

УДК 551.323:004.9

МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СНЕГОТАЯНИЯ

Пьянков С. В., Шавнина Ю. Н., Шихов А. Н.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь, Россия (614990, Пермь, ГСП ул. Букирева, 15), e-mail: gis@psu.ru

Рассматриваются методы расчета интенсивности снеготаяния и поступления воды на водосборы рек. Существующие оперативные методы расчета снеготаяния адаптированы для использования в среде ГИС. С помощью инструментов математико-картографического моделирования в ГИС оценивается пространственная неоднородность интенсивности снеготаяния. Учитывается влияние рельефа и залесенности территории на распределение среднесуточной температуры воздуха, накопление осадков, интенсивность водоотдачи снежного покрова. Проведен расчет поступления талых вод и жидких осадков на водосбор Воткинского водохранилища (в пределах территории Пермского края) в весенний период 2011 и 2012 г. Рассчитана площадь снежного покрова, поступление воды на водосборы и запас воды в снежном покрове за каждый день периода снеготаяния. Для проверки результатов расчета площади снежного покрова использованы космические снимки низкого и среднего разрешения. В целом распределение снежного покрова, полученное расчетным путем, совпадает с фактически наблюдаемым на космических снимках. Имеющиеся ошибки и расхождения в значительной степени объясняются низкой точностью исходных данных.

Ключевые слова: снежный покров, снеготаяние, математико-картографическое моделирование, геоинформационные системы.

MATHEMATICAL AND CARTOGRAPHICAL MODELING OF PROCESSES OF SNOWMELT

Ryankov S. V., Shavnina Y. N., Shikhov A. N.

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

Methods of snowmelt estimation and water income into water catchment areas of rivers are under study in this work. Existing strategic methods of snowmelt estimation are adapted for use in GIS. With the help of instruments of mathematical and cartographical modeling in GIS spatial inhomogeneity of the intensity of snowmelt is estimated. The influence of topography and forested area on the distribution of daily air temperature, precipitation accumulation, the intensity of the water yield of snow cover is taken into account. The proceeds of meltwater and rainfall into the catchment area of Votkinsk reservoir (within the territory of the Perm region) in spring of 2011 and 2012 have been calculated. The area of snow cover, the flow of water into the catchment areas and water reserves in snow cover for each day of the period of snowmelt have been also calculated. For checking the results of the calculation the area of snow cover satellite images of low and medium resolution have been used. In general, the distribution of snow cover obtained by calculation coincides with the one observed on satellite images. Mostly, errors and discrepancies are explained by the low accuracy of source data.

Key words: snow cover, snowmelt, mathematical and cartographical modeling, Geographic Information Systems.

Введение

Расчет интенсивности снеготаяния и поступления воды на водосборы является важным этапом построения моделей краткосрочного прогноза уровней и расходов воды в период весеннего половодья. Водоотдача снежного покрова определяется комплексом метеорологических факторов, а также характеристиками подстилающей поверхности (абсолютная высота, уклон и экспозиция склонов, залесенность и типы лесной растительности).

В пределах водосборов крупных рек процессы снеготаяния протекают не одновременно, поэтому возникает необходимость оценки пространственного распределения интенсивности снеготаяния на изучаемой территории. Для решения подобных задач широко применяются геоинформационные инструменты моделирования с помощью регулярной сетки раstra.

Цель данной работы – адаптировать существующие оперативные методики расчета поступления воды на водосборы в период снеготаяния в соответствии с функциональными возможностями ГИС. Адаптированные методы расчета использовались для периодов снеготаяния 2011 и 2012 гг. на водосборе Воткинского водохранилища в пределах территории Пермского края.

Теоретической основой расчета снеготаяния является уравнение теплового баланса снежного покрова [1, 4]. Для решения этого уравнения строгими методами требуются данные наблюдений актинометрических станций. При отсутствии таких данных для расчета снеготаяния используются различные упрощенные методики, опирающиеся на данные стандартной наблюдательной сети. Наиболее известны формулы Е. Г. Попова, в которых для расчета интенсивности таяния принимаются во внимание температура воздуха и ее суточный ход, точка росы и скорость ветра. На практике часто используются постоянные значения коэффициентов стаивания, зависящие только от температуры воздуха. Такие коэффициенты были выведены В. Д. Комаровым и составляют 5...5,2 мм на 1° положительной среднесуточной температуры воздуха для открытой местности [1, 5]. Они применимы для территорий, расположенных севернее 55° с.ш. Для залесенных участков расчет снеготаяния ведут по коэффициентам стаивания, которые составляют 1,8...2,4 мм на 1° положительной температуры воздуха [1].

