

УДК 551.323:004.9

*С.В. Пьянков, А.Н. Шихов***ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ СНЕГОТАЯНИЯ МЕТОДАМИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ)**

Предложена методика пространственного моделирования процессов снеготаяния на основе данных стандартной сети метеонаблюдений. Методика реализуется средствами ГИС-технологий. При расчете учитываются статистические зависимости снегонакопления и интенсивности снеготаяния от параметров рельефа и типов подстилающей поверхности. На основе предложенной методики проведены расчеты снеготаяния на водосборах рек Уральского Прикамья, за 2010 – 2012 гг. Оценка достоверности результатов вычислений выполнена по материалам снегомерных съемок и по данным дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: снежный покров, интенсивность снеготаяния, запас воды в снежном покрове, геоинформационное моделирование, данные дистанционного зондирования Земли.

Интенсивность поступления талых вод на водосборы рек является важнейшим фактором, определяющим объем стока, максимальные расходы и уровни весеннего половодья. В связи с этим исследованию процессов снеготаяния уделяется большое внимание как в России, так и за рубежом. Основным препятствием для повышения точности расчетов снегонакопления и снеготаяния в моделях формирования весеннего стока остается низкая плотность и нерепрезентативность сети метеонаблюдений. В то же время с применением цифровых моделей рельефа (ЦМР) и карт типов растительного покрова, полученных на основе дешифрирования данных космической съемки, появилась возможность создания пространственных (распределенных) моделей, не только для тестовых водосборов, но и для обширных территорий. Одним из эффективных инструментов реализации таких моделей при решении гидрологических задач являются геоинформационные технологии [1-4].

В настоящей статье рассмотрен опыт применения методов пространственного моделирования процессов снегонакопления, снеготаяния и поступления талых вод на водосборы рек Уральского Прикамья. Верификация результатов основана на их сопоставлении с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и с данными снегомерных съемок на сети метеостанций и гидропостов.

Теоретической основой расчета интенсивности снеготаяния на заданном отрезке времени является уравнение теплового баланса снежного покрова, предложенное П.П. Кузьминым [5].

$$W_B = \int_0^t (W'_P - W'_K - W'_H - W'_П - W'_Н) dt, \quad (1)$$

где W'_P – радиационный баланс, W'_K – турбулентный поток тепла, W'_H – поток тепла на испарение снега, $W'_П$ – теплообмен с почвой, $W'_Н$ – поток тепла на нагревание снежной толщи (штрихами обозначены производные по времени).

Для расчета интенсивности снеготаяния по методу П.П. Кузьмина необходимо иметь комплекс наблюдений за суммарной радиацией, альбедо, эффективным излучением поверхности снега, температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра, градиентами температуры почвы и снега, твердыми и жидкими осадками, общей и нижней облачностью. В связи с отсутствием подобных данных для водосборов крупных рек предложено несколько альтернативных подходов к расчету снеготаяния.

В работах [5; 6] обоснована возможность расчета снеготаяния по методу теплового баланса на основе данных стандартных метеонаблюдений. Аналогичный подход применяется и в модели формирования весеннего стока, разработанной Институтом водных проблем РАН [7; 8]. Существенные ошибки (до 8-10 мм/сутки) при расчете теплового баланса снежного покрова, по данным стандартных метеонаблюдений, связаны с учетом влияния облачности на радиационный теплообмен [6; 9].

В связи с низкой точностью расчета радиационного теплообмена, по данным стандартной сети наблюдений, Е.Г. Поповым предложены эмпирические формулы, позволяющие оценить радиационную и адвективную составляющие снеготаяния с шагом 0,5 суток на основе данных о суточном ходе температуры воздуха и скорости ветра [6; 9].

Для дневной части суток:

$$H_d = k(T_{max} - T_{mean}) - 1,4(T_{mean} - T_{min}) + 0,65V_d(T_d - 0,5). \quad (2)$$

Для ночной части суток:

$$H_n = 0,65V_n(T_n - 0,5) - 1,4(T_{mean} - T_{min}). \quad (3)$$

Здесь H_d и H_n , T_d и T_n , V_d и V_n – соответственно интенсивность снеготаяния, температура воздуха и скорость ветра за дневные и ночные часы, T_{mean} , T_{max} и T_{min} – среднесуточная, максимальная и минимальная температура воздуха; k – коэффициент, зависящий от альбеда снежного покрова.

