

# СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И СНЕЖНЫЕ ЛАВИНЫ

УДК 556.124.001.572

doi: 10.31857/S2076673422010116

## Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья

© 2022 г. В.Г. Калинин\*, А.А. Шайдулина, В.С. Русаков, М.А. Фасахов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

\*vgkalinin@gmail.com

## Mathematical and geoinformation modeling of snowmelt process in the river drainage basins of the Kama region

V.G. Kalinin\*, A.A. Shaydulina, V.S. Rusakov, M.A. Fasakhov

Perm State University, Perm, Russia

\*vgkalinin@gmail.com

Received August 5, 2021 / Revised December 7, 2021 / Accepted December 23, 2021

Keywords: *snow melting, GIS-technologies, modeling of the snow spatial distribution.*

### Summary

The paper studies the patterns and snowmelt regime on the case of several river catchments of the Kama Region. Based on the temperature coefficient method, detailed digital maps and GIS-technologies, a model of spring snow melting has been developed. This model makes it possible to take into account the spatial distribution of meteorological information, features of the relief and soil-vegetation cover more accurately. The estimation of the slope aspect influence on the spring snow melting processes by means of correction coefficients and the technique of determining their optimal values is proposed. A method for verifying the results of calculations of the snow cover spatial distribution based on space monitoring data is proposed. To perform a quantitative comparison of model maps with interpreted images, the choice of the value of the fraction of remaining snow in each cell of the map (information on the presence or absence of snow cover) was justified. If the value of fraction  $\geq 0.5$ , then 1 is assigned – snow is present, if  $< 0.5$ , then 0 is assigned – no snow. The simulation results of snow melting for the Kosa–Kosa catchment area during the spring periods of 2004, 2010 and 2015 showed that the average overlap of snow-covered area on the model maps and decoded satellite images is 73.67%. Validation of the proposed snowmelt model was carried out in the Kama–Gai and the Vishera–Ryabinino catchments. The average overlap area between the model maps and interpreted satellite images was 72.56 and 88.56%, respectively.

**Citation:** Kalinin V.G., Shaydulina A.A., Rusakov V.S., Fasakhov M.A. Mathematical and geoinformation modeling of snowmelt process in the river drainage basins of the Kama region. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (1):63–74. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673422010116.

Поступила 5 августа 2021 г. / После доработки 7 декабря 2021 г. / Принята к печати 23 декабря 2021 г.

**Ключевые слова:** *снеготаяние, ГИС-технологии, моделирование пространственного распределения снежного покрова.*

На основе метода температурных коэффициентов, использования детальных цифровых карт и ГИС-технологий разработана модель весеннего снеготаяния, которая позволяет с большей точностью учитывать пространственное распределение метеорологической информации, особенности рельефа и почвенно-растительного покрова. Оценено влияние экспозиции склонов на процессы весеннего снеготаяния с помощью использования поправочных коэффициентов, разработана также методика определения их оптимальных значений. Предложен метод верификации и валидации расчётов пространственного распределения снежного покрова с использованием данных космического мониторинга.

### Введение

Расчёты снеготаяния на речных водосборах лежат в основе практически всех моделей формирования стока весеннего половодья [1]. Поэтому поиск новых методов и технологий, по-

зволяющих повысить качество этих расчётов, достаточно актуален. К основным методам расчёта снеготаяния относятся:

1) метод водного баланса, заключающийся в расчёте слоя воды, образовавшейся за период между снегосъёмками; недостатки данного ме-

тогда — его трудоёмкость и невозможность применения к малым промежуткам времени [2];

2) метод теплового баланса, в основе которого лежит расчёт общего притока тепла на водосбор в период снеготаяния за счёт солнечной радиации, теплообмена с атмосферой и почвой, процессов испарения и конденсации [3];

3) метод Е.Г. Попова [4], основанный на применении интегральных показателей интенсивности снеготаяния (температура воздуха и скорость ветра); применяется для адвективных весенних условий (пасмурная погода, температура воздуха выше 0 °С, отсутствие прямой солнечной радиации) и не подходит для расчётов на малых водосборах;

4) метод температурных коэффициентов [5], отражающих физико-географические условия речных бассейнов; основан на предположении о линейной связи между количеством стаявшей воды и приземной температурой воздуха. Согласно [6], в большинстве моделей применяется именно этот метод, так как в нём используются материалы сетевых наблюдений.

Метод температурных коэффициентов, предложенный В.Д. Комаровым [5] и адаптированный Н.Д. Лебедевой [7] для условий бассейна р. Кама, в настоящее время используется специалистами Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды при прогнозировании весеннего половодья на реках Пермского края. Достоинство метода — возможность его применения на разных водосборах независимо от их размера и положения, поэтому в настоящей работе он принят в качестве основного. Отметим, что в этом методе не учитывается неоднородность пространственного распределения и накопления снежного покрова, связанная с орографическими условиями местности, а это существенно влияет на процессы снеготаяния и формирования весеннего половодья. Использование электронных топографических и тематических карт, содержащих большой объём качественной и количественной информации о подстилающей поверхности, а также применение ГИС-технологий дают возможность усовершенствовать расчёты снеготаяния.

Цель настоящего исследования — разработка математико-геоинформационной модели процесса снеготаяния, детально учитывающей рельеф водосбора и позволяющей выполнять по-

суточный расчёт пространственно-временной динамики снежного покрова и запаса воды в нём.

### Материалы и методы исследования

В настоящей работе используется модель снеготаяния, основанная на применении температурных коэффициентов, предусматривающая определение суточного объёма талой воды по выражению

$$A_0 h = 5t A_{\text{п}} P_{\text{п}} + 2t A_{\text{л}} P_{\text{л}},$$

где  $A_0$  — общая площадь бассейна, км<sup>2</sup>;  $h$  — количество стаявшего снега в пересчёте на воду, мм слоя;  $t$  — среднесуточная положительная температура воздуха, °С;  $A_{\text{п}}$ ,  $A_{\text{л}}$  — площади поля и леса соответственно, км<sup>2</sup>;  $P_{\text{п}}$ ,  $P_{\text{л}}$  — покрытость поля и леса снегом соответственно (в долях единицы площади).

