Среднее занижение прогнозной суммы осадков на этих станциях, мм	12,8	3,0	5,4	4,0	7,4
Число метеостанций, на которых прогнозная сумма осадков превысила фактическую	25	24	18	30	30
Среднее завышение прогнозной суммы осадков на этих станциях, мм	9,0	5,6	5,0	8,2	19,2

*Таблица 3*

**Оценка достоверности прогнозных сумм зимних осадков по модели WRF/ARW  
в холодный период 2013–2014 гг.**

Критерии оценки достоверности прогноза сумм осадков	Ноябрь 2013 г.	Декабрь 2013 г.	Январь 2014 г.	Февраль 2014 г.	Март 2014 г.
Средняя сумма осадков по фактическим данным 34-х метеостанций, мм	65,0	59,5	39,6	34,7	44,9
Средняя сумма осадков по данным модели WRF/ARW, мм	64,7	62,5	44,0	32,2	67,2
Среднеквадратическое отклонение прогнозной суммы осадков, мм	15,4	11,6	9,1	8,7	27,0
Отношение среднеквадратического отклонения к фактической сумме осадков, мм	23 %	20 %	23 %	25 %	60 %
Число метеостанций, на которых прогнозная сумма осадков оказалась ниже фактической	13	13	8	21	3
Среднее занижение прогнозной суммы осадков на этих станциях, мм	16,1	8,3	6,0	7,0	25,5
Число метеостанций, на которых прогнозная сумма осадков превысила фактическую	21	21	26	13	31
Среднее завышение прогнозной суммы осадков на этих станциях, мм	9,4	10,0	7,6	4,9	10,0

Среднеквадратическая ошибка прогноза месячных сумм осадков в большинстве случаев составляет 18–25 % от среднего количества выпавших осадков. Такие ошибки можно считать приемлемыми, поскольку их величина близка к погрешностям измерения твердых осадков на метеостанциях. В трех случаях (февраль и март 2013 г., март 2014 г.) среднеквадратическая ошибка прогноза значительно выше и составляет 42–60 % от среднего количества выпавших осадков. В этих случаях наблюдалось значительное завышение количества осадков по модели.

По некоторым метеостанциям (Оса, Чернушка) завышение прогнозных сумм осадков особенно значительно и в ряде случаев превышает 40 %. Характерно, что эти метеостанции расположены на открытых участках местности, и измерение сумм твердых осадков на них может иметь большие погрешности по причине выдувания снега из осадкомера.

Таким образом, прогнозные поля осадков по модели WRF/ARW за холодный период можно использовать для расчета запасов воды в снежном покрове, поскольку ошибка прогноза в большинстве случаев не превышает 25 % и сопоставима с ошибками измерения твердых осадков. Однако существенное завышение прогнозных сумм осадков в весенний период может привести к снижению точности расчетов снегозапасов.

#### **Оценка достоверности результатов расчета запасов воды в снежном покрове.**

Валидация результатов расчета запасов воды в снежном покрове на водосборе Воткинского водохранилища выполнена по данным маршрутных снегомерных съемок на 24 метеостанциях. Данные снегосъемки на гидропостах не использовались по причине их низкой надежности. Для сравнения с данными снегосъемок, были извлечены значения расчетного запаса воды в снежном покрове из ячеек регулярной сетки, пространственное положение которых соответствует положению снегомерных маршрутов. При этом не удается полностью учесть локальные ландшафтные характеристики участка снегомерного маршрута, влияющие на процесс снегонакопления (характер мезорельефа, породный состав и полнота лесонасаждений). Так же, как и в случае с осадками, определялась среднеквадратическая ошибка прогноза 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);  $SWE_{\Phi}$  — запас воды в снежном покрове по данным снегосъемок (фактический);  $SWE_{\Pi}$  — запас воды в снежном покрове, рассчитанный по модельным данным.

Результаты сопоставления фактических и расчетных снегозапасов в период снегонакопления в 2012–2013 и 2013–2014 гг. приведены на рис. 4, 5.

Можно отметить (рис. 4, 5) что достоверность оценки запаса воды в снежном покрове повышается в течение периода снегонакопления, и во второй половине зимы оказывается удовлетворительной. Среднеквадратическая ошибка расчета не превышает 20 % от фактического запаса воды в снеге на метеостанциях (за исключением одного случая в конце марта 2014 г.).