Формулы Е.Г. Попова, как и метод теплового баланса, применяются обычно для открытой местности. Для залесенных территорий оценка альбеда снежного покрова и скорости ветра представляет большие сложности. В концептуальных моделях формирования стока расчет снеготаяния в лесу обычно выполняется по среднесуточной температуре воздуха [10-12]. Пониженная роль радиационного теплообмена в лесу благоприятствует подобным расчетам.

Материалы и методы исследований

Расчеты интенсивности снеготаяния и поступления талых вод на водосборы рек Пермского края выполнены на основе следующих исходных данных:

- цифровая модель рельефа;
- глобальная карта типов растительного покрова GlobCover-2009, описание которой приведено в документе [13];
- максимальный запас воды в снежном покрове, рассчитанный по данным снегомерных съемок, или по данным об осадках холодного периода;
- ежедневные данные наблюдений на сети метеостанций в период снеготаяния.

Подготовка исходных данных выполнена средствами программного пакета ArcGis. Все данные были конвертированы в растровый формат с размером ячейки 3 000 м. Выбор размера ячейки определяется плотностью сети метеостанций на исследуемой территории.

Серьезную проблему представляет восстановление полей гидрометеорологических элементов по данным сети наблюдений средствами ГИС-технологий [2; 4; 14]. Используемые в ГИС «стандартные» методы интерполяции (метод обратного взвешенных расстояний, радиальные базисные функции, различные виды кригинга) обычно дают некорректные результаты. Это обусловлено редкостью сети наблюдений и невыполнением критерия $r \ll l$, (где r – расстояние между точками наблюдений, l – расстояние, на котором исследуемая величина претерпевает существенные изменения вследствие влияния характера подстилающей поверхности) [2; 4].

В качестве решения данной проблемы нами использован подход, предложенный в работах В.А. Шутова [15-17] и С.Г. Яковченко [4]. Он состоит в совмещении стандартных методов интерполяции с учетом характера рельефа и растительного покрова. Из стандартных методов интерполяции наиболее подходящим для работы с данными метеонаблюдений является метод Spline Tension, который позволяет создавать сглаженные поверхности с минимальным количеством артефактов.

Восстановление полей температуры воздуха (среднесуточной, минимальной, максимальной, средней за дневные и ночные часы) выполняется с учетом ее вертикальных градиентов (полученных по данным радиозондирования атмосферы или с использованием полей объективного анализа глобальной численной модели атмосферы GFS).

Поле максимальных запасов воды в снежном покрове может быть восстановлено двумя способами:

- на основе данных снегомерных съемок;
- на основе данных об осадках холодного периода.

Восстановление максимального снегозапаса за 2010 – 2012 гг. выполнено по данным маршрутных снегомерных съемок. Сеть снегомерных маршрутов на территории Пермского края включает более 50 метеостанций и гидропостов. На 16-18 из них снегомерные съемки выполняются как в лесу, так и в поле, на остальных – только в лесу или только в поле. Интерполяция снегозапаса по данным снегомерных съемок выполнялась по методу, предложенному В.А. Шутовым [15-17], отдельно для леса и поля, с учетом зависимостей снегозапасов от высоты местности, от типа растительного покрова, от уклона и экспозиции макросклонов. Изменчивость снегозапасов, связанная с перераспределением снега на мезо- и микрорельефе, метелевым переносом, учитывается косвенно с помощью кривой распределения снегозапасов.

Значительное влияние на величину снеготаяния на Западном Урале оказывает барьерный эффект, который проявляется в значительном увеличении сумм зимних осадков на наветренных склонах хребтов и в предгорьях Урала. Влияние рельефа Урала на распределение осадков рассматривается в работах [17-19]. Установлено, что зависимость количества осадков от высоты местности наиболее четко проявляется в зимний период, когда величина коэффициента корреляции между суммами осадков и высотой местности приближается к 0,5 [19]. В работе [18] отмечено, что величина вертикального градиента осадков на Урале составляет 10-14%/100 м высоты.

Исходя из этих данных при интерполяции запасов воды в снежном покрове вертикальный градиент принимался равным 15%/100 м в нижних высотных зонах и 10%/100 м в горах. При анализе данных многолетних наблюдений, приведенных в Справочнике по климату [20], установлено, что коэффициент линейной корреляции между высотой метеостанции и суммой осадков на исследуемой территории изменяется от 0,3 до 0,55 (в зависимости от выбора той или иной группы станций). Коэффициент детерминации линейной зависимости между величиной зимних осадков и высотой местности составляет 0,32. Вертикальный градиент сумм зимних осадков составляет 10%/100 м высоты для северной части исследуемой территории и 9%/100 м для южной. Определение истинного вертикального градиента осадков осложняется отсутствием метеостанций в горных районах на высотах более 500 м.