Более детально метод температурных коэффициентов описан в работе [8]. Покрытость снегом отдельно для поля и леса определяется при помощи графиков обеспеченности снегозапасов, полученных В.Д. Комаровым [5], и зависит от начальных снегозапасов  $S$  и суммы положительных температур  $\Sigma t_+$ , накопившихся от начала снеготаяния. Принимая, что при увеличении положительной температуры воздуха на 1 °С в поле стает 5 мм снежного покрова (в пересчёте на воду), а в лесу — 2 мм, рассчитывается слой стаявшего снега на каждый день от начала таяния. Далее рассчитывается модульный коэффициент стаявшего снега, представляющий собой отношение количества талой воды к величине снегозапаса на начало таяния отдельно для леса и поля. Учёт возврата воды, ушедшей на водозадержание снегом, с момента начала водоотдачи из снега до конца снеготаяния возможен с помощью коэффициентов для леса (1,25) и поля (1,43). Подача воды от снеготаяния  $h$  определяется по формуле

$$h = (1,25\alpha_{\text{п}} + 1,43\alpha_{\text{л}})t,$$

где  $\alpha_{\text{п}}$  — водоотдача со всей площади, занятой полем, мм;  $\alpha_{\text{л}}$  — водоотдача со всей площади, занятой лесом, мм;  $t$  — среднесуточная положительная температура воздуха, °С.

Для расчёта весеннего снеготаяния с применением ГИС-технологий разработана структура картографической и атрибутивной баз данных ГИС.

*Картографическая база* данных основана на топографических картах масштабов 1:100 000 и 1:200 000, созданных Роскартографией, и представлена векторными и растровыми слоями [9]. С топографических карт в виде отдельных векторных слоёв получают подробную информацию о залесённости (хвойная, лиственная густая и редкая растительность, лесопосадки), гидрографической сети (ручьи, реки, озёра, водохранилища, пруды, болота), особенностях рельефа. Рельеф представлен в виде слоёв горизонталей (основных, утолщённых, дополнительных) и абсолютных высот пунктов государственных и съёмочных планово-высотных сетей, характерных точек и урезов воды, овражно-балочной сети. Используется также информация об антропогенных объектах: населённых пунктах, дорогах, мостах, каналах, дамбах, карьерах, отвалах и терриконах, отстойниках и др. Эти объекты в значительной степени влияют на характер пространственного распределения и таяния снежного покрова, а также формирование поверхностного стока. Тематические карты представлены векторными слоями границ и центров тяжести водосборов, метеорологических станций и гидрологических постов с точной географической привязкой.

Растровые слои характеризуются такими важными особенностями, как дискретность и непрерывность. К ним относятся цифровые модели рельефа (ЦМР), построенные в виде GRID, с высоким пространственным разрешением ( $1000 \times 100$ ,  $300 \times 300$ ,  $500 \times 500$  м) в зависимости от размера исследуемого водосбора. При их создании необходимо соблюдать требования топологии (направление течения реки, впадение одной реки в другую и т.д.) и использовать всю имеющуюся картографическую информацию о природных и антропогенных объектах с характеристиками высот поверхностей для обеспечения связанной дренажной структуры, представления водоразделов и тальвегов, что очень важно при создании «гидрологически корректных» ЦМР [10].

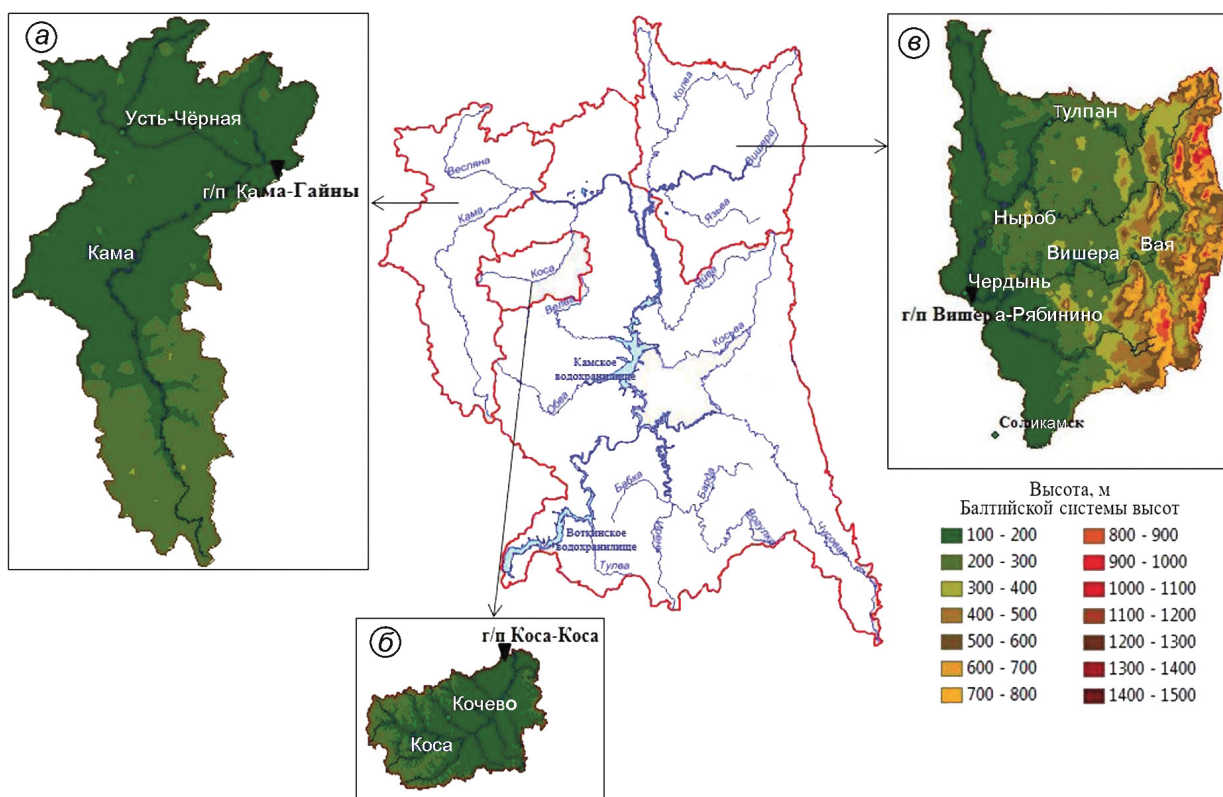
*Атрибутивная база данных* (АБД) представлена таблицами, в которых хранятся значения и характеристики, необходимые для картографических данных, а также материалы наблюдений по каждой метеостанции. В АБД входят пространственно распределённая информация

о максимальных снегозапасах (в мм слоя воды), датах их наступления отдельно для поля и леса, ежедневных значениях температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) и осадков (мм) в период таяния снежного покрова. Эта информация добавляется в АБД векторного слоя с точками, соответствующими каждой растровой ячейке ЦМР.