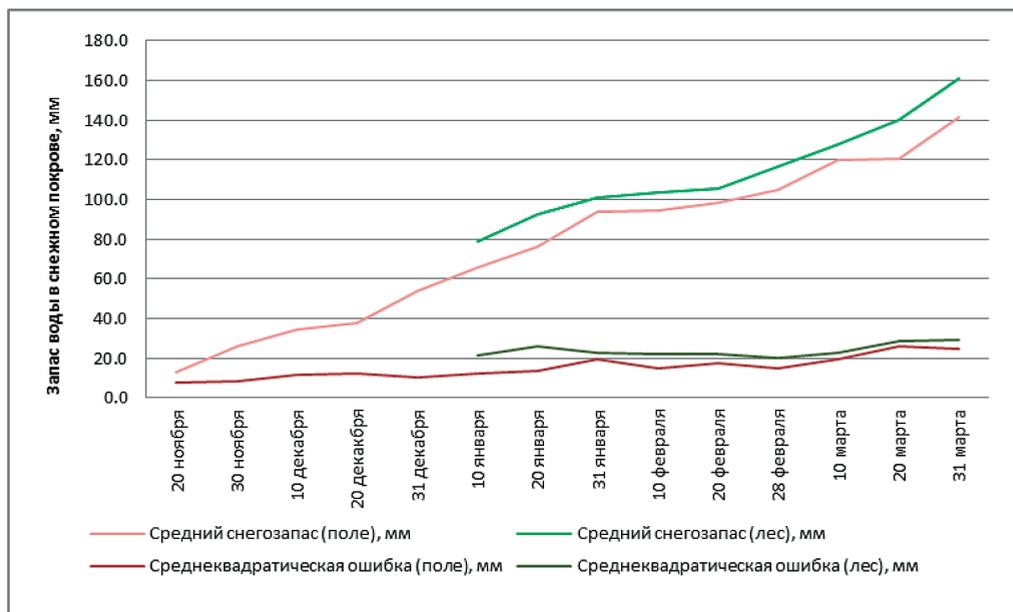


Рис. 4. Сопоставление фактического и расчетного запаса воды в снежном покрове в 2012–2013 гг.

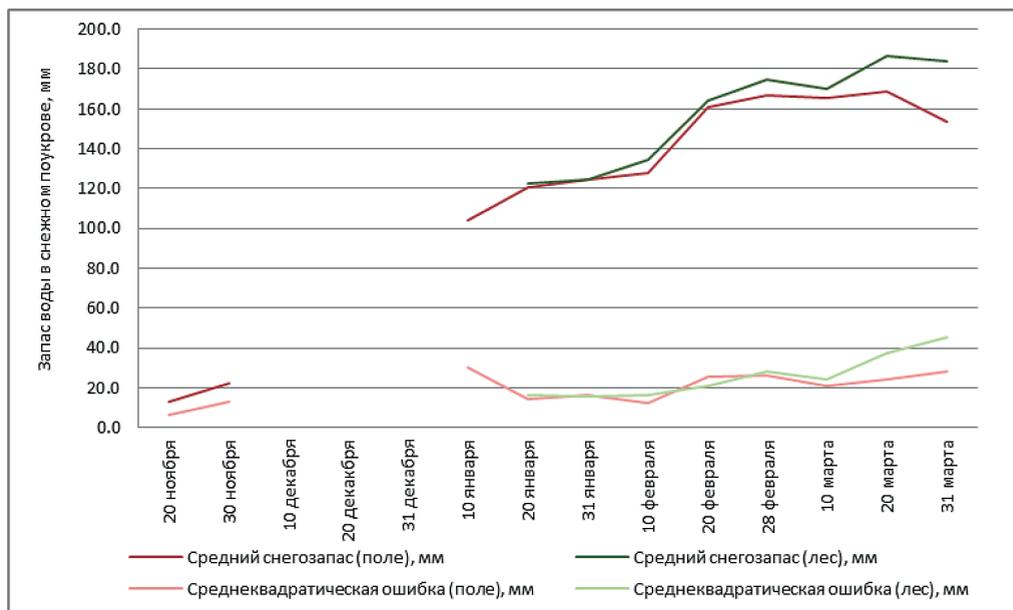


Рис. 5. Сопоставление фактического и расчетного запаса воды в снежном покрове в 2013–2014 гг.

В то же время, в начале холодного периода достоверность оценки снегозапасов в большинстве случаев неудовлетворительная, среднеквадратическая ошибка расчета составляет более 40 % от фактического снегозапаса. Причем даже на соседних станциях возможны сильные отклонения с противоположным знаком. Существенных отличий по величине ошибки, рассчитанной для полевых и лесных маршрутов, не прослеживается.