В случае отсутствия данных снегомерных съемок выполняется приближенное восстановление поля снеготаяния по данным об осадках холодного периода. При этом учитываются значительные различия в продолжительности периода снеготаяния между равнинными и горными участками исследуемой территории.

Установлено, что в период устойчивого снеготаяния максимальный запас воды в снежном покрове может быть принят приближенно равным сумме осадков, поскольку испарение снежного покрова и выдувание осадков из осадкомера частично компенсируют друг друга. Введение поправок на ветровой недоучет и испарение для зимних осадков, рекомендованных в Справочнике по климату [20], в условиях Пермского края приводит к значительному завышению снеготаяния. В первом приближении запас воды в снежном покрове за период устойчивого снеготаяния можно восстановить, интерполируя накопленные осадки по методу В.А. Шутова, с введением поправок на уклон и экспозицию макросклонов, и тип подстилающей поверхности.

Для периода осеннего неустойчивого снеготаяния, продолжительность которого на Урале может достигать 30-40 суток, типично монотонное увеличение снеготаяния в горах и на возвышенностях, а на равнинной территории – неоднократное установление и сход снежного покрова. В связи с этим возникает необходимость определения фазы выпадающих осадков и учета снеготаяния при оттепелях. Для определения фазы осадков использована регрессионная зависимость, полученная на основе анализа данных наблюдений аэрологической станции Пермь:

$$N = -0,179T_p - 0,034T_{925} - 0,078T_{850} + 0,372, \quad (4)$$

где N – доля осадков, выпавших в твердом виде, T_p – приземная температура воздуха, T_{925} и T_{850} – температура на изобарических поверхностях 925 и 850 гПа соответственно.

Снеготаяние при оттепелях рассчитывается по среднесуточной температуре воздуха. Суммируя запас воды в снежном покрове за период неустойчивого и устойчивого снеготаяния, можно получить поле максимальных снеготаяний. Результаты расчетов максимального запаса воды в снежном покрове приведены на рис. 1.

Восстановление полей осадков и приземного ветра, которые характеризуются высокой пространственной изменчивостью, представляет наибольшую сложность и может сопровождаться значительными ошибками. Поле ветра восстанавливается только для безлесных участков. Для этого применяется известная зависимость скорости ветра от высоты, в которой коэффициент K принимается равным 0,25:

$$V_l = V_0(H_l/H_0)^K, \quad (5)$$

где H_l – высота местности, H_0 – высота ближайшей метеостанции, V_0 – скорость ветра на метеостанции. Более качественно поле ветра может быть восстановлено по данным глобальной модели GFS.

Поле осадков восстанавливается с учетом высотного градиента, принимаемого равным 10%/100 м высоты. Аналогичный подход (применение постоянных высотных градиентов для осадков и снеготаяния) применен в работах Д.А. Буракова [10-11]. Фаза осадков определяется по формуле (4). Конвективные осадки, выпадающие в завершающий период снеготаяния, не учитываются при расчете по причине невозможности их интерполирования.

