

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДАТ НАИБОЛЬШЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СНЕГОТАЯНИЯ И МАКСИМАЛЬНОГО РАСХОДА ВОДЫ ПОЛОВОДЬЯ В БАССЕЙНЕ Р. ИНЬВА (ПЕРМСКИЙ КРАЙ)

© 2025 г. А. А. Шайдулина^{1,*}, Д. А. Гырдымов¹, М. М. Козлова²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

*e-mail: adelinash89@mail.ru

Поступила в редакцию 03.12.2024 г.

После доработки 28.01.2025 г.

Принята к публикации 18.04.2025 г.

Выполнены расчёты снеготаяния на примере бассейна р. Иньва и моделирование зон затопления селитебных территорий. Рассмотрена межгодовая изменчивость дат формирования наибольшей интенсивности снеготаяния и максимального расхода воды весеннего половодья.

Ключевые слова: снеготаяние, максимальный сток, многолетняя изменчивость стока, ГИС-технологии, зоны затопления

DOI: 10.31857/S2076673425020061, EDN: FPJQCL

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых опасных фаз водного режима большинства равнинных рек Европейской территории России является весеннее половодье, когда за относительно небольшой промежуток времени (1–2 месяца), проходит около 60% объёма годового стока, что может приводить к выