

Гидрология
Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

Научная статья

УДК 556.124.001.572

doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-100-112

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СНЕГОТАЯНИЯ НА РЕЧНЫХ ВОДОСБОРАХ ВЕРХНЕЙ КАМЫ

Аделия Александровна Шайдулина^{1✉}, Виталий Германович Калинин², Михаил Александрович Фасахов³

^{1,2,3}Пермский государственный национальный исследовательский университет, г.Пермь, Россия

¹AdelinaSh89@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-2439-908X>, Scopus Author ID: 57200702775, ResearcherID: N-6027-2018, SPIN-код: 3723-4798, Author ID: 723724

²vgkalinin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5559-6284>, Scopus Author ID: 7201527612, ResearcherID: ABC-7662-2021, SPIN-код: 9507-2306, Author ID: 70059

³komrad.fasakhov2017@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7334-4646>, ResearcherID: ACZ-1667-2022, SPIN-код: 5284-4001, Author ID: 1143245

Аннотация. Рассматривается пространственно-временная динамика процесса снеготаяния на речных водосборах Верхней Камы, отличающихся по размерам, особенностям рельефа и находящихся на равнинной – г/п Коса-Коса ($A=6221 \text{ км}^2$), г/п Кама-Гайны ($A=27822 \text{ км}^2$) и горной – г/п Вишера-Рябинино ($A=31084 \text{ км}^2$) территориях. Расчеты проведены с применением метода температурных коэффициентов, интегрированного в ГИС для лет с разными метеорологическими условиями и продолжительностью снеготаяния: 2004, 2010 и 2015 гг. Анализ результатов расчетов показал, что средняя продолжительность снеготаяния на исследуемых водосборах составляет 32 сут. На продолжительность снеготаяния и величину слоя стаявшего за сутки снега оказывает влияние интенсивность нарастания положительных температур воздуха. Сроки начала снеготаяния изменяются значительно меньше, чем сроки его окончания. Равнинные водосборы освобождаются от снежного покрова раньше горного в среднем на 20 сут. Это обусловлено широтной и высотной зональностью, а также значительной расчленённостью рельефа водосбора г/п Вишера-Рябинино. Процесс интенсивного снеготаяния начинается на нем в среднем на 9 дней позже по сравнению с равнинными водосборами. Водосбор г/п Коса-Коса раньше других освобождается от снежного покрова в связи с его небольшой площадью и слабой расчлененностью. Влияние широтной зональности при стаивании снежного покрова лучше всего заметно на меридионально расположенном водосборе г/п Кама-Гайны: раньше всего от снежного покрова освобождаются южная и центральная части территории водосбора, а позже – северная часть.

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

Для цитирования: Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А. Пространственно-временные закономерности снеготаяния на речных водосборах верхней Камы // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 1(60). С. 100–112. doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-100-112.

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-100-112

SPATIO-TEMPORAL PATTERNS OF SNOWMELT PROCESSES IN THE CATCHMENTS OF THE UPPER KAMA

Adeliya A. Shaydulina^{1✉}, Vitaliy G. Kalinin², Mikhail A. Fasakhov³

^{1,2,3}Perm State University, Perm, Russia

¹AdelinaSh89@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-2439-908X>, Scopus Author ID: 57200702775, ResearcherID: N-6027-2018, SPIN-code: 3723-4798, Author ID: 723724

²vgkalinin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-5559-6284>, Scopus Author ID: 7201527612, ResearcherID: ABC-7662-2021, SPIN-code: 9507-2306, Author ID: 70059

³komrad.fasakhov2017@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7334-4646>, ResearcherID: ACZ-1667-2022, SPIN-код: 5284-4001, Author ID: 1143245

© Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А., 2022



Гидрология

Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

Abstract. The paper deals with the spatio-temporal dynamics of the snowmelt process in the catchments of the Upper Kama, differing in size and relief features and located both on the plains – gauging station (g/s) Kosa-Kosa ($A=6,221 \text{ km}^2$), g/s Kama-Gainy ($A=27,822 \text{ km}^2$) and in a mountainous territory – g/s Vishera-Ryabinino ($A=31,084 \text{ km}^2$). The calculations were carried out using the method of temperature coefficients integrated into the GIS for years with different meteorological conditions and duration of snowmelt: 2004, 2010, and 2015. An analysis of the calculation results showed that the average duration of snowmelt in the studied catchments is 32 days. The duration of snowmelt and the daily amount of melted snow are influenced by the intensity of the increase in positive air temperatures. The timing of the start of snowmelt varies much less than the timing of its end. The plain catchments are freed from snow cover earlier than the mountain one by an average of 20 days. This is due to the latitudinal and altitudinal zonality, as well as the significant dissection of the relief of the g/s Vishera-Ryabinino catchment. The process of intense snowmelt begins here, on average, 9 days later than in the plain catchments. The g/s Kosa-Kosa catchment is freed from snow cover earlier than the others, which is due to its small area and weak dissection. The influence of latitudinal zonality during the melting of snow cover is best seen in the meridional catchment g/s Kama-Gainy. The southern and central parts of the catchment area are freed from snow first, later followed by the northern part.

Keywords: snowmelt, GIS technologies, modeling the spatial distribution of snow cover

For citation: Shaydulina, A.A., Kalinin, V.G., Fasakhov, M.A. (2022). Spatio-temporal patterns of snowmelt processes in the catchments of the Upper Kama *Geographical Bulletin*. No. 1(60). Pp. 100–112. doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-100-112.

Введение

Пространственно-временные закономерности процессов снеготаяния оказывают непосредственное влияние на формирование стока весеннего половодья. Это особенно актуально для территории Пермского края, где насчитывается более 29000 рек, на берегах которых расположено множество населенных пунктов. Реки исследуемой территории имеют преимущественно снеговое питание и на долю талого стока приходится от 55 до 70%.