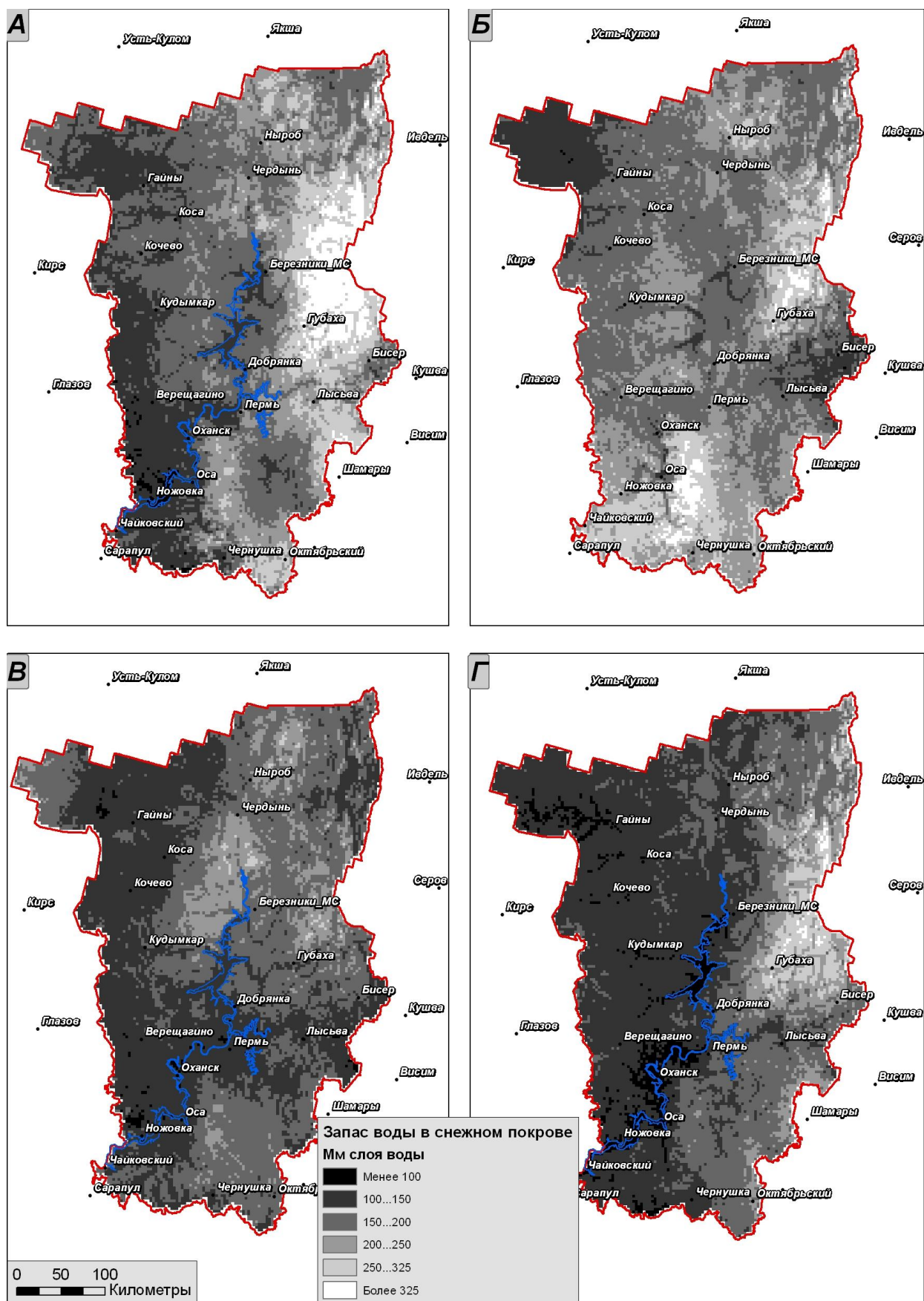


Рис. 1. Результаты восстановления максимального запаса воды в снежном покрове: А – 2010 г., Б – 2011 г., В – 2012 г., Г – 2013 г.

Метод расчета интенсивности снеготаяния выбран с учетом следующих условий:

- значительная залесенность исследуемой территории (более 65 %);
- ориентация на данные стандартной наблюдательной сети, доступные в оперативном режиме;
- возможность использования метода для краткосрочного прогноза.

Расчет интенсивности снеготаяния на открытых участках территории выполнен по формулам Е.Г. Попова, для залесенных участков – по температурным коэффициентам стаивания (табл. 1). Величина альбеда снежного покрова при расчете по методу Е.Г. Попова задается равной 0,8 в первые дни снеготаяния и после снегопадов, 0,6...0,7 – в период схода основной массы снега, 0,5 – в период завершения снеготаяния. При обратном суточном ходе температуры расчет по формулам (2, 3) приводит к большим ошибкам, в таких случаях интенсивность снеготаяния рассчитывается по среднесуточной температуре воздуха. Дополнительно в результат расчета вводится поправка на уклон и экспозицию макросклона.

Таблица 1

**Значения температурных коэффициентов стаивания и поправочных коэффициентов
для расчета снегонакопления**

Тип подстилающей поверхности	Коэффициент стаивания, мм/1° положительной среднесуточной температуры воздуха	Поправочный коэффициент для расчета запаса воды в снежном покрове
Хвойный лес	1,5	0,87
Смешанный лес	2	1,13
Лиственный лес	2,5	1,2
Болото	4	1
Урбанизированные земли	5	0,85
Водохранилища и озера	4,5	0,9
Сельхозугодья	4,5	1
Мозаика с/х угодий и лесов	4	1

Площадь снежного покрова определяется по методу А.Г. Ковзеля, на основе модульных коэффициентов и кривых распределения снегозапаса. Параметры кривых распределения для лесной и безлесной части территории получены из работы [21]. Для озер и водохранилищ задано равномерное распределение снегозапаса.