Структура и организация картографической и атрибутивной баз данных предусматривает их увязку по наименованию и идентификаторам. Расчёты выполнены для 2002, 2004, 2010 и 2015 гг. с разными метеорологическими условиями и протяжённостью снеготаяния. Так, 2002 и 2015 гг. характеризуются средними сроками начала (середина первой декады апреля) снеготаяния, но разной их протяжённостью (последнее более растянуто во времени). Поздние сроки начала снеготаяния (последняя декада апреля) отмечались в 2004 г., а раннее начало снеготаяния (конец марта) пришлось на 2010 г. Исследования проведены на примере речных водосборов Прикамья, отличающихся по размерам, особенностям рельефа и находящихся на равнинной и горной территориях: гидрологические посты Коса–Коса ( $A = 6221 \text{ км}^2$ ) и Кама–Гайны ( $A = 27822 \text{ км}^2$ ); гидрологический пост Вишера–Рябинино ( $A = 31084 \text{ км}^2$ ) соответственно.

## Результаты и их обсуждение

Ранее авторами был разработан программный модуль для расчёта подачи воды на водосбор в процессе весеннего снеготаяния на основе данных о запасе воды в снежном покрове, сумме накопленных положительных температур воздуха, осадках и лесистости водосбора [8]. Результат расчётов — посуточные значения слоя стаявшего снега (мм), снегозапаса (мм) и доли оставшегося снежного покрова (%) в ячейках растровой модели водосбора. Учёт высотного положения территории водосбора и экспозиции склонов даёт возможность уточнить расчёты снеготаяния путём введения соответствующих коэффициентов. Для определения значений коэффициентов высотного положения использованы результаты исследований работы [11]. Авторами на основе материалов многолетних наблюдений получены линейные эмпирические зависимости максимального снегозапаса от высоты места (с коэф-



**Рис. 1.** Положение исследуемых водосборов в пределах территории бассейна Воткинского водохранилища до гидрологических постов:

*a* – водосбор Кама–Гайны; *б* – водосбор Коса–Коса; *в* – водосбор Вишера–Рябинино

**Fig. 1.** Position of the studied river's catchments within the territory of the Votkinsk reservoir basin:

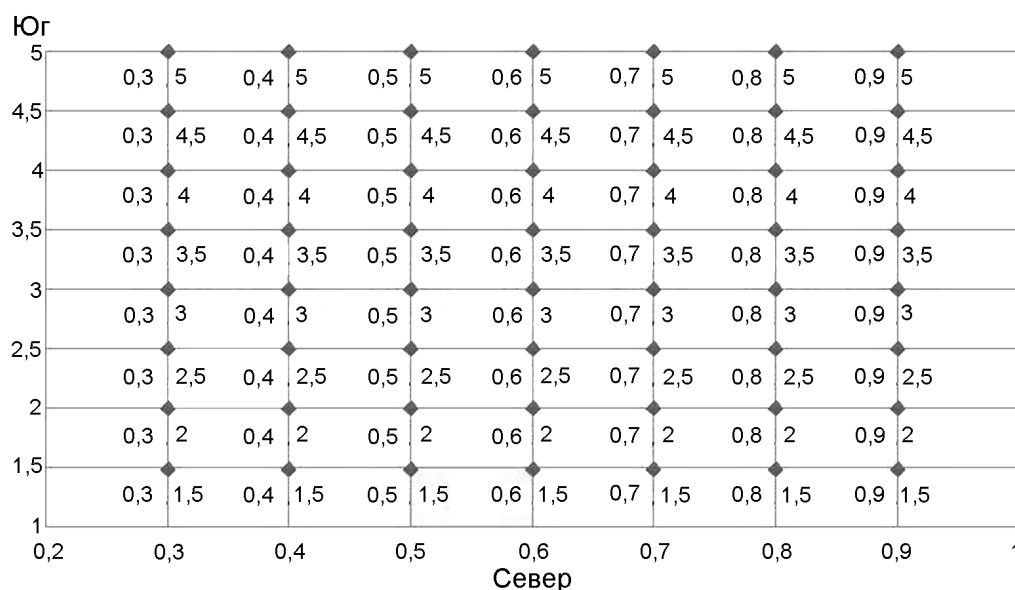
*a* – Kama–Gaynycatchment area; *б* – Kosa–Kosa catchment area; *в* – Vishera–Ryabininocatchment area.

фициентами корреляции  $0,72 \div 0,99$ ) отдельно для полевой и лесной территорий северных и южных районов водосбора Воткинского водохранилища. Оценка этих зависимостей показала, что средняя ошибка расчётов не превышала 7,4% фактической величины, а обеспеченность допустимой погрешности прогностических зависимостей составила от 67 до 100% [11].

Высоту учитывали путём введения коэффициентов, в качестве значений которых использованы параметры регрессионных уравнений: для северной части лесной территории водосбора – 0,97, для полевой – 1,47; для южной части водосбора – 0,62 и 0,55 соответственно. Учёт влияния экспозиции склонов также возможен путём введения коэффициентов. При этом возникает вопрос об их величинах и постоянстве во времени для склонов разной экспозиции, поскольку последние определяют неравномерность пространственного распределения освещённости, а следовательно, приходящего с солнечной радиацией количества

тепла. Для решения этой задачи выполнено математико-геоинформационное моделирование плотности теплового потока ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), поступающего в апреле на склоны разной экспозиции и крутизны исследуемых водосборов (рис. 1). Под таким математико-геоинформационным моделированием понимается автоматизированный расчёт пространственного распределения плотности теплового потока для каждой растровой ячейки территории водосбора, выполненный на основе ЦМР за конкретный день [12]. Для этого используется инструмент «SolarAnalyst» (модель «SolarFlux» [13, 14]) модуля «SpatialAnalyst» программного продукта ArcGIS.

Поступление солнечной радиации на равнину, западные и восточные склоны в течение всего исследуемого периода практически совпадает, равномерно увеличиваясь в течение апреля для водосбора р. Коса от 140 до  $239 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . Максимальные значения ( $244 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ) солнечной радиации приходятся на южные склоны к концу



**Рис. 2.** Комбинации значений коэффициентов экспозиции склонов, применённые при расчётах снеготаяния для водосбора гидрологического поста Коса–Коса.