В последнее время для оценки процессов снеготаяния все большее применение находят модели снежного покрова, часто включенные в виде блока в гидрологические модели по расчету стока или являющиеся частью климатических моделей. В большинстве современных моделей климата [2; 4–6] используются упрощённые схемы расчёта характеристик снежного покрова, такие как водный эквивалент снега (SWE), альbedo поверхности, площадь снежного покрова с привлечением данных спутникового зондирования Земли [18]. Подробный обзор и сравнение моделей снежного покрова (как автономных, так и интегрированных в модели климата) приведены в работе [21]. Расчет характеристик снежного покрова осуществляется и в моделях формирования речного стока. Так, в комплекс ЕСОМАГ включена однослойная физически обоснованная модель снежного покрова [15; 22], в модели «Гидрограф» с полураспределенными параметрами [1] также присутствует блок по расчету снеготаяния. Процессы формирования и таяния снежного покрова на исследуемой территории рассматривались в работах [20; 23].

Целью настоящего исследования является анализ пространственно-временной динамики процессов снеготаяния на речных водосборах Верхней Камы за годы с разными метеорологическими условиями и продолжительностью периода снеготаяния.

Для выполнения такого анализа использованы результаты посуточных расчетов оставшегося снега на водосборе и запаса воды в нем по ранее разработанной модели снеготаяния [8–11], в основе которой лежит усовершенствованная методика Н.Д. Лебедевой [14], реализованная средствами ГИС.

Использование метода температурных коэффициентов, интегрированного в ГИС, совместно с электронными топографическими и тематическими картами, содержащими

Гидрология
Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

большой объем качественной и количественной информации о подстилающей поверхности, дает возможность учитывать региональные особенности исследуемых водосборов и существенно повысить точность расчетов.

Материалы и методы

Метод температурных коэффициентов был предложен В.Д. Комаровым [12] и используется в большинстве моделей снеготаяния [3]. Он отражает физико-географические условия речных бассейнов и основан на предположении о линейной связи между количеством стаявшей воды и приземной температурой воздуха.

Адаптация метода для территории бассейна р. Камы выполнена Н.Д. Лебедевой [14], и в настоящее время он продолжает использоваться в Пермском центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды при прогнозировании снеготаяния на водосборах рек Пермского края.

К недостаткам метода можно отнести неучет неоднородности пространственного распределения и накопления снежного покрова, связанной с орографическими условиями местности. Расчеты снеготаяния с добавлением информации о пространственном распределении растительного покрова и орографии бассейна позволяют устранить этот недостаток. Подробно метод температурных коэффициентов, его усовершенствование с применением ГИС-технологий, верификация и валидация расчетов снеготаяния на разных по размеру речных водосборах Прикамья рассмотрены в работах [8–11]. Общая схема расчетов процесса снеготаяния представлена на рис. 1.



Рис. 1. Общая схема расчетов процесса снеготаяния и их верификации

Fig. 1. General scheme for calculating the snowmelt process and verification of the calculations

Исследования проведены на примере речных водосборов Верхней Камы, отличающихся по размерам, особенностям рельефа и находящихся на равнинной – г/п Коса-Коса, г/п Кама-Гайны и горной – г/п Вишера-Рябинино территориях. Представление о различиях природных условий и положения рассматриваемых водосборов можно получить в табл. 1.

Гидрология
Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

Таблица 1

Основные гидрографические характеристики исследуемых водосборов [7]
 Main hydrographic characteristics of the studied catchments [7]

<i>Водосбор</i>	<i>Площадь водосбора, км²</i>	<i>Средняя высота водосбора, м БС</i>	<i>Средний уклон водосбора, ‰</i>	<i>Координаты центра тяжести</i>	<i>Лесистость, %</i>
г/п Коса-Коса	6221	183	16,76	59°34' с.ш. 54°28' в.д.	87
г/п Кама-Гайны	27822	200	13,47	59°49' с.ш. 53°05' в.д.	84*
г/п Вишера-Рябино	31084	313	54,51	60°44' с.ш. 57°47' в.д.	93

*по данным [16]

*according to [16]

Расчёты выполнены для 2004, 2010 и 2015 гг., которые существенно отличаются по метеорологическим условиям и продолжительности снеготаяния. Так, в 2004 г. был самый холодный апрель в XXI в. с температурой на 4–5°C ниже нормы. В 2010 г. – теплый и сухой апрель с преобладанием антициклональной погоды и интенсивной волной тепла до +20°C в третьей декаде, а весной 2015 г. наблюдался продолжительный период с температурой 0...+5°C и избытком осадков.

Для выполнения расчетов собран материал ежедневных наблюдений в период таяния снежного покрова по 20 метеостанциям и гидрологическим постам. Распределение метеорологической информации, определенной в точках метеостанций и гидрологических постов, по всем растровым ячейкам водосбора выполнено путем интерполяции этих значений с помощью инструмента «полигоны Вороного» [8]. Такой полигон представляет из себя участок территории, «контролируемый» метеостанцией или постом. При этом учитывается, что рассматриваемые метеорологические характеристики могут измеряться не на всех пунктах наблюдений. Так, данные о максимальных снеговых запасах приняты по 20 пунктам наблюдений, а ежедневные значения температуры воздуха (°C) и осадков (мм) имеются только по 8. Поэтому полигоны влияния строятся для каждой характеристики отдельно.

Построение модельных карт пространственного распределения снежного покрова и слоя стаявшего снега выполнено с применением группы инструментов ArcGIS 10.4. Пространственное разрешение модельных карт составляет: 0,1 км – г/п Коса-Коса и 0,3 км – г/п Кама-Гайны и г/п Вишера-Рябино.

Результаты и их обсуждение

Снеготаяние представляет собой процесс превращения снега и льда, заключенного в снежном покрове, в воду [19]. Главным фактором, определяющим интенсивность и длительность процессов снеготаяния, являются ход температуры воздуха в весенний период и величина максимальных снеговых запасов.

Величины максимальных снеговых запасов и их отклонения от среднемноголетних значений для рассматриваемых сезонов снеготаяния представлены в табл. 2.