Для расчета поступления на водосборы талых вод и жидких осадков в период снеготаяния 2011 и 2012 гг. были использованы следующие исходные данные:

1. Запас воды в снежном покрове на момент начала снеготаяния;
2. Среднесуточные температуры воздуха и суммы осадков по данным сети метеостанций;
3. Цифровая модель рельефа водосбора;
4. Данные о залесенности территории.

Все исходные данные были переведены в растровый формат с размером ячейки 3000 м. Выбор размера ячейки определялся площадью изучаемой территории и плотностью сети метеостанций.

Восстановление полей метеорологических величин по данным сети метеостанций может выполняться с использованием различных методов интерполирования, среди которых выделяются детерминированные и математико-статистические методы. К

детерминированным относятся методы обратно взвешенных расстояний, глобальная и локальная полиномиальная интерполяция, методы радиальных базисных функций (мультиквадрики, аналитические сплайны, D-сплайны). Математико-статистические методы (различные виды кригинга) создают поверхности на основе статистических свойств исходных данных. Используя методы кригинга, можно построить не только поверхность самой величины, но и поверхности достоверности и неопределенности [3].

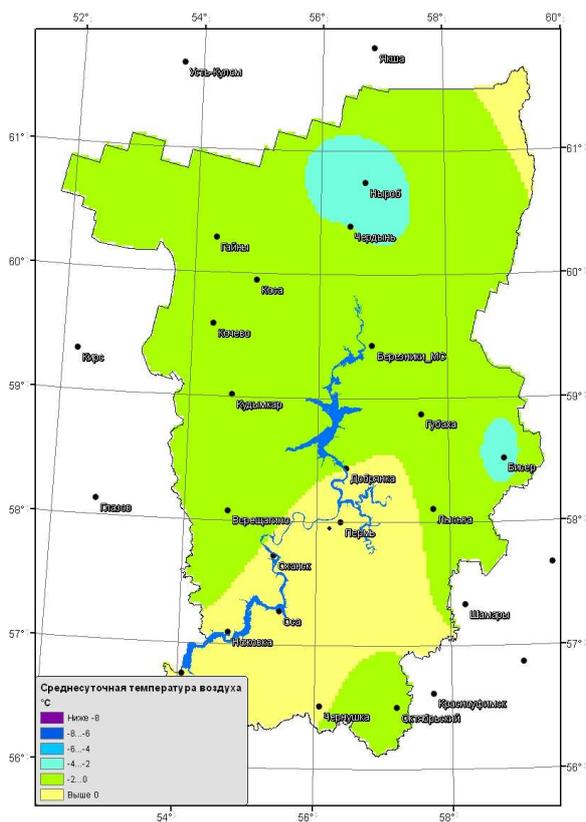
Для интерполирования метеорологических величин по данным сети метеостанций был выбран метод Spline Tension. Данный метод относится к числу точных локальных интерполяторов. Он дает сглаженные поверхности и хорошо применим для медленно изменяющихся данных. Получаемые растровые модели не содержат артефактов¹. Использование других методов интерполяции приводило к появлению артефактов, связанных с локальными минимумами и максимумами в исходных данных.

Расчет среднесуточной температуры воздуха на водосборах, как правило, не представляет сложности. Вертикальные градиенты температуры воздуха получены по данным радиозондирования атмосферы на 6-ти станциях: Пермь, Екатеринбург, Уфа, Киров, Сыктывкар, Ивдель (радиозондирование производится два раза в сутки). Учет вертикального градиента позволяет получить реалистичную картину распределения среднесуточной температуры по территории с расчлененным рельефом. Пример результатов расчета приведен на рис. 1.