По оси  $X$  представлены значения этих коэффициентов для северных склонов; по оси  $Y$  – для южных склонов

**Fig. 2.** Combinations of slope exposure coefficients used in calculating snow melting for the Kosa–Kosacatchment area. The  $X$ -axis shows the values of these coefficients for the northern slopes; along the  $Y$ -axis – for southern slopes

апреля, а минимальные ( $134 \text{ Вт/м}^2$ ) – на северные склоны в начале апреля. Для этих склонов выявлена следующая закономерность: с увеличением угла наклона южных склонов количество поступающей на них солнечной радиации возрастает (от  $156\text{--}164 \text{ Вт/м}^2$  в начале апреля до  $235\text{--}243 \text{ Вт/м}^2$  в конце апреля), а для северных – уменьшается (от  $147\text{--}136 \text{ Вт/м}^2$  в начале апреля до  $227\text{--}215 \text{ Вт/м}^2$  в конце апреля), что связано с ростом затенённости. Это увеличивает продолжительность снеготаяния на склонах северной экспозиции. Западные и восточные склоны получают в среднем равное количество солнечной радиации ( $193 \text{ Вт/м}^2$ ), увеличивающееся с крутизной склонов. На плоско-равнинные поверхности приходятся чуть меньшие значения –  $192 \text{ Вт/м}^2$ . Таким образом, для западных и восточных склонов, а также участков горизонтальной поверхности (плоско-равнинных территорий) коэффициенты экспозиции могут быть приняты равными единице. Аналогичные результаты получены при расчётах солнечной радиации для водосборов до гидрологических постов Кама–Гайны и Вишера–Рябино. Для определения оптимальных коэффициентов экспозиции северных и южных склонов предложено использовать комбинации из 56 их возможных значений (рис. 2).

Для всех пар значений коэффициентов экспозиции склонов рассчитаны снегозапас и слой стаявшего снега (мм) на каждый день периода снеготаяния в 2002, 2004, 2010 и 2015 гг. на примере водосбора гидрологического поста Коса–Коса. Выполнен сравнительный анализ фактических и модельных данных путём расчёта относительной погрешности моделирования  $\delta$  как разности фактического и расчётного значений, отнесённой к фактическому значению:

$$\delta = ((\bar{S}_f - \bar{S}_r) / \bar{S}_f) 100\%,$$

где  $\bar{S}_f$  – средний фактический снегозапас;  $\bar{S}_r$  – средний расчётный снегозапас.

Для величины снегозапаса в качестве фактических данных использована информация с метеорологических станций, расположенных в пределах водосбора. Для слоя стаявшего снега результаты модельных расчётов сравнивались с аналогичными слоями, вычисленными по методике Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) [15]. Результаты расчётов показали, что минимальная величина относительной погрешности моделирования как снегозапаса, так и слоя снега, стаявшего за день, наблюдается в двух случаях (табл. 1): а) при плавном изменении коэффици-

Таблица 1. Относительная средняя погрешность моделирования снегозапаса (%) при разных значениях коэффициентов экспозиции северных и южных склонов в весенний период 2002, 2004, 2010 и 2015 гг. на примере водосбора гидрологического поста Коса–Коса\*

| Дата             | Относительная средняя погрешность моделирования (%) при значениях коэффициентов экспозиции северных/южных склонов |         |         |         |                                                        |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|--------------------------------------------------------|
|                  | 0,3/5,0                                                                                                           | 0,6/3,0 | 0,9/1,5 | 0,5/1,5 | при переменных коэффициентах 0,3/5,0; 0,6/3,0; 0,9/1,5 |
| 05.04            | 4,86                                                                                                              | 5,18    | 5,54    | 5,82    | 4,86                                                   |
| 10.04            | 12,56                                                                                                             | 13,31   | 13,07   | 11,19   | 12,56                                                  |
| 15.04            | 6,02                                                                                                              | 8,77    | 10,23   | 7,03    | 6,02                                                   |
| 20.04            | 7,92                                                                                                              | 13,98   | 17,61   | 7,55    | 13,98                                                  |
| 25.04            | 23,33                                                                                                             | 21,69   | 20,13   | 15,12   | 20,13                                                  |
| 30.04            | 33,38                                                                                                             | 29,22   | 38,58   | 23,99   | 38,58                                                  |
| Среднее значение | 14,68                                                                                                             | 15,36   | 17,53   | 11,78   | 16,02                                                  |

\*Курсивом выделены значения минимальной относительной погрешности на каждую дату.

ентов в течение периода снеготаяния: увеличение для северных (*числитель*) и уменьшение для южных (*знаменатель*) склонов (0,3/5,0 до 15.04; 0,6/3,0 до 20.04; 0,9/1,5 до конца снеготаяния); б) при использовании постоянных коэффициентов для всего периода снеготаяния (0,5/1,5 для северных/южных склонов).

Для весеннего периода наилучшее совпадение расчётного снегозапаса с фактическими данными наблюдается при постоянных коэффициентах — 0,5/1,5. Им соответствует минимальная погрешность моделирования, которая в среднем составляет 11,78%. Расчёты с высокими коэффициентами для южных склонов (5,0) дают наилучшие результаты только в начале периода снеготаяния. При использовании переменных коэффициентов погрешность моделирования снегозапасов минимальна только в начале периода, возрастая к концу снеготаяния до 38,58%. Наименьшее совпадение рассчитанного снегозапаса с фактическими данными характерно для самого конца периода снеготаяния (30.04), что может быть связано как с ошибками моделирования, так и с ошибками получения фактических наблюдаемых величин из-за сложности выполнения измерений.

Величина оставшегося снежного покрова на каждый день при разных парах коэффициентов различна, поэтому был выполнен сравнительный анализ рассчитанных сумм слоёв стаявшего снега (мм) за отдельные временные периоды для условий постоянных и переменных коэффициентов с данными, полученными по методике ЦГМС (табл. 2). В первом и втором временном промежутках (от начала снеготаяния до 15.04 и

от 16.04 до 20.04) средние погрешности моделирования значений сумм слоёв стаявшего снега с использованием постоянных и переменных коэффициентов составляют 12,56 и 23,17% соответственно. В последнем временном отрезке (с 21.04 и до конца снеготаяния) наилучшее совпадение расчётных и фактических данных также соответствует применению постоянных коэффициентов экспозиции северных и южных склонов (0,5/1,5), а относительная погрешность моделирования колеблется в пределах 0,38–7,21%. Использование переменных коэффициентов приводит к завышению слоя стаявшего снега от 3,78 до 57,97% (см. табл. 2). При постоянных коэффициентах в течение всего периода снеготаяния погрешность моделирования не превышает 13,37%.

Достоинство применения ГИС-технологий — получение модельной карты пространственного распределения снежного покрова в пределах водосбора на любую дату снеготаяния. Проверка правильности результатов моделирования возможна путём их сравнения с фактическим оставшимся снежным покровом по космическим снимкам исследуемой территории [16], преимущество которых: открытый доступ; оперативность получения информации; большая площадь охвата; высокое разрешение; наличие автоматизированных алгоритмов для выделения маски снега и облачности. В работе использованы снимки со спутника «Terra» серии EOS, полученные сканирующим спектрорадиометром среднего разрешения MODIS в формате GeoTiff (RGB, каналы 1, 4, 3), дешифрованные в программном пакете Scan Ex Image Processor [17].

Таблица 2. Результаты расчётов суммы слоя стаявшего снега (абсолютные значения и относительная погрешность моделирования) за весенний период 2002, 2004, 2010 и 2015 гг. на примере водосбора гидрологического поста Коса–Коса

| Период                     | Сумма слоя стаявшего снега, рассчитанная по методике Пермского ЦГМС, мм | Значения суммы слоя стаявшего снега, мм | Относительная погрешность моделирования суммы слоя стаявшего снега, % |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <i>2002 год</i>            |                                                                         |                                         |                                                                       |
| Начало снеготаяния – 15.04 | 49,36                                                                   | 72,40*/53,40**                          | 46,67*/5,57**                                                         |
| 16.04–20.04                | 71,91                                                                   | 73,10/56,80                             | 1,65/20,67                                                            |
| 21.04 – конец снеготаяния  | 129,87                                                                  | 153,00/140,90                           | 17,81/7,21                                                            |
| <i>Итого</i>               | <i>251,14</i>                                                           | <i>298,50/251,10</i>                    |                                                                       |
| <i>2004 год</i>            |                                                                         |                                         |                                                                       |
| Начало снеготаяния – 15.04 | 0                                                                       | 00                                      | 0                                                                     |
| 16.04–20.04                | 0                                                                       | 0                                       | 0                                                                     |
| 21.04 – конец снеготаяния  | 240,89                                                                  | 250,00/241,80                           | 3,78/0,38                                                             |
| <i>Итого</i>               | <i>240,89</i>                                                           | <i>250,00/241,80</i>                    |                                                                       |
| <i>2010 год</i>            |                                                                         |                                         |                                                                       |
| Начало снеготаяния – 15.04 | 143,37                                                                  | 219,90/118,28                           | 53,38/17,50                                                           |
| 16.04–20.04                | 36,95                                                                   | 52,70/37,20                             | 42,62/0,68                                                            |
| 21.04 – конец снеготаяния  | 11,80                                                                   | 30,90/10,95                             | 161,93/7,18                                                           |
| <i>Итого</i>               | <i>192,12</i>                                                           | <i>303,50/166,43</i>                    |                                                                       |
| <i>2015 год</i>            |                                                                         |                                         |                                                                       |
| Начало снеготаяния – 15.04 | 79,9                                                                    | 106/89,7                                | 32,8/12,3                                                             |
| 16.04–20.04                | 45,8                                                                    | 49,6/41,3                               | 8,22/9,89                                                             |
| 21.04 – конец снеготаяния  | 131                                                                     | 148/125                                 | 13/4,67                                                               |
| <i>Итого</i>               | <i>257</i>                                                              | <i>304/256</i>                          |                                                                       |

\*Переменные коэффициенты: 0,3/5,0; 0,6/3,0 и 0,9/1,5. \*\*Постоянные коэффициенты 0,5/1,5.

Проверку можно выполнить как путём визуального сравнения модельных карт и космических снимков, так и с использованием количественных методов оценки. Исследования, выполненные на примере водосбора гидрологического поста Коса–Коса, показали, что визуальное сопоставление модельной карты пространственного распределения снежного покрова с дешифрированным космическим снимком на ту же дату субъективно. Для количественной оценки результатов моделирования пространственного распределения снежного покрова мы предлагаем следующий методологический подход:

1) автоматическое дешифрирование космического снимка для определения фактической площади, занятой снегом, с последующей его трансформацией в растровую карту;

2) построение растровой модельной карты пространственного распределения снежного покрова на дату космического снимка с учётом коэффициентов экспозиции склонов и высоты местности;

3) количественное сравнение модельной карты и дешифрированного снимка с использованием оверлейных операций для каждой растровой ячейки (где снег есть и где снега нет).

В результате расчётов получаем два значения: а) долю совпадающих по значению ячеек расчётной растровой карты с дешифрированным снимком; б) долю совпадающих по значению ячеек дешифрированного снимка с расчётной растровой картой. Обязательные условия сравнения растровых карт — их одинаковая проекция, пространственное разрешение и расположение ячеек строго друг под другом. При трансформации дешифрированного космического снимка в растровую карту в каждую его ячейку записывается информация о наличии (1) или отсутствии (0) снежного покрова. В то же время результат модельных расчётов снеготаяния на дату снимка — величина оставшегося снежного покрова как в абсолютных значениях (в мм слоя), так и в относительных — в долях от единицы ( $0 \div 1$ ).

Таблица 3. Результаты сравнения модельной карты и дешифрованного космического снимка для водосбора гидрологического поста Коса–Коса на 15.04.2015 г.

| Доля оставшегося снега в ячейке | Величина совпадения растровой модели с дешифрованным космическим снимком, % | Величина совпадения дешифрованного снимка с растровой моделью, % | Средняя величина совпадения площадей, % |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 0,1                             | 82,58                                                                       | 91,74                                                            | 87,16                                   |
| 0,3                             | 82,30                                                                       | 89,29                                                            | 85,79                                   |
| 0,5                             | 82,19                                                                       | 88,34                                                            | 85,26                                   |
| 0,7                             | 82,15                                                                       | 81,81                                                            | 81,98                                   |
| 0,9                             | 83,75                                                                       | 25,83                                                            | 54,79                                   |

Для выполнения попиксельного сравнения необходимо, чтобы в каждой ячейке растровой модели также была информация о наличии (1) или отсутствии (0) снежного покрова, т.е. вычисленное значение доли оставшегося снега следует округлить до 1 или до 0. В качестве «критерия округления» принято значение 0,5 (если значение доли  $\geq 0,5$ , то присваиваем 1 – снег есть, если  $< 0,5$ , то присваиваем 0 – снега нет). Для проверки правильности выбора такого критерия последовательно были вычислены площади области совпадения растровой карты и дешифрованного снимка при разных вычисленных значениях доли оставшегося в ячейке снега ( $0,1 \div 0,9$ ) с шагом 0,2. Как видно из табл. 3, величина совпадения площадей практически не изменяется для значений  $0,1 \div 0,7$  доли оставшегося снега и составляет в среднем 85,05%. Совпадение площадей, занятых снегом, увеличивается, если считать, что вся ячейка заполнена снегом при его реальном наличии лишь на 0,1 части площади ячейки (87,16%), так как чем меньше значение доли снега, оставшегося в ячейке, тем в большем количестве ячеек присутствует снег на модельной карте (рис. 3, а). Это приводит к ложному увеличению совпадения площадей дешифрованного снимка (см. рис. 3, з) и расчётной растровой модели.