Водоотдача снежного покрова рассчитывается по известной методике с учетом водоудерживающей способности снега, которая принимается равной для леса – 30 %, для поля – 20 %. Такие значения, характерные для бассейна Камы, приведены в работе [21]. Также учитывается снижение влагоемкости снега за счет выпадения жидких осадков.

Поступление талых вод на водосбор в период снеготаяния складывается из водоотдачи снежного покрова и выпадающих на водосбор твердых и жидких осадков. В период снеготаяния на Урале неоднократно формируется временный снежный покров (чаще в горной части территории). При расчете поступления на водосборы осадков в период снеготаяния использованы следующие допущения:

- до начала водоотдачи твердые и жидкие осадки аккумулируются в снежном покрове;
- после начала водоотдачи жидкие осадки складываются с водоотдачей снежного покрова;
- временный снежный покров образуется в случае, если интенсивность снеготаяния меньше суммы осадков, выпавших в твердом виде;
- суточное поступление воды на водосбор складывается из водоотдачи снежного покрова, жидких осадков и водоотдачи временного снежного покрова.

Таким образом, реализация предложенной методики расчета снеготаяния включает следующие этапы:

- подготовка входных данных: восстановление полей среднесуточной, максимальной, минимальной температуры; средней температуры и скорости ветра за дневные и ночные часы; жидких и твердых осадков; температуры воздуха на поверхностях 850 и 925 гПа;
- расчет интенсивности снеготаяния и площади снегового покрытия;
- расчет водоотдачи снежного покрова и запаса воды в снеге.

Вычисления выполняются средствами программного пакета ArcGis. Расчет интенсивности снеготаяния ведется с шагом 0,5 суток, расчет водоотдачи – с суточным шагом. Для автоматизации вычислений разработан программный инструмент на языке Visual Basic, реализующий дополнительные функции растровой алгебры.

Тестирование описанной методики проведено на материалах 2010–2012 гг. Для 2010 г. был характерен «радиационный» тип снеготаяния, преобладание антициклонального типа погоды. В 2011 и 2012 гг. преобладал «адвективный» тип снеготаяния. Таким образом, была выполнена оценка достоверности результатов расчетов при разных условиях снеготаяния.

Результаты и их обсуждение

Верификация результатов расчетов снеготаяния выполнена по данным снегомерных съемок (сопоставление фактического и расчетного запаса воды в снежном покрове) и по данным дистанционного зондирования Земли со спутников Terra, Aqua, LANDSAT 5/7, SPOT-4 (сопоставление фактической и расчетной заснеженности территории).

При сопоставлении расчетного и фактического запаса воды в снежном покрове необходимо иметь в виду следующие особенности данных маршрутной снегомерной съемки:

- снегомерный маршрут может проходить на удалении до 3 км от пункта наблюдений;
- точные координаты и данные о ландшафтных характеристиках большинства снегомерных маршрутов отсутствуют;
- запас воды в снежном покрове на маршруте в некоторых случаях определяется влиянием мезорельефа, особенно в горных и предгорных территориях;
- используемый при вычислениях размер ячейки (3000 м) не позволяет определить снегозапас непосредственно для локального участка снегомерных съемок.

В связи с этим сопоставлению с данными снегомерных съемок подвергались значения расчетного снегозапаса, осредненные в радиусе 3 000 м от метеостанции (для этого использовался инструмент зональной статистики в ArcGis). 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. Для определения характера расхождений построены кривые распределения абсолютных ошибок расчетного запаса воды в снежном покрове, которые приведены на рис. 2.

Таблица 2

Среднеквадратические ошибки результатов расчета запаса воды в снежном покрове (мм)

2010 г.			2011 г.			2012 г.		
Лес	Поле	Среднее (для станций с двумя маршрутами)	Лес	Поле	Среднее (для станций с двумя маршрутами)	Лес	Поле	Среднее (для станций с двумя маршрутами)
54,3	33,5	36,3	49	34	43,1	28	27,8	26,4

По результатам расчетов за 2011 и 2012 гг. видно, что мода распределения абсолютных ошибок расположена вблизи нуля. Это указывает на преобладание случайного характера расхождений. Систематическая составляющая расхождений менее существенна и выражается в занижении расчетного снегозапаса. В 2010 г. мода распределения смещена в область отрицательных значений, что свидетельствует о систематическом занижении расчетного снегозапаса в сравнении с фактическим.

Основными причинами отклонений расчетного снегозапаса от фактического являются:

- завышение интенсивности снеготаяния (более характерное для безлесных территорий);
- недооценка водоудерживающей способности снега;
- неверная оценка максимального накопленного снегозапаса;
- нерепрезентативность снегомерного маршрута в сравнении с окружающей территорией (типичная для водосборов горных рек Урала);
- ошибки в снегомерных наблюдениях на гидропостах.

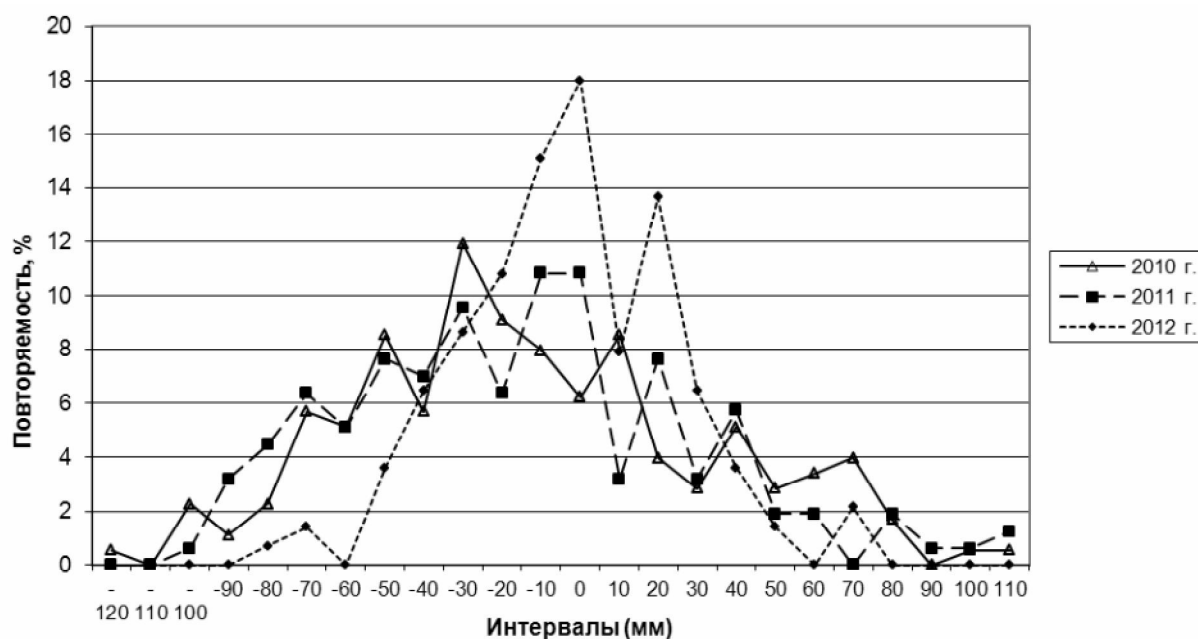


Рис. 2. Распределение ошибок расчетного запаса воды в снежном покрове

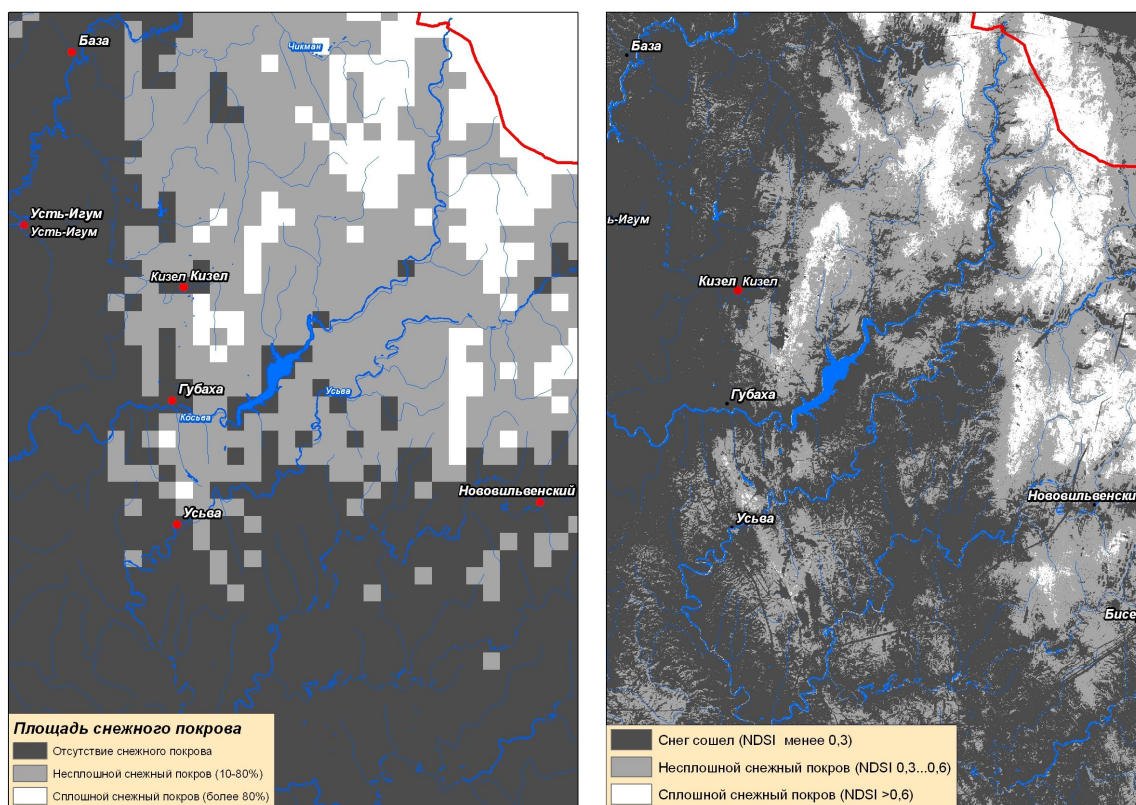


Рис. 3. Сопоставление фактической и расчетной площади снежного покрова, 04.05.2011, водосборы рек Усьва, Косью

Верификация результатов расчета, по данным ДЗЗ, выполнена на двух масштабных уровнях:

1. По всей исследуемой территории – на основе данных Terra/Aqua MODIS. Точность результатов автоматизированного дешифрирования снежного покрова по индексу NDSI (продукт MOD10) для залесенной территории невысока. В связи с этим, в работе использованы суточные композиты в синтезе каналов 7-2-1 (ближний ИК – средний ИК – красный).

2. На детальном уровне (оценка распределения снежного покрова на уровне отдельных ландшафтов и речных бассейнов) – по снимкам LANDSAT 5/7, SPOT-4. Дешифрирование снежного покрова выполняется по RGB-синтезу ближнего ИК, среднего ИК и красного каналов (который позволяет отделить снег от облачности), или на основе индекса NDSI.

В большинстве случаев получено хорошее совпадение фактической и расчетной заснеженности территории, в том числе и в горных районах с редкой сетью снегомерных наблюдений (рис. 3). Это указывает на объективность используемых при расчете оценок зависимости снеготаяния и интенсивности снеготаяния от высоты местности. Существенные расхождения фактической и расчетной заснеженности территории выявлены в следующих случаях:

– по результатам расчета за 2010 г. - переоценка скорости схода снежного покрова более значительная на открытых участках местности. Она связана с завышением интенсивности снеготаяния по методу Е.Г. Попова при преобладании антициклональной погоды и низкой относительной влажности воздуха;

– по результатам расчета за 2012 г. – на лесных участках водосборов рек Обва, Тулва, Сылва, на левобережье Камского водохранилища (что связано с переоценкой интенсивности снеготаяния при аномально высокой температуре воздуха 16-19 апреля 2012 г.).

В целом точность расчета заснеженности для залесенных участков выше, чем для безлесных. Это позволяет сделать выводы о применимости температурных коэффициентов таяния для расчета снеготаяния в лесу, а также о необходимости корректировки параметров при расчете по методу Е.Г. Попова для безлесных участков при антициклональной погоде.