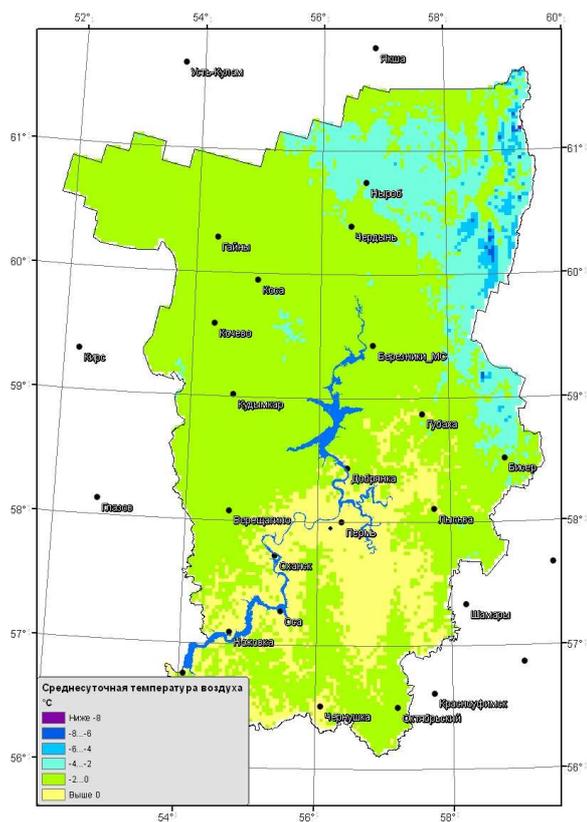
Расчет максимальных запасов воды в снежном покрове, в условиях отсутствия данных снегомерных съемок, был выполнен на основе данных о накопленных осадках холодного периода. При этом учитываются существенные различия в сроках начала снегонакопления в горной и равнинной части изучаемой территории.

Результаты снегомерных съемок, как правило, более достоверны, чем суммы осадков на метеостанциях в холодный период года. При метелях часть осадков выдувается из осадкомера, таким образом, сумма осадков оказывается существенно заниженной. В то же время при использовании данных с осадкомеров не учитывается испарение снега. Сопоставление архивных данных о накопленных осадках с результатами снегомерных съемок на метеостанциях Пермь и Бисер позволяет предположить, что ошибки измерений зимних осадков на метеостанциях сопоставимы с величинами суммарного испарения снега за зимний сезон. Поэтому для расчета запасов воды в снежном покрове использовались данные о суммах зимних осадков, взятые без учета испарения.

¹ Под артефактами понимаются особенности моделируемой поверхности, не свойственные данному явлению в природе.



а) Без учета вертикального градиента



б) С учетом вертикального градиента

Рис. 1. Расчет среднесуточной температуры воздуха, 05.04.2012

В начале холодного периода снегонакопление на изучаемой территории наблюдается только в предгорных и горных районах Северного и Среднего Урала; на равнинной территории устойчивый снежный покров не формируется. В то же время в период с декабря по февраль влияние оттепелей на снегонакопление минимально. В связи с этим выделяются периоды устойчивого и неустойчивого снегонакопления. Запас воды в снежном покрове, сформированный за период устойчивого снегонакопления, вычислен интерполяционными методами, по данным сети метеостанций (с учетом зависимости накопления осадков от высоты). Также введен коэффициент, учитывающий влияние залесенности территории на снегонакопление.

Величина снегозапасов, накопленных в период с преобладанием температур близких к 0°C, рассчитана с учетом функции разделения твердых и жидких осадков в зависимости от приземной температуры воздуха [4]. Поскольку интерполяция ежедневных сумм осадков имеет невысокую достоверность, оценка снегонакопления в этот период может иметь значительные ошибки. Примеры результатов расчета максимального запаса воды в снежном покрове приведены на рис. 2.