Отклонение (δ) величины максимальных снеговых запасов в конкретный год от среднемноголетнего значения рассчитано как разность среднемноголетнего и фактического значений, отнесенная к среднемноголетнему:

$$\delta = \frac{\overline{S_{\text{ср.мн}}} - \overline{S_{\text{ф}}}}{\overline{S_{\text{ср.мн}}}} 100\%, \quad (1)$$

где $\overline{S_{\text{ср.мн}}}$ – средний многолетний снеговой запас; $\overline{S_{\text{ф}}}$ – средний фактический снеговой запас.

Анализ показал (табл. 2), что наименьшие отклонения от среднемноголетних значений наблюдаются в 2004 и 2015 гг. Снеговые запасы в 2010 г. – ниже среднемноголетних значений в среднем на 17%. Также значительно отличаются даты формирования максимального

Гидрология
Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

снегозапаса. Так, в 2004 г. они сформировались к первой декаде апреля на равнинных водосборах, и во второй половине месяца – на горном. В 2010 и 2015 гг. даты формирования максимальных снегозапасов приходились на март.

Таблица 2

Величины максимальных снегозапасов и их отклонения от среднемноголетних значений (по данным метеостанций) для водосборов г/п Коса-Коса, г/п Кама-Гайны и г/п Вишера-Рябинино в 2004, 2010 и 2015 гг.
The values of maximum SWE and their deviation from the average annual values (according to weather stations) for the g/s Kosa-Kosa, g/s Kama-Gainy, and g/s Vishera-Ryabinino catchments for 2004, 2010, and 2015

Водосбор	Средний многолетний снегозапас за 1970–2020 гг., мм*	Максимальный снегозапас, мм			Отклонение максимального снегозапаса от среднемноголетних значений, %		
		2004	2010	2015	2004	2010	2015
г/п Коса-Коса	197	195	165	177	–1	–16	–10
г/п Кама-Гайны	193	187	173	184	–3	–10	–5
г/п Вишера-Рябинино	264	289	197	265	9	–25	0

* по данным [13]

*according to [13]

Расчеты продолжительности снеготаяния для исследуемых водосборов представлены в табл. 3. Под продолжительностью снеготаяния понимается период от даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C к положительным значениям до полного схода снежного покрова в бассейне.

Таблица 3

Сроки и продолжительность периода снеготаяния для водосборов г/п Коса-Коса, г/п Кама-Гайны и г/п Вишера-Рябинино в 2004, 2010 и 2015 гг.
Dates and duration of the snowmelt period for the g/s Kosa-Kosa, g/s Kama-Gainy, and g/s Vishera-Ryabinino catchments for 2004, 2010, and 2015

Водосбор	Год	Сроки и продолжительность снеготаяния*
г/п Коса-Коса	2004	<u>28.04–12.05</u> 15
	2010	<u>01.04–24.04</u> 24
	2015	<u>03.04–05.05</u> 33
г/п Кама-Гайны	2004	<u>27.04–17.05</u> 21
	2010	<u>29.03–25.04</u> 27
	2015	<u>31.03–06.05</u> 37
г/п Вишера-Рябинино	2004	<u>29.04–02.06</u> 35
	2010	<u>31.03–18.05</u> 49
	2015	<u>07.04–28.05</u> 51

*В числителе указаны даты начала и конца снеготаяния, в знаменателе – продолжительность в сутках

*The numerator shows the start and end dates of snowmelt, the denominator shows the duration in days

Как видно из табл. 3, сроки начала снеготаяния варьируют значительно меньше, чем сроки его окончания. Это связано с тем, что начало снеготаяния напрямую зависит от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C, которая для рассматриваемых бассейнов различается в среднем на 3 сут. В горных районах, к которым относится водосбор г/п Вишера-Рябинино, при прочих равных условиях наблюдается затяжной характер

Гидрология
Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

снеготаяния из-за одновременного перехода температуры воздуха через 0°C в разных высотных поясах [17], а также сильной расчленённости рельефа. Анализ ЦМР и модельной карты уклонов показал, что крутизна склонов для водосбора г/п Вишера-Рябиново достигает 30°C с увеличением крутизны склоны северной экспозиции становятся более затенёнными, что увеличивает продолжительность таяния снега на них. На отдельных участках водосборов процесс снеготаяния продолжается до конца мая – начала июня.

Четкой зависимости продолжительности снеготаяния от максимальных накопленных снегозапасов выявить не удалось в связи с тем, что определяющим фактором являются погодные условия: ход среднесуточной температуры воздуха и интенсивность нарастания положительных температур воздуха.

Наибольшая продолжительность снеготаяния для всех исследуемых водосборов наблюдалась в 2015 г., которая в среднем составила 41 сут. В 2010 г. процесс снеготаяния начался рано (в последней декаде марта), но был средним по продолжительности – 33 сут. Несмотря на то, что величины максимальных снегозапасов в этот год были ниже среднееголетних значений (табл. 2). Поздним, но недолгим периодом снеготаяния отличался 2004 г., в котором его продолжительность составила в среднем 23 сут.

На продолжительность периода снеготаяния существенное влияние оказывают величина и интенсивность нарастания положительных температур воздуха. В 2004 г. начало снеготаяния наблюдалось в поздние сроки (28.04) (рис. 2, а), сумма накопленных положительных температур воздуха за период снеготаяния (15 сут) составила 156°C , т.е. в среднем $10,4^{\circ}\text{C}$ в сут (рис. 2, б). В этом же году наблюдались наибольшие величины слоя стаявшего за сутки снега (рис. 2, в). Интенсивность их нарастания соответствует сумме накопленных положительных температур воздуха (рис. 2, г). Такое сочетание погодных условий и позднего начала периода снеготаяния обусловило его малую продолжительность в 2004 г.