Представляет интерес анализ распределения ошибок расчета снегозапасов по исследуемой территории. В 2012–2013 гг. в период с декабря по февраль, в среднем по водосбору отмечалось занижение расчетного запаса воды в снеге в сравнении с фактическими данными, которое достигло максимума в конце января. В этот период расчетный снегозапас был в среднем на 10–12 мм меньше фактического, а на станциях Чердынь и Бисер — на 34–48 мм. Занижение может объясняться локальными условиями расположения этих метеостанций, способствующими накоплению большого количества снега (метеостанция Бисер расположена на горе с отметкой 463 м, а метеостанция Чердынь — недалеко от западного склона Полюдова Кряжа). Кроме того, можно отметить, что используемые коэффициенты снегонакопления для различных типов леса в условиях зимы 2012–2013 гг. оказались недостоверны.

Во второй половине марта 2013 г. на большинстве метеостанций наблюдалось уже превышение расчетного снегозапаса над фактическим. Это связано со значительным завышением прогнозной суммы осадков, выпавших в феврале-марте. Наибольшее превышение расчетного снегозапаса над фактическим (на 30 мм и более) наблюдалось на метеостанциях Верещагино, Березники, Чермоз, Кочево, где ошибки расчета сумм осадков по модели WRF были максимальными в период сильных снегопадов 15–17 марта.

Зимой 2013–2014 гг. до середины февраля расчетный и фактический снегозапас в среднем по исследуемой территории практически совпадали. Значительные отклонения (на 20–40 мм) как в сторону завышения, так и в сторону занижения наблюдались на отдельных метеостанциях (Бисер, Губаха, Пермь, Кунгур, Чердынь). Во второй половине февраля отмечалось систематическое занижение снегозапаса в среднем по исследуемой территории на 8–12 % от его фактической величины. Наибольшее занижение расчетного снегозапаса (на 37–46 мм в сравнении с фактическими данными) наблюдалось на севере и северо-востоке края на станциях Ныроб, Чердынь, Усть-Черная, Бисер. Это объясняется существенным занижением сумм осадков по модели WRF/ARW, отмечавшимся в этих районах в феврале 2014 г.

В марте 2014 г. расчетный снегозапас в среднем по территории водосбора снова совпадает с фактическими данными. При этом на отдельных метеостанциях отмечалось как сильное завышение расчетного снегозапаса (метеостанции Вая, Губаха), так и его занижение (метеостанции Гайны, Кочево, Ныроб). В связи с этим, среднеквадратическая ошибка расчета снегозапасов в марте 2014 г. существенно увеличилась. Наибольшие отклонения расчетного снегозапаса от фактического, зафиксированные для метеостанций Вая и Губаха, объясняются локальными особенностями их расположения. Снегомерные маршруты этих метеостанций проложены в глубоких долинах рек и нерепрезентативны для прилегающей территории.

### Выводы

На материалах 2012–2014 гг. установлено, что использование численной модели прогноза погоды WRF/ARW для расчета запасов воды в снежном покрове на водосборе Воткинского водохранилища в целом является оправданным. Предложенная методика позволяет на основе прогнозных полей осадков по модели восстановить пространственное распределение снеготаяния с достаточно высоким пространственным разрешением, объективно учитывая влияние рельефа. Среднеквадратическая ошибка результатов расчета во второй половине периода снеготаяния составляет 15–20 % от фактически наблюдаемого запаса воды в снежном покрове.

Перспективы повышения точности расчета снеготаяния связаны со следующими усовершенствованиями методики расчетов:

- Для выявления причин систематического завышения количества осадков по модели WRF/ARW в весенний период необходимо использовать различные параметризации микрофизики облачности и конвекции, и выбрать те из них, которые обеспечивают наибольшую достоверность прогноза.
- Запуск модели WRF/ARW с более высоким пространственным разрешением (порядка 4 км) вероятно позволит повысить точность восстановления полей осадков, за счет более детального учета влияния рельефа на перераспределение осадков. Однако это потребует больших затрат машинного времени для выполнения расчетов.
- Необходим более детальный учет влияния характера лесной растительности на процесс снеготаяния, в частности создание карт типизации растительности с более высоким пространственным разрешением, учет фактора полноты леса.