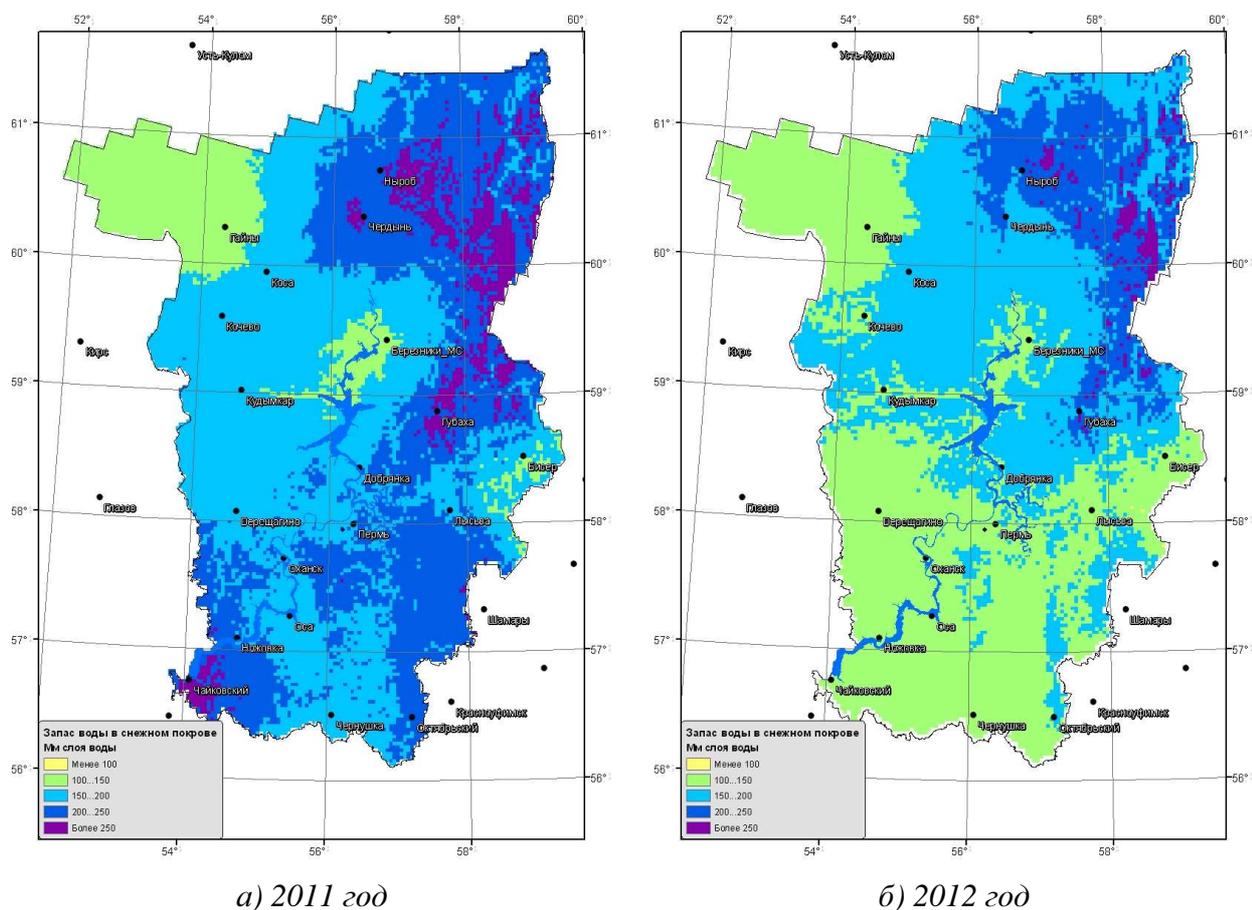


Рис. 2. Расчет максимальных запасов воды в снежном покрове

В обоих случаях максимум расчетных снегозапасов приходится на передовые хребты Северного Урала, где сочетаются значительный рост накопления осадков с высотой и влияние «барьерного эффекта», обусловленного восходящими движениями воздушных масс перед Уралом. К подобным выводам пришел В. А. Шутов по результатам анализа архивных данных осадкомерной сети на водосборе р. Белая [5].

Зависимости накопления осадков от высоты очень сложны по причине влияния локальных орографических факторов. На это указывается, в частности, в работе [5]. Однако при низкой густоте наблюдательной сети выявление региональных зависимостей осадков от высоты проблематично, поэтому возможно использовать постоянные соотношения между суммами осадков, выпавших за одинаковое время на разных высотных уровнях бассейна. Такой подход применен в работе [2].

Расчет ежедневных сумм твердых и жидких осадков в период снеготаяния проводится по аналогичной схеме, с учетом зависимости накопления осадков от высоты местности. Однако результаты расчета часто содержат значительные ошибки, за счет влияния локальных орографических и циркуляционных факторов. Конвективные осадки, выпадающие в завершающий период снеготаяния, вообще не учитываются при расчете, так как их интерполирование невозможно.