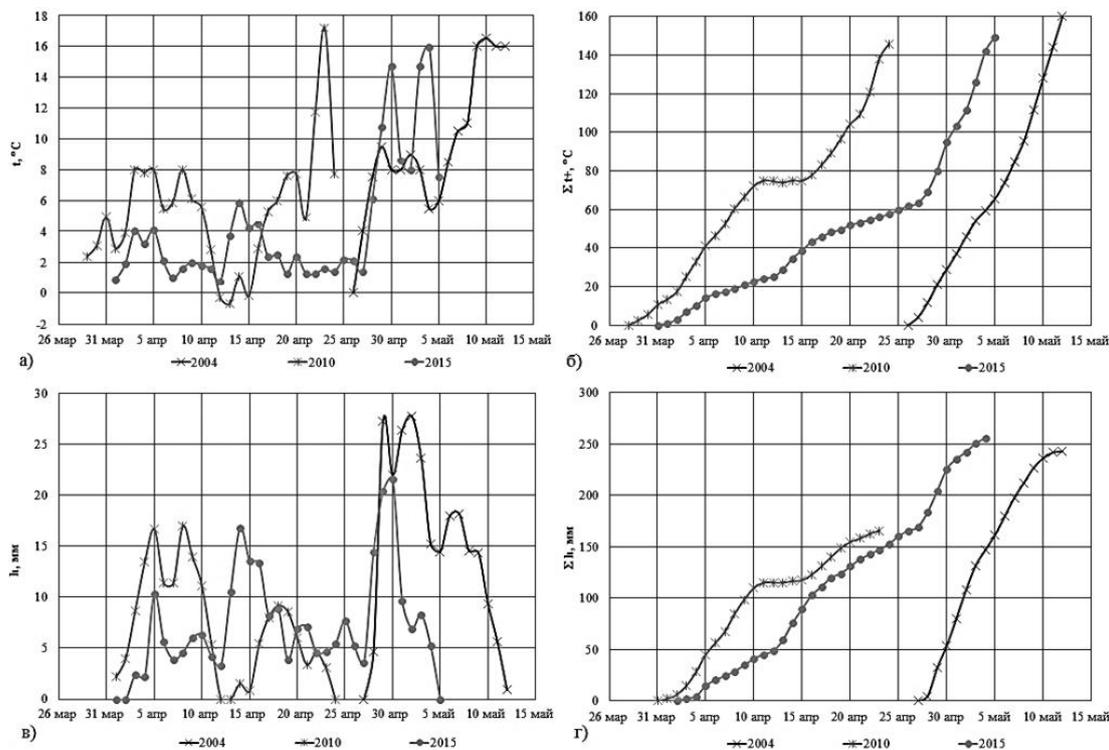


Рис. 2. Ежедневные (а) и накопленные положительные температуры воздуха (б), измеренные на метеостанции Коса, а также ежедневные (в) и накопленные слои стаявшего снега (г), рассчитанные для водосбора г/п Коса-Коса за 2004, 2010 и 2015 гг.

2. Daily (a) and accumulated positive air temperatures (б) measured at the Kosa meteorological station, as well as daily (в) and accumulated layers of melted snow (г) calculated for the g/s Kosa-Kosa catchment for 2004, 2010, and 2015

Гидрология

Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

Для раннего снеготаяния 2010 г. отмечались возвраты холодов (рис. 2, а), когда таяние полностью прекращалось (рис. 2, в). В этот период (12–13 апреля) приrost накопленных положительных температур воздуха не наблюдался (рис. 2, б). За период снеготаяния (24 сут) сумма накопленных положительных температур воздуха составила 137°C, т.е. 5,7°C в сут.

Продолжительное снеготаяние 2015 г. обусловлено медленным нарастанием положительных температур воздуха, связанным с возвратом холодов в весенний период. Среднесуточная температура не переходила через 0°C к отрицательным значениям, но составляла менее 3°C с 06 по 12 и с 17 по 27 апреля (рис. 2, а). Интенсивность прироста накопленных положительных температур воздуха в эти периоды незначительна (рис. 2, б). В соответствии с ходом температуры воздуха изменялась и величина слоя стаявшего за сут снега (рис. 2, в). За 33 сут сумма накопленных положительных температур воздуха составила 147°C, т.е. в среднем 4,5°C в сут, что явилось наименьшим значением за все рассматриваемые годы.

Анализ суточного хода температуры воздуха и слоя стаявшего снега, рассчитанного по методике Пермского ЦГМС и на основе авторской методики (с учетом высоты и экспозиции склонов) показал, что изменение слоя стаявшего снега по модельным данным более точно соответствует ходу температуры воздуха [9; 11].

Таким образом, метеорологические условия, а именно ход среднесуточной температуры воздуха оказывает непосредственное влияние на продолжительность снеготаяния.

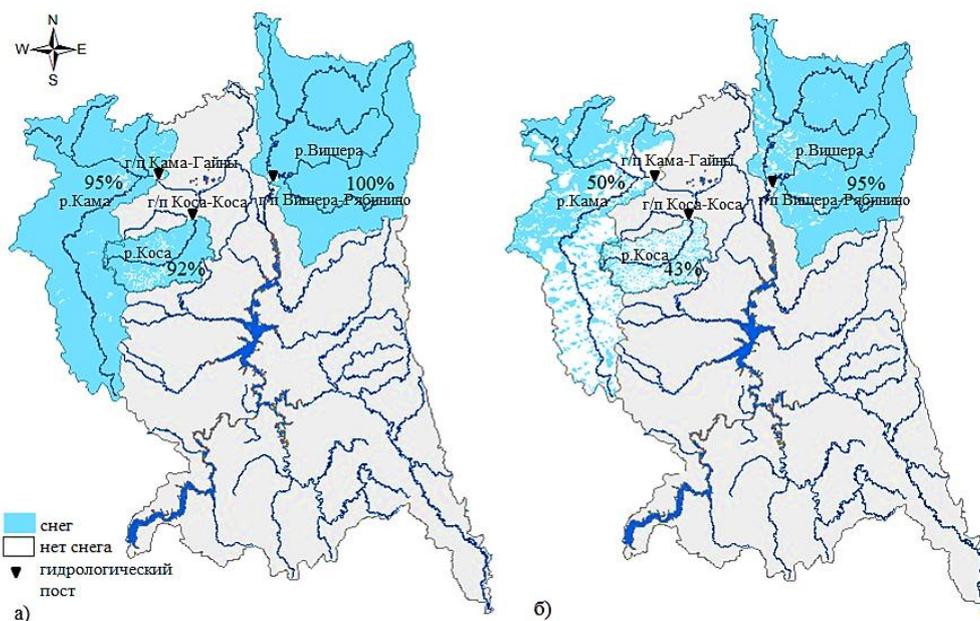


Рис. 3. Пространственное распределение снежного покрова (% площади) на водосборах г/п Коса-Коса, г/п Кама-Гайны и г/п Вишера-Рябинино за весенний период 2015 г.: а – в начале (05.04); б – в конце (30.04) периода снеготаяния