### Литература

1. Антохина Е.Н. Водный режим рек Европейской территории России и его изучение на основе модели формирования стока: дисс. на соиск. ученой степени канд. геогр. наук. — М., 2012. — 219 с.  
*Antokhina E.N. Vodnyy rezhim rek Evropeyskoy territorii Rossii i ego izucheniye na osnove modeli formirovaniya stoka: diss. na soisk. uchenoy stepeni kand. geogr. nauk. — M., 2012. — 219 s.*
2. Быков А.В., Шихов А.Н. Программный модуль для расчета интенсивности процессов снеготаяния в среде ArcGis 10.1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618090 от 29.08.2013.  
*Bykov A.V., Shikhov A.N. Programmnyy modul' dlya rascheta intensivnosti protsessov snegotayaniya v srede ArcGis 10.1. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2013618090 ot 29.08.2013.*
3. Калинин Н.А., Кислов А.В., Бабина Е.Д., Ветров А.Л. Оценка качества воспроизведения моделью MM5 температуры воздуха в июле на Урале. // *Метеорология и гидрология*, 2010, № 10, с. 15–22.  
*Kalinin N.A., Kislov A.V., Babina E.D., Vetrov A.L. Otsenka kachestva vosproizvedeniya model'yu MM5 temperaturny vozdukh v iyule na Urale. // Meteorologiya i gidrologiya, 2010, № 10, s. 15–22.*
4. Калинин Н.А., Попова Е.В. Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15–16 марта 2013 г. // *Ученые записки РГГМУ*, 2013, № 6, с. 7–16.  
*Kalinin N.A. Popova E.V. Chislennyy prognoz opasnykh i neblagopriyatnykh snegopadov v Permskom krae 15–16 marta 2013 g. // Uchenye zapiski RGGMU, 2013, № 6, s. 7–16.*
5. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. — Л.: Гидрометеиздат, 1961. — 346 с.  
*Kuz'min P.P. Protsses tayaniya snezhnogo pokrova. — L.: Gidrometeoizdat, 1961. — 346 s.*
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.

- Kuchment L.S., Gel'fan A.N.* Fiziko-matematicheskaya model' formirovaniya snezhnogo pokrova i snegotayaniya v lesu. // *Meteorologiya i gidrologiya*, 2004, № 5, s. 85–95.
7. *Lebedeva H.D.* Metodika kratkosrochnogo prognoza gidrografa pritoka vody k vodokhranilishchu Kamskoy GЭС. // *Труды ЦИП*, 1963, вып. 130, с. 87–125.  
*Lebedeva N.D.* Metodika kratkosrochnogo prognoza gidrografa pritoka vody k vodokhranilishchu Kamskoy GES. // *Trudy TsIP*, 1963, вып. 130, s. 87–125.
  8. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 1. — Л.: Гидрометеоздат, 1989. — 356 с.  
*Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam.* Вып. 1. — Л.: Gidrometeoizdat, 1989. — 356 s.
  9. Справочник по климату СССР. Вып. 9. Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области и Башкирская АССР. Ч.4: Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. — Л.: Гидрометеоздат, 1968. — 372 с.  
*Spravochnik po klimatu SSSR.* Вып. 9. Permskaya, Sverdlovskaya, Chelyabinskaya, Kurganskaya oblasti i Bashkirskeya ASSR. Ch.4: Vlazhnost' vozdukh, atmosferynye osadki i snezhnyy pokrov. — Л.: Gidrometeoizdat, 1968. — 372 s.
  10. *Шихов А.Н., Свиязов Е.М.* Прогнозирование динамики процесса снеготаяния на Западном Урале с применением мезомасштабной модели WRF/ARW. // *Современные проблемы науки и образования*, 2013, № 4. — Электронный ресурс: [www.science-education.ru/110-9962] (дата обращения: 30.08.2013).  
*Shikhov A.N., Sviyazov E.M.* Prognozirovanie dinamiki protsessa snegotayaniya na Zapadnom Urale s primeneniem mezomasshtabnoy modeli WRF/ARW. // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, № 4. — Elektronnyy resurs: [www.science-education.ru/110-9962] (data obrashcheniya: 30.08.2013).
  11. *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.  
*Shutov V.A., Kalyuzhnyy I.L.* Analiz prostranstvennogo raspredeleniya zimnikh osadkov i snegozapasov v bassejne r. Beloy. // *Meteorologiya i gidrologiya*, 1997, № 1, s. 105–114.
  12. *Шутов В.А.* Распределение запасов воды в снежном покрове на водосборах лесной зоны. // *Метеорология и гидрология*, 1994, № 9, с. 85–94.  
*Shutov V.A.* Raspredelenie zapasov vody v snezhnom pokrove na vodosborakh lesnoy zony. // *Meteorologiya i gidrologiya*, 1994, № 9, s. 85–94.
  13. *Ellis C., Pomeroy J., Brown T., MacDonald J.* Simulation of snow accumulation and melt in needleleaf forest environments. // *Hydrology and Earth Systems sciences (HESS)*, 2010, vol. 14(10), pp. 1897–1906, doi:10.5194/hess-14-925-2010.
  14. *Zhao Q., Liu Z., Ye1 B., Qin Y., Wei Z., Fang S.* A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM. // *Hydrology and Earth Systems sciences (HESS)*, 2009, vol. 13(10), pp. 1897–1906, doi:10.5194/hess-13-1897-2009.