Расчет водоотдачи снежного покрова выполнен с использованием адаптированных методик [1, 5], в среде ArcGis, на основе регулярной сетки с размером ячейки 3000 м. Временной шаг расчета – одни сутки.

Интенсивность снеготаяния рассчитывается по формуле:

$$K_s = ([L] * 2 + [P] * 5) * [T_c] \quad (1)$$

где K_s – стаивание снежного покрова, L – лесистость, P – доля безлесной площади, T_c – среднесуточная температура воздуха за соответствующий день, 2 мм и 5 мм – коэффициенты стаивания в поле и в лесу на 1° положительной среднесуточной температуры воздуха.

Далее рассчитывается так называемый модульный коэффициент – отношение накопленного слоя талой воды к максимальному снегов запасу до начала снеготаяния. Модульный коэффициент используется для расчета площади снежного покрова в период снеготаяния.

Величина покрытости поля и леса снегом в период снеготаяния зависит от начальных снегов запасов и от суммы положительных температур, накопленных от начала снеготаяния. По результатам снегомерных съемок В. Д. Комаровым построены кривые обеспеченности модульных коэффициентов запасов воды в снеге, отражающие неравномерность залегания снежного покрова на территории [5]. На использовании этих кривых основан расчет водоотдачи снежного покрова. Кривые распределения снегов запасов характеризуются большой устойчивостью от года к году и аппроксимируются двухпараметрическим гамма-распределением [2].

Для построения кривых распределения снегов запасов использованы соотношения модульных коэффициентов и площадей снежного покрова, предложенные в работе [5]. По кривой распределения снегов запасов и модульному коэффициенту были рассчитаны площади, покрытые снегом.

Водоотдача снежного покрова рассчитывалась по формуле

$$H_v = S * K_s * \gamma - R \quad (2)$$

где H_v – водоотдача снежного покрова, S – площадь снежного покрова, K_s – коэффициент стаивания за данный день, вычисленный по среднесуточной температуре воздуха, γ – гамма-коэффициент, который характеризует подачу на водосбор талых вод, ранее задержанных снегом, R – порог начала водоотдачи, вычисленный по параметру влагоемкости снега.

Подача воды на водосбор в период снеготаяния складывается с учетом поступления твердых и жидких осадков. При этом также принимается во внимание неоднократное формирование и сход временного снежного покрова (что особенно характерно для горной части изучаемой территории).

На основе вышеописанной методики был смоделирован процесс снеготаяния на территории Пермского края весной 2011 и 2012 гг., получены карты площади снежного покрова, поступления воды на водосбор и остаточного запаса воды в снежном покрове за каждый день периода снеготаяния. За дату начала снеготаяния принималась дата перехода среднесуточной температуры воздуха через 0° на любой части рассматриваемой территории. Динамика расчетного запаса воды в снежном покрове весной 2012 года показана на рис. 3.