Fig. 3. Spatial distribution of snow cover (% of the area) on the g/s Kosa-Kosa, Kama-Gayny, and Vishera-Ryabinino catchments for the spring period of 2015: а – at the beginning (5 April); б – at the end (30 April) of the snowmelt period

Результаты моделирования пространственно-временной динамики снеготаяния представлены на (рис. 3). Водосбор г/п Вишера-Рябинино лежит севернее равнинных водосборов г/п Коса-Коса и г/п Кама-Гайны. Поэтому на водосборе г/п Вишера-Рябинино отмечаются более поздние сроки начала и затяжное снеготаяние. Помимо широтной зональности для этого водосбора характерно проявление высотной поясности: с увеличением высоты места наблюдается понижение температуры – 0,5–0,7°C на 100 м. Переход температуры воздуха через 0°C к положительным значениям в горных районах происходит на 10–15 дней позже, чем на равнинных, и начало снеготаяния по сравнению с

Гидрология

Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

прилегающими равнинами наступает на 5–10 дней позже [17]. Поэтому в тот период, когда равнинные водосборы активно освобождаются от снежного покрова, на водосборе г/п Вишера-Рябинино снеготаяние только начинается (рис. 3).

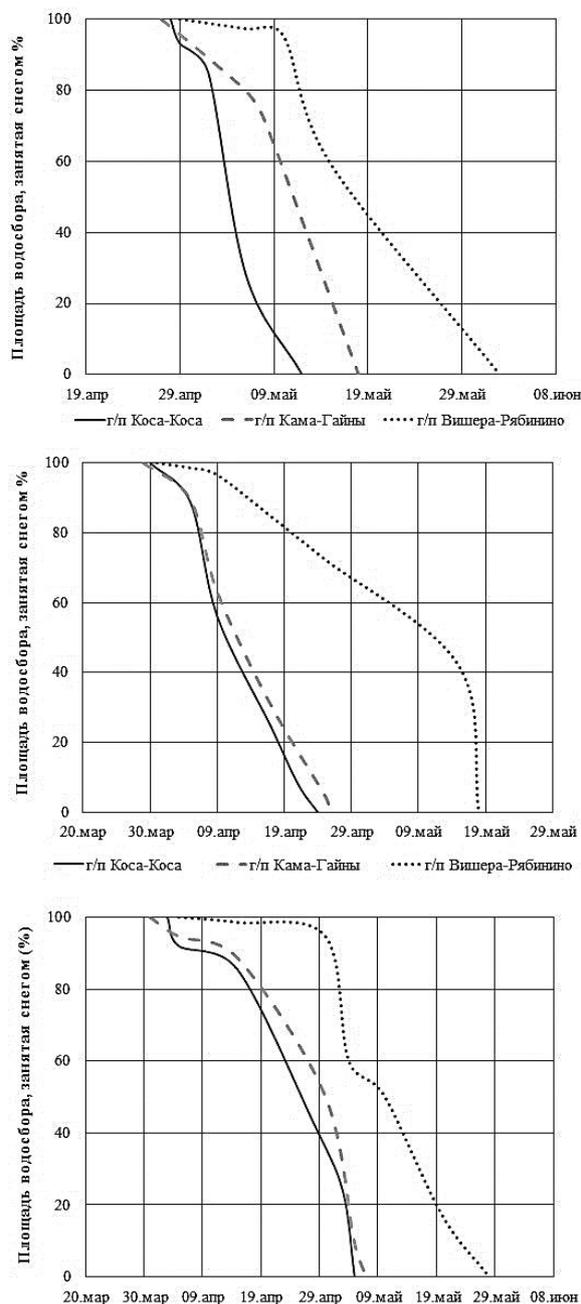


Рис. 4. Изменение площадей водосборов, занятых снегом в период снеготаяния: а – 2004 г.; б – 2010 г.; в – 2015 г.
Fig. 4. Changes in the catchment areas occupied by snow during the snowmelt period:

а – 2004; б – 2010; в – 2015

крайних западной и северной частях водосбора, где линия водораздела проходит соответственно по Верхне-Камской возвышенности и Северным Увалам.

В 2015 г., который отличался продолжительным периодом снеготаяния, на равнинных водосборах таяние снега происходило практически синхронно, а на горном водосборе г/п Вишера-Рябинино – с опозданием на 15–17 сут. Территория последнего в начале периода

пространственного распределения снежного покрова на разных водосборах показал, что скорость таяния снега на открытых участках местности значительно выше по сравнению с залесенными территориями. Это особенно хорошо прослеживается в первую половину периода снеготаяния.

На рис. 4 показано изменение площадей водосборов, занятых снегом в период снеготаяния для исследуемых лет. Водосбор г/п Коса-Коса раньше других освобождается от снежного покрова, что обусловлено его небольшой площадью и слабой расчлененностью. В начале периода снеготаяния, когда снег занимает 80–100% площади, интенсивность освобождения равнинных водосборов (г/п Коса-Коса и Кама-Гайны) от снежного покрова имеет схожий характер (рис. 4). При позднем интенсивном снеготаянии 2004 г. к концу периода снеготаяния (06.05) менее трети водосбора г/п Коса-Коса покрыто снегом. В это же время на водосборах г/п Кама-Гайны и г/п Вишера-Рябинино площадь, занятая снегом, составляет 80 и 97% соответственно. Интенсивное снеготаяние на них в 2004 г. начиналось 8–9 мая.