Выводы

Анализ результатов расчетов снеготаяния и поступления талых вод на водосборы рек Пермского края за 2010 – 2012 гг. позволяет заключить следующее:

- предложенная методика расчета интенсивности снеготаяния в целом применима для территории Пермского края и может быть использована при моделировании формирования стока весеннего половодья, в том числе для рек горной части территории;

- достоверность результатов расчета площади снежного покрова существенно выше достоверности расчета водоотдачи и запаса воды в снеге;

- расхождения фактического (по данным снегомерных съемок) и расчетного запаса воды в снежном покрове имеют значительную случайную составляющую, возникающую при сопоставлении данных маршрутной снегосъемки со средними значениями снеготаяния в ячейках раstra, полученными по результатам расчета;

- при преобладании антициклональной погоды весной возможно систематическое завышение интенсивности снеготаяния на открытых участках местности. Оно связано с комплексом факторов, среди которых наибольшее значение имеют погрешности в оценке альбедо снежного покрова, скорости ветра и водоудерживающей способности снега;

- дополнительным источником ошибок при расчете водоотдачи снега, и остаточного снеготаяния, является интерполяция суточных сумм осадков в период снеготаяния. В перспективе для восстановления полей осадков и приземного ветра в период снеготаяния планируется использовать данные мезомасштабной численной модели прогноза погоды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-05-00858-а и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Соглашение № 14.В37.21.0636).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельчиков В.А., Борщ С.В., Вознесенский В.Ю. Опыт применения геоинформационных технологий для прогнозирования стока половодья // Метеорология и гидрология. 2001. № 10. С. 62-70.
2. Жоров В.А., Ловцкая О.В., Постнова О.С., Яковченко С.Г. Структура геоинформационных данных для водохозяйственных и гидрологических расчетов // ГИС для устойчивого развития территорий: материалы междунар. конф. Пермь, 2009. Т. 2. С. 438-444.
3. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. Пермь, 2010. 217 с.