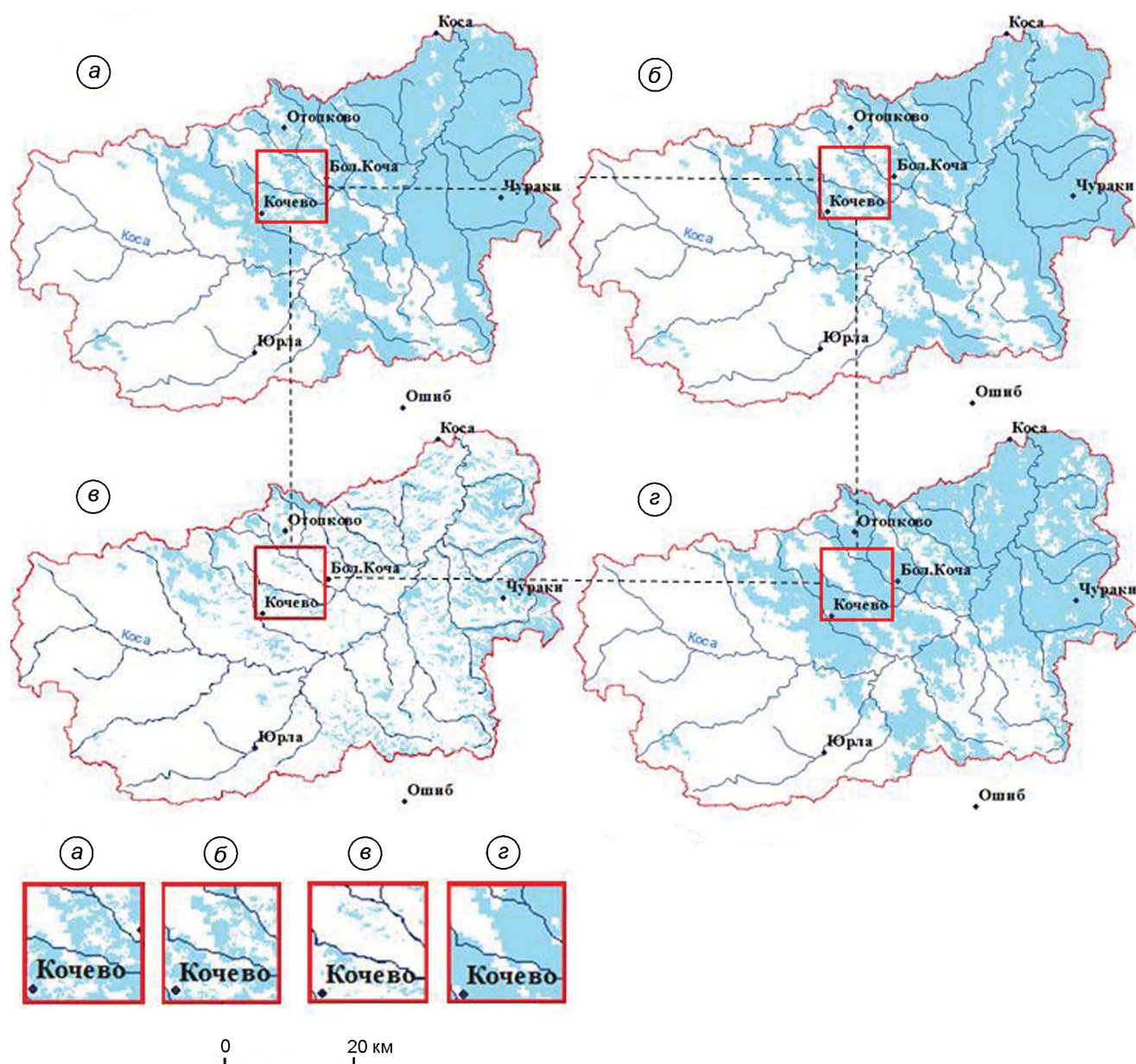
Обратная картина наблюдается в случае использования критерия 0,9: все ячейки, заполненные снегом на меньшую величину, при построении модельной карты окажутся свободными от снега (см. рис. 3, в), что не соответствует действительности. Поскольку при дешифрировании космических снимков и присвоении ячейке информации о наличии или отсутствии снежного покрова максимальная пространственная погрешность составляет половину размера ячейки [12], для построения расчётной

растровой модели справедливо использование критерия 0,5 (см. рис. 3, б, з).

При работе с материалами дистанционного зондирования часто сталкиваются с негативным влиянием облачности на снимках, когда часть, а иногда и вся исследуемая территория закрыта облаками. При наличии даже небольшой (10–20%) «закрытости» водосбора облачностью это может сильно повлиять на результаты расчётов совпадения площадей, занятых снегом, при сравнении модельных карт и космических снимков. Для оценки влияния облачности на результаты сравнительного анализа было выполнено моделирование снеготаяния для водосбора гидрологического поста Коса–Коса с предварительно «вырезанными» участками, занятыми облачностью, как на модельных картах, так и на дешифрованных космических снимках. Результаты расчётов при наличии и отсутствии облачности приведены в табл. 4, из которой видно, что величина совпадения площадей модельных карт и дешифрованных космических снимков при учёте влияния облачности увеличилась в среднем на 10,23%.

Была выполнена валидация модели снеготаяния, разработанной на примере водосбора гидрологического поста Коса–Коса, на других водосборах бассейна Воткинского водохранилища за разные годы (табл. 5). Количественное сравнение модельных карт и дешифрованных космических снимков показало, что для равнинного водосбора гидрологического поста Кама–Гайны совпадение площадей составляет 72,56%, а для горного водосбора гидрологического поста Вишера–Рябино – 88,56%. Таким образом, предложенная математико-геоинформационная модель весеннего снеготаяния показала хорошие результаты валидации на всех исследуемых водосборах. Особенно высокое совпадение мо-





**Рис. 3.** Пространственное распределение снежного покрова в пределах водосбора р. Коса — с. Коса на 15.04.2015 г.

Модельные карты созданы при разных значениях доли оставшегося снега в ячейке: а — 0,1; б — 0,5; в — 0,9; г — дешифрованный космический снимок; наличие снега отмечено голубым цветом

**Fig. 3.** Spatial distribution of snow cover within the Kosa-Kosa catchment area on 04/15/2015.

Model maps were created for different values of the proportion of the remaining snow in the cell: а — 0,1; б — 0,5; в — 0,9; г — de-coded satellite image; the presence of snow is marked in blue

дельных карт и дешифрованных космических снимков отмечается в начале и середине периодов снеготаяния, когда при исключении фактора облачности оно достигает 100%. Величина совпадения минимальна в конце периода снеготаяния, когда снег начинает темнеть и при дешифровании может распознаваться как талая земля.