Проявление широтной зональности наиболее четко прослеживается на меридионально расположенном водосборе г/п Кама-Гайны. В то время как южная половина водосбора практически освобождается от снега, северная его часть почти полностью покрыта снежным покровом. Это особенно заметно при раннем снеготаянии 2010 г. На процессы снеготаяния здесь также влияет высотная поясность, что особенно заметно в

Гидрология

Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

снеготаяния освобождалась от снежного покрова очень медленно – 4% площади за 10 дней, а первыми начали таять открытые равнинные участки на юге и юго-западе (рис. 3). В целом, даты начала интенсивного снеготаяния здесь сдвинуты к более поздним срокам – на 9 дней по сравнению с равнинными водосборами г/п Коса-Коса и г/п Кама-Гайны (рис. 4).

Изменение слоя стаявшего за сут снега происходит в соответствии с ходом среднесуточной температуры воздуха практически в течение всего периода снеготаяния. Следуя проявлению широтной зональности, в начале весеннего периода активнее всего снег стает на открытых участках, расположенных в южных и центральных районах исследуемых водосборов. Снеготаяние на северных залесенных и горных территориях, где проявляется высотная поясность, протекает медленнее, и сток с них поступает продолжительное время.

В 2004 г., когда снеготаяние началось в последней декаде апреля, слои стаявшего за сутки снега в первые дни составляли в среднем 5 мм, однако уже через 3 дня достигли значений в 25–30 мм. Через 7 сут снег на водосборе г/п Коса-Коса занимал только 28% площади (рис. 4). На участках, где снежный покров к этому времени еще сохранился, слои стаявшего за сутки снега достигали 30–35 мм. В этот период (06.05) снег активно таял на северной частях водосбора г/п Кама-Гайны и южной и юго-западной части водосбора г/п Вишера-Рябинино.

В 2010 г. при раннем начале снеготаяния на водосборе г/п Коса-Коса 05.04. происходило активное таяние снежного покрова: при наличии снега на 89% площади (рис. 4) величина слоя стаявшего снега за сутки на его большей территории составляла 25–35 мм и только в северной части – 15–20 мм. В этот же период наибольшие слои стаявшего за сутки снега (до 35 мм) приходились на южную территорию водосбора г/п Кама-Гайны и равнинные южную и юго-западную части водосбора г/п Вишера-Рябинино (до 30 мм). В конце периода снеготаяния (17.04) на некоторых участках равнинных водосборов снежный покров стаял полностью, а на водосборе г/п Вишера-Рябинино процессы снеготаяния только вошли в активную фазу.

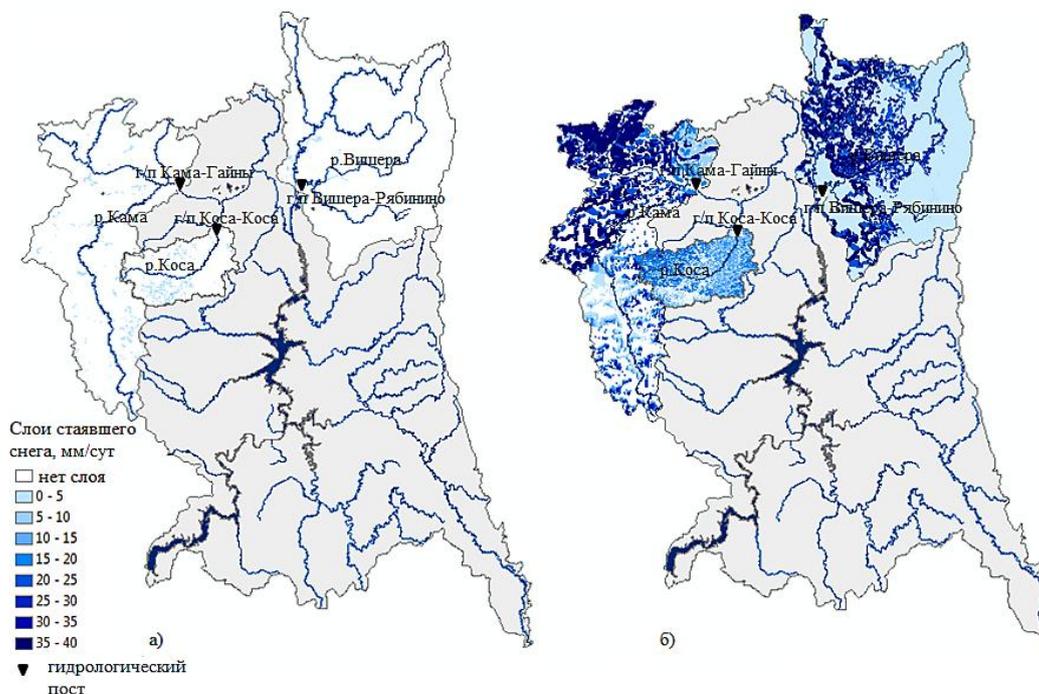


Рис. 5. Пространственное распределение слоя стаявшего снега на водосборах г/п Коса-Коса, г/п Кама-Гайны и г/п Вишера-Рябинино за весенний период 2015 г.: а – в начале (05.04); б – в конце (30.04) периода снеготаяния

Fig. 5. Spatial distribution of the layer of melted snow on the g/s Kosa-Kosa, Kama-Gayny, and Vishera-Ryabinino catchments for the spring period of 2015: а – at the beginning (5 April); б – at the end (30 April) of the snowmelt period

*Гидрология**Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.*

В начале периода снеготаяния 2015 г. (05.04), отличающегося затяжным характером, слой стаявшего снега на отдельных участках не превышали 5 мм (рис. 5), а снег занимал от 92 до 100% площади исследуемых водосборов (рис. 4).

В конце апреля (30.04) снег на исследуемых водосборах еще продолжал стаять, и величина слоя стаявшего за сутки снега достигала 35–40 мм на севере водосбора г/п Кама-Гайны и большей части территории водосбора г/п Вишера-Рябинино (рис. 5). Снеготаяние на водосборе г/п Коса-Коса в этот период подходило к концу, однако величина слоя стаявшего за сутки снега еще составляла 20 мм.