4. Яковченко С.Г. Создание геоинформационных систем в инженерной гидрологии: дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2007. 406 с.
5. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 346 с.
6. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 394 с.
7. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2007. 351 с.
8. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Физико-математическая модель формирования снежного покрова и снеготаяния в лесу // Метеорология и гидрология, 2004. № 5. С. 85-95.
9. Попов Е.Г., Жидиков А.П., Левин А.Г., Нечаева Н.С. Модель формирования весеннего стока и ее реализация для прогноза гидрографа // Метеорология и гидрология. 1971. № 6. С. 83-91.
10. Бураков Д.А. Кривые добегания и расчет гидрографа весеннего половодья. Томск: Томск. гос. ун-т, 1978. 129 с.
11. Бураков Д.А., Авдеева Ю.В. Технология оперативных прогнозов ежедневных расходов (уровней) воды на основе спутниковой информации о заснеженности (на примере р. Нижней Тунгуски) // Метеорология и гидрология. 1996. № 10. С. 75-87.
12. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 199 с.
13. Bontemps S., Defourny P., Van Bogaert E. GLOBCOVER 2009: Products Description and Validation Report. ESA, 2010. URL: http://globcover.s3.amazonaws.com/LandCover2009/GLOBCOVER2009_Validation_Report_1.0.pdf
14. Коновалова Н.В., Коробов В.Б., Васильев Л.Ю. Интерполирование климатических данных при помощи ГИС-технологий // Метеорология и гидрология. 2006. № 5. С. 46-53.
15. Шутов В.А. Методы анализа пространственной изменчивости снегозапасов // Изв. РАН. Сер. Географическая. 1998. № 1. С. 122-132.
16. Шутов В.А. Интерполяция и расчет снегозапасов в речных бассейнах с учетом рельефа местности // Метеорология и гидрология. 1996. №10. С. 67-74.
17. 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.
18. Береснева Н.А., Данилова Л.И. Влияние возвышенностей равнины на осадки и влагооборот // Тр. ГГО. 1954. Вып. 45. С. 44-54.
19. Калинин Н.А., Фрик Л.В., Смирнова А.А. Исследование влияния рельефа Пермского края на распределение полей осадков // Географический вестник. 2008. № 2. С. 187-195.
20. Справочник по климату СССР. Вып. 9. Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области и Башкирская АССР. Ч. 4: Влажность воздуха, атмосферные осадки и снежный покров. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 372 с.
21. Лебедева Н.Д. Методика краткосрочного прогноза гидрографа притока воды к водохранилищу Камской ГЭС // Тр. ЦИП. М.: Гидрометеиздат, 1963. Вып. 130. С. 87-125.

Поступила в редакцию 14.06.13

S.V. Pyankov, A.N. Shikhov

A spatial modeling of processes of snowmelt in the catchment areas of the rivers Ural Kama Region

In this paper, the method of spatial modeling of snowmelt based on a standard network of meteorological observations is proposed. The method is realized by GIS technology. The statistical dependences of the intensity of snow accumulation and snowmelt on the parameters of the relief and the types of underlying surface are considered in the model. The calculation of snowmelt in the catchment areas of the rivers in the Ural Kama region, for the period of 2010-2012 years, was made by the method proposed. The verification of the results of simulation is performed on the basis of snow surveys and the Earth remote sensing data.

Keywords: snow cover, snowmelt, spatial modeling, earth remote sensing data.

Пьянков Сергей Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
E-mail: pyankovsv@gmail.com

Шихов Андрей Николаевич, соискатель
E-mail: and3131@inbox.ru

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет»
614990, Россия, г. Пермь, ГСП, ул. Букирева, 15

Pyankov S.V.,
candidate of technical science, associate professor
E-mail: pyankovsv@gmail.com

Shikhov A.N., postgraduate
E-mail: and3131@inbox.ru

Perm State National Research University
614990, Russia, Perm, Bukireva st., 15