### Заключение

Расчёты снеготаяния — основополагающие при оценке весеннего половодья. Их усовершенствование возможно за счёт использования детальных сведений о характере подстилающей поверхности и математико-геоинформационного моделирова-

Таблица 4. Результаты сравнения модельных карт и дешифрированных космических снимков при исключении из расчётов площади территории, закрытой облачностью, и использовании поправочных коэффициентов экспозиции склонов (северных – 0,5; южных – 1,5; западных, восточных и равнинной территории – 1,0) для водосбора гидрологического поста Коса-Коса за весенние периоды 2010 и 2015 гг.

| Дата    | Средняя величина совпадения площадей, % |                           | Разность, % |
|---------|-----------------------------------------|---------------------------|-------------|
|         | при наличии облачности                  | при исключении облачности |             |
| 2010 г. |                                         |                           |             |
| 05.04   | 86,50                                   | 88,15                     | 1,65        |
| 09.04   | 57,39                                   | 67,96                     | 10,57       |
| 17.04   | 52,56                                   | 57,80                     | 5,24        |
| 21.04   | 24,87                                   | 57,46                     | 32,58       |
| 2015 г. |                                         |                           |             |
| 05.04   | 73,57                                   | 83,35                     | 9,78        |
| 15.04   | 65,47                                   | 85,26                     | 19,79       |
| 28.04   | 54,10                                   | 58,09                     | 3,99        |

Таблица 5. Результаты сравнения модельных карт и дешифрированных космических снимков для водосборов до гидрологических постов Кама–Гайны и Вишера–Рябинино за весенние периоды 2004, 2010 и 2015 гг.

| 2004 г.                |                                         | 2010 г. |                                         | 2015 г. |                                         |
|------------------------|-----------------------------------------|---------|-----------------------------------------|---------|-----------------------------------------|
| дата                   | средняя величина совпадения площадей, % | дата    | средняя величина совпадения площадей, % | дата    | средняя величина совпадения площадей, % |
| <i>Кама–Гайны</i>      |                                         |         |                                         |         |                                         |
| 29.04                  | 95,36                                   | 05.04   | 100,00                                  | 05.04   | 91,18                                   |
| 06.05                  | 69,56                                   | 09.04   | 80,61                                   | 15.04   | 94,10                                   |
| 08.05                  | 53,16                                   | 17.04   | 42,86                                   | 28.04   | 51,14                                   |
| —*                     | —                                       | 21.04   | 41,19                                   | —       | —                                       |
| <i>В среднем</i>       | <i>72,69</i>                            |         | <i>66,17</i>                            |         | <i>78,81</i>                            |
| <i>Вишера–Рябинино</i> |                                         |         |                                         |         |                                         |
| 29.04                  | 99,52                                   | 05.04   | 89,55                                   | 05.04   | 98,15                                   |
| 06.05                  | 98,07                                   | 09.04   | 94,92                                   | 15.04   | 90,29                                   |
| 08.05                  | 97,30                                   | 17.04   | 91,44                                   | 28.04   | 93,03                                   |
| 10.05                  | 86,00                                   | 21.04   | 83,28                                   | 03.05   | 86,68                                   |
| —                      | —                                       | 25.04   | 61,66                                   | 04.05   | 91,53                                   |
|                        |                                         | —       | —                                       | 07.05   | 79,33                                   |
|                        |                                         |         |                                         | 10.05   | 78,29                                   |
|                        |                                         |         |                                         | 11.05   | 72,95                                   |
| <i>В среднем</i>       | <i>95,22</i>                            |         | <i>84,17</i>                            |         | <i>86,28</i>                            |

\*Прочерки – отсутствие расчётов в связи с окончанием периода снеготаяния.

ния. Последнее позволило получить непрерывную картину пространственно-временных изменений залегания снега и запаса воды в нём на любую дату для каждой растровой ячейки водосбора. Для учёта влияния рельефа в расчёты снеготаяния предложено вводить поправочные коэффициенты. Высота учитывалась введением коэффициентов, в качестве значений которых использовались параметры регрессионных уравнений зависимостей максимального снегозапаса от высоты места: для северной части лесной территории водосбора они со-

ставили 0,97, для полевой – 1,47; для южной части водосбора – 0,62 и 0,55 соответственно.

Для учёта влияния склонов разной экспозиции на неравномерность таяния снега по территории водосбора выполнено моделирование величин снегозапаса и слоя стаявшего снега при разных комбинациях значений коэффициентов экспозиции склонов. Проведён сравнительный анализ полученных результатов с данными наблюдений на снегомерных маршрутах гидрометеорологической сети станций и постов

Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Критерий правильности выбора оптимальных коэффициентов — значения относительной погрешности моделирования снегозапаса и слоя стаявшего снега. Установлено, что наименьшие значения искомой погрешности наблюдаются при использовании следующих постоянных поправочных коэффициентов экспозиции склонов: для северных — 0,5; для южных — 1,5; для западных, восточных и плоско-равнинной территории — 1,0.

Для верификации результатов моделирования пространственного распределения снежного покрова предложен методологический подход, в котором с помощью оверлейных операций реализовано сравнение модельных карт и данных космического мониторинга на наличие или отсутствие снега в каждой растровой ячейке. Уста-

новлено оптимальное значение доли оставшегося снега в каждой ячейке растровой модели для присвоения ячейке информации о наличии или отсутствии снежного покрова. Это — крайне важно при попиксельном анализе совпадения модельных карт пространственного распределения снежного покрова с материалами космических съёмок. Впервые проведены верификация и валидация модельных расчётов пространственного распределения снежного покрова в период снеготаяния с учётом влияния рельефа за разные годы и для разных по размеру водосборов Прикамья. Средняя величина совпадения площадей модельных карт и дешифрированных космических снимков для равнинных водосборов до гидрологических постов Коса—Коса и Кама—Гайны составила 72,21%, для горного водосбора гидрологического поста Вишера—Рябино — 88,56%.

## Литература

1. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: изд. РАН, 2018. 300 с.
2. Соколовский Д.Л. Речной сток. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 539 с.
3. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 348 с.
4. Попов Е.Г. Анализ формирования стока равнинных рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1956. 131 с.
5. Комаров В.Д. О процессах формирования половогода на малой реке и предвычисления его гидрографа // Тр. ЦИП. 1947. Вып. 6 (33). С. 3—41.
6. Георгиевский М.В., Третьякова Г.Д. Моделирование снеготаяния для малоизученных бассейнов // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению: Сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т, 2020. С. 54—59.
7. Лебедева Н.Д. Долгосрочные прогнозы притока воды в водохранилище Камской ГЭС // Тр. ЦИП. 1967. Вып. 155. С. 89—102.
8. Калинин В.Г., Суманеева К.И., Русаков В.С. Моделирование пространственного распределения снежного покрова в период весеннего снеготаяния // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 74—85.
9. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2010. 212 с.
10. Пьянков С.В., Калинин В.Г. Гидрография. Создание цифровых моделей рельефа для определения гидрографических характеристик рек и их водо-

## References

1. Motovilov Yu.G., Gel'fan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnykh bassejnov*. Models of runoff formation in problems of hydrology of river basins. Moscow: Russian Academy of Sciences, 2018: 300 p. [In Russian].
2. Sokolovskij D.L. *Rechnoj stok*. River runoff. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968: 539 p. [In Russian].
3. Kuz'min P.P. *Process tayaniya snezhnogo pokrova*. The process of melting snow cover. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1961: 348 p. [In Russian].
4. Popov E.G. *Analiz formirovaniya stoka ravninnykh rek*. Analysis of the formation of the runoff of lowland rivers. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1956: 131 p. [In Russian].
5. Komarov V.D. On the processes of flood formation on a small river and the pre-calculation of its hydrograph. *Trudy Gidrometcentra*. Proc. of the Hydrometcenter. 1947, 6 (33): 3—41. [In Russian].
6. Georgievskij M.V., Tret'yakova G.D. Simulation of snowmelt for poorly studied basins. *Sbornik докладов mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Chetvertye Vinogradovskie chteniya»*. Reports of the intern. scientific conf. «The Fourth Vinogradov Readings». St. Petersburg 2020: 54—59. [In Russian].
7. Lebedeva N.D. Long-term forecasts of water inflow into the reservoir of the Kamskaya HPP. *Trudy Gidrometcentra*. Proc. of the Hydrometcenter. 1967, 155: 89—102. [In Russian].
8. Kalinin V.G., Sumaneeva K.I., Rusakov V.S. Model in the spatial distribution of snow cover during spring snow melt. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2019, 2: 74—85. [In Russian].
9. Kalinin V.G., P'yankov S.V. *Primenenie geoinformacionnykh tekhnologij v gidrologicheskikh issledovaniyah*. Application of geoinformation technologies in hydrological research. Perm: PSU, 2010: 212 p. [In Russian].
10. P'yankov S.V., Kalinin V.G. *Gidrografiya. Sozdanie cifrovyyh modelej rel'efa dlya opredeleniya gidrograficheskikh*

- сборов. Ч. 1. Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2014. 63 с.
11. Микова К.Д., Трифонова Е.В. Вопросы об использовании эмпирических зависимостей для прогноза дат начала весеннего половодья // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Челябинск: АБРИС, 2008. С. 80–82.
12. <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/resample.htm>.
13. Dubayah R., Rich P.M. GIS and Environmental Modeling: GIS-based solar radiation modeling // Progress and Research Issues. GIS World Books. Fort Collins, CO. 1996. P. 129–134.
14. Dubayah R., Rich P.M. Topographic solar radiation models for GIS // Intern. Journ. of Geographical Information Systems. 1995. № 9. P. 405–419.
15. Электронный ресурс: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_46536061\\_43653542.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46536061_43653542.pdf). Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. К вопросу об учете влияния экспозиции склонов в расчетах снеготаяния // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках: Материалы междунар. науч.-практ. оч.-заоч. конф. Под общ. ред. П.С. Лопуха. Минск: БГУ, 2021. С. 392–397.
16. Электронный ресурс <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/modern-problems-of-reservoirs-and-their-catchments.pdf>. Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. О верификации модельных расчетов пространственного распределения снежного покрова в период снеготаяния // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Тр. VIII Всерос. науч.-практ. конф. Пермь, 2021. С. 99–105.
17. <http://researchpark.spbu.ru/kgt-methods-rus/1192-kgt-modis-rus>.
18. *harakteristik rek i ih vodosborov*. Hydrography. Creation of digital elevation models to determine the hydrographic characteristics of rivers and their catchments. Part 1. Perm: PSU, 2014: 63 p. [In Russian].
11. Mikova K.D., Trifonova E.V. Questions about using empirical relationships to predict spring flood start dates. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konf. «Problemy geografii Urala i sopredel'nyh territorij»*. Sat. reports of the intern. scientific conf. «Problems of the geography of the Urals and adjacent territories». Chelyabinsk: ABRIS, 2008: 80–82. [In Russian].
12. <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/resample.htm>.
13. Dubayah R., Rich P.M. GIS and Environmental Modeling: GIS-based solar radiation modeling. Progress and Research Issues. GIS World Books. Fort Collins, CO. 1996: 129–134.
14. Dubayah R., Rich P.M. Topographic solar radiation models for GIS. Intern. Journ. of Geographical Information Systems. 1995, 9: 405–419.
15. [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_46536061\\_43653542.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46536061_43653542.pdf). Kalinin V.G., Shaydulina A.A., Rusakov V.S., Fasahov M.A. Effects of slope exposition in calculations of snow melting. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konf. «Razvitie geograficheskikh issledovanij v Belarusi v XX–XXI vekah [Elektronnyj resurs]»*. Sat. reports of the international scientific conf. «Development of geographical research in Belarus in the XX–XXI centuries [Electronic resource]». Minsk, 2021: 392–397. [In Russian].
16. <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/modern-problems-of-reservoirs-and-their-catchments.pdf>. Kalinin V.G., Shaydulina A.A., Rusakov V.S., Fasahov M.A. On the verification of model calculations of the snow cover spatial distribution during the spring period. *Sbornik dokladov vserossijskoj nauchnoj konf. «Sovremennye problem vodohranilishc i ih vodosborov»*. Sat. reports of the all-Russian scientific conf. «Modern problems of reservoirs and their catchments». Perm', 2021: 99–105. [In Russian].
17. <http://researchpark.spbu.ru/kgt-methods-rus/1192-kgt-modis-rus>.