Таким образом, поступление воды на водосбор в процессе снеготаяния подчиняется широтной зональности и высотной поясности, а ее изменение в течение периода снеготаяния и в разных частях водосборов можно отслеживать по модельным растровым картам распределения оставшегося снежного покрова и слоя стаявшего снега.

Выводы

Выполненные исследования способствуют более точным прогнозам величины и продолжительности весеннего половодья. С рассмотренных водосборов приходит более 45% стока в Камское и Воткинское водохранилища, поэтому они играют важную роль в обеспечении региона водными ресурсами.

1. Анализ процессов снеготаяния за годы с разными метеоусловиями и на разных по размеру водосборах рек Верхней Камы показал, что на равнинных водосборах г/п Коса-Коса и г/п Кама-Гайны средняя продолжительность снеготаяния составляет 26 сут, а на горном г/п Вишера-Рябинино – 45 сут.

2. Сроки начала снеготаяния изменяются значительно меньше, чем сроки его окончания и связаны с датой устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C к положительным значениям, которая для рассматриваемых водосборов различается в среднем на 3 сут. Водосбор г/п Коса-Коса раньше других освобождается от снежного покрова, что обусловлено его небольшой площадью и слабой расчлененностью.

3. На меридионально расположенном водосборе г/п Кама-Гайны отчетливо прослеживается проявление широтной зональности: раньше всего от снежного покрова освобождаются южная и центральная части территории водосбора, а позже – северная. На процессы снеготаяния в северной и западной частях водосбора также влияет высотная поясность.

4. Для горного водосбора г/п Вишера-Рябинино характерны более поздние сроки начала и окончания, а также затяжной характер снеготаяния из-за совместного проявления широтной зональности и высотной поясности, а также значительной расчлененности рельефа. Даты начала интенсивного снеготаяния здесь сдвинуты в позднюю сторону в среднем на 9 дней по сравнению с равнинными водосборами.

Список источников

1. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Математическое моделирование в гидрологии: учеб. пособие. М.: Академия, 2010. 304 с.

2. *Володина Е.Е., Бенгтссон Л., Лыкосов В.Н.* Параметризация процессов тепловлагопереноса в снежном покрове для целей моделирования сезонных вариаций гидрологического цикла суши // Метеорология и гидрология. 2000. № 5. С. 16–28.

3. *Георгиевский М.В., Третьякова Г.Д.* Моделирование снеготаяния для малоизученных бассейнов // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению: сб. докл. Межд. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во СПб. гос. ун-та, 2020. С. 54–59.

4. *Гельфан А.Н., Морейдо В.М.* Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России // Лёд и Снег. 2014. Т. 54. № 2. С. 44–52.

Гидрология

Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

5. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010. 328 с.
6. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Айзель Г.В. Моделирование формирования стока рек и снежного покрова на севере Западной Сибири // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 387–395.
7. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2010. 212 с.
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., 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 вв. [Электронный ресурс]: материалы Межд. науч.-практ. оч.-заоч. конф. / под общ. ред. П.С. Лопуха. Минск: Изд-во БГУ, 2021. С. 392–397.
10. 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 [Электронный ресурс]: тр. VIII всерос. науч.-практ. конф. Пермь, 2021. С. 99–105.
11. Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Русаков В.С., Фасахов М.А. Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья // Лед и снег. 2022. 62(1): С. 63–74.
12. Комаров В.Д. О процессах формирования половодья на малой реке и предвычисления его гидрографа // Тр. ЦИП. 1947. Вып. 6(33). С. 3–41.
13. Крючков А.Д. Пространственно-временное распределение характеристик снежного покрова на территории Пермского края: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.30. Пермь, 2021. 223 с.
14. Лебедева Н.Д. Расчет снеготаяния и метод краткосрочного прогноза даты наступления максимального уровня половодья на р. Каме // Тр. ЦИП. М.: Гидрометеиздат, 1959. Вып. 94. С. 15–33.
15. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во РАН, 2018. 300 с.
16. Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы [Электронный ресурс] / Коллектив авторов; под ред. В.Ю. Георгиевского. Ливны, 2015. 238 с.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 1. Кама. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 420 с.
18. Турков Д.В., Сократов В.С. Расчёт характеристик снежного покрова равнинных территорий с использованием модели локального тепловлагообмена SPONSOR и данных реанализа на примере Московской области // Лед и Снег. 2016. 56(3): С. 369–380.
19. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 308 с.
20. Шихов А.Н., Чурюлин Е.В., Абдуллин Р.К. Оценка достоверности расчета запасов воды в снежном покрове с применением данных глобальных моделей прогноза погоды и модели снежного покрова SnowWE (на примере бассейна р. Камы // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. № 66(1).
21. Armstrong R.L., Brun E. Snow and Climate. Cambridge University Press, 2008. 222 p.
22. Motovilov Yu., Gottschalk L., Engeland K. and Belokurov A. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region // Institute Report Series No. 105. Department of Geophysics, University of Oslo, 1999.
23. Pyankov S.V., Kalinin N.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K. and Bykov A.V. Simulation of snow cover formation and melt with publication of the output data on the web map service (on the example of Kama river basin). IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences, 321, 012009, 2019. doi: 10.1088/1755-1315/321/1/012009.

References

1. Vinogradov, Yu.B., Vinogradova, T.A. (2010), *Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii* [Mathematical modeling in hydrology], Moscow, Akademiya.

Гидрология

Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

2. Volodina, E.E., Bengtsson, L., Lykosov, V.N. (2000), Parameterization of heat and moisture transfer processes in snow cover for the purposes of modeling seasonal variations in the land hydrological cycle, *Meteorology and Hydrology*, no. 5, pp. 16–28.
3. Georgievskij, M.V., Tret'yakova, G.D. (2020), Simulation of snowmelt for poorly studied basins, *Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Chetvertye Vinogradovskie chteniya»*, Saint Petersburg, pp. 54–59.
4. Gelfan A.N., Moreido V.M. (2014), Dynamic-stochastic modeling of snow cover formation on the European territory of Russia, *Ice and Snow*, no 54(2), pp. 44–52.
5. Gusev, E.M., Nasonova, O.N. (2010), *Modelirovanie teplo- i vlagoobmena poverhnosti sushi s atmosferoj* [Modeling of heat and moisture exchange of the land surface with the atmosphere]. Moscow, Nauka.
6. Gusev, E.M., Nasonova, O.N., Jogan, L.Ya., Aizel, G.V. (2015), Modeling the formation of river runoff and snow cover in the north of Western Siberia, *Water resources*, no. 42(4), pp. 387–395.
7. Kalinin V.G., P'yankov S.V. (2010), *Primenenie geoinformacionnyh tekhnologij v gidrologicheskikh issledovaniyah* [Application of geoinformation technologies in hydrological research], Perm.
8. Kalinin, V.G., Sumaneeva, K.I., Rusakov, V.S. (2019), Modeling the spatial distribution of snow cover during spring snowmelt, *Meteorology and Hydrology*, no. 2, pp. 74–85.
9. Kalinin, V.G., Shaydulina, A.A., Rusakov, V.S., Fasahov, M.A. (2021), Effects of slope exposition in calculations of snow melting, In: *Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Razvitie geograficheskikh issledovaniy v Belarusi v XX–XXI vekah [Elektronnyj resurs]»*, Minsk, pp. 392–397.
10. Kalinin, V.G., Shaydulina, A.A., Rusakov, V.S., Fasahov, M.A. (2021), On the verification of model calculations of the snow cover spatial distribution during the spring period, *Sbornik dokladov vserossijskoj nauchnoj konferencii «Sovremennye problemy vodohranilishch i ih vodosborov»*, Perm, pp. 99–105.
11. Kalinin, V.G., Shaydulina, A.A., Rusakov, V.S., Fasahov, M.A. (2022), Mathematical and geoinformation modeling of snowmelt process in the river drainage basins of the Kama region, *Ice and Snow*, no. 62(1), pp. 64–74.
12. Komarov, V.D. (1947), On the processes of flood formation on a small river and the pre-calculation of its hydrograph, *Proceedings of Hydrometcentre*, no. 6(33), pp. 3–41.
13. Kryuchkov A.D. (2021), *Prostranstvenno-vremennoe raspredelenie harakteristik snezhnogo pokrova na territorii Permskogo kraja* [Spatio-temporal distribution of snow cover characteristics in the Perm region], Perm.
14. Lebedeva, N.D. (1967), Long-term forecasts of water inflow into the reservoir of the Kamskaya HPP, *Proceedings of Hydrometcentre*, no. 155, pp. 89–102.
15. Motovilov, Yu.G., Gelfan, A.N. (2018), *Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh bassejnov* [Models of runoff formation for the challenges of river basins hydrology], Moscow: Water problem Institute of RAS Press.
16. Scientific and Applied Handbook: Main Hydrological Characteristics of the Rivers of the Kama Basin. Application (2015), [Scientific and Applied Handbook: Main Hydrological Characteristics of the Rivers of the Kama Basin. Prilozhenie], Electronic resource, Livny.
17. *Resursy poverhnostnyh vod SSSR. Srednij Ural i Priural'e. Kama* (1973), [Resources of the surface waters of the USSR. Middle Ural and the Urals. Kama], Leningrad: Gidrometizdat Publ.
18. Turkov, D.V., Sokratov, V.S. (2016), Calculating of snow cover characteristics on a plain territory using the model SPONSOR and data of reanalyses (by the example of Moscow region), *Ice and Snow*, no. 56(3), pp. 369–380.
19. Chebotarev, A.I. (1978), *Gidrologicheskij slovar'* [Hydrological dictionary], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.
20. Shikhov, A.N., Churiulin, E.V., Abdullin, R.K. (2021), Assessment of the accuracy of snow water equivalent calculation with the use of global numerical weather prediction models and SnoWE snowpack model (by the example of the Kama River basin), *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, no. 66(1), pp. 167–188.
21. Armstrong, R.L., Brun, E. (2008), *Snow and Climate*. Cambridge University Press.

Гидрология

Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Фасахов М.А.

22. Motovilov, Yu., Gottschalk, L., Engeland, K. and Belokurov, A. (1999), ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region, Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series.

23. Pyankov, S.V., Kalinin, N.A., Shikhov, A.N., Abdullin, R.K. and Bykov, A.V. (2019), Simulation of snowcover formation and melt with publication of the output data on the web map service (on the example of Kama river basin). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 321, 012009. doi: 10.1088/1755-1315/321/1/012009.

Статья поступила в редакцию: 01.02.22; одобрена после рецензирования: 21.02.2022; принята к опубликованию: 09.03.2022.

The article was submitted: 01 February 2022; approved after review: 21 February 2022; accepted for publication: 9 March 2022.

Информация об авторах

Information about the authors

Аделия Александровна Шайдулина

старший преподаватель кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

Adeliya A. Shaydulina

Senior Lecturer, Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

e-mail: AdelinaSh89@mail.ru

Виталий Германович Калинин

д.г.н., заведующий кафедрой гидрологии и охраны водных ресурсов, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

Vitaliy G. Kalinin

Doctor of Geographical Sciences, Head of the Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

e-mail: vgkalinin@gmail.com

Михаил Александрович Фасахов

магистрант кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов, Пермский государственный национальный исследовательский университет; 614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15

Mikhail A. Fasakhov

Master's Student, Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State University;

15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

e-mail: komrad.fasakhov2017@yandex.ru

Вклад авторов

Шайдулина А.А. – выполнение численных экспериментов, обработка материала, написание отдельных частей статьи, подготовка иллюстраций.

Калинин В.Г. – идея статьи, научное редактирование текста, написание отдельных частей статьи.

Фасахов М.А. – выполнение численных экспериментов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Shaydulina A.A. – numerical experiments; processing of the scientific material; writing individual parts of the article; preparation of illustrations.

Kalinin V.G. – the idea of the article; scientific editing; writing individual parts of the article.

Fasakhov M.A. – numerical experiments.

The authors declare no conflict of interest.