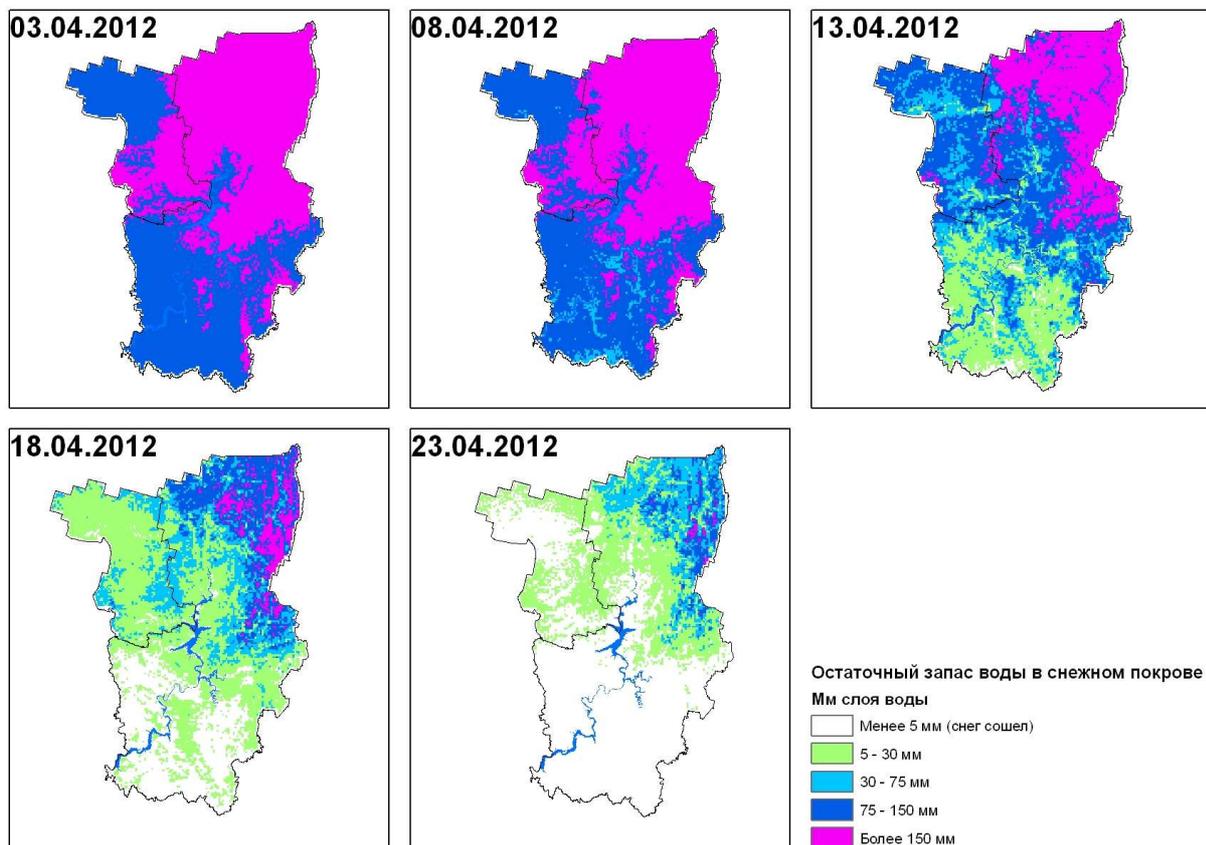


Рис. 3. Динамика процесса снеготаяния весной 2012 года

Проверка результатов расчета может производиться по наземным данным и по ДДЗЗ. Единственным способом проверить достоверность расчета запаса воды в снежном покрове остается его сопоставление с данными снегомерных съемок.

Для оценки площади снежного покрова возможно использовать как ДДЗЗ низкого разрешения (спутника TERRA, AQUA, прибор MODIS, получаемые в ежедневном режиме), так и снимки среднего разрешения с аппарата SPOT4, иллюстрирующие распределение снежного покрова на интересующих участках. По снимкам среднего разрешения четко прослеживается зависимость заснеженности территории от высоты местности не только в горной, но и на равнинной части исследуемой территории, что было положено в основу расчета.

Проверка результатов расчета показывает достаточно высокую степень совпадения расчетной заснеженности территории с фактической (определяемой по космическим снимкам). Однако в ряде случаев отмечаются существенные расхождения, которые могут быть вызваны несколькими факторами. Наибольшие ошибки, по нашему мнению, связаны с точностью расчета максимального запаса воды в снежном покрове, а также с нелинейным характером зависимости интенсивности снеготаяния от температуры воздуха. В то же время важными преимуществами использованной методики являются оперативность расчетов и возможность ее применения для среднесрочного прогноза дат схода снежного покрова.

Список литературы

1. Бефани Н. Ф., Калинин Г. П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 441 с.
2. 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.
3. Коновалова Н. В., Коробов В. Б., Васильев Л. Ю. Интерполирование климатических данных при помощи ГИС-технологий // Метеорология и гидрология. 2006. №5. С. 46 – 53.
4. Кузьмин П. П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 346 с.
5. Лебедева Н. Д. Методика краткосрочного прогноза гидрографа притока воды к водохранилищу Камской ГЭС // Труды ЦИП. Вып. 130. М.: Гидрометеиздат, 1963. С. 87–125.
6. Шутов В. А. Интерполяция и расчет снегозапасов в речных бассейнах с учетом рельефа местности. // Метеорология и гидрология. 1996. № 10. С. 67–74.

При поддержке гранта РФФИ № 11-05-96026-р_урал_а.

Рецензенты:

Калинин Николай Александрович, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь.

Назаров Николай Николаевич, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии и ландшафтной экологии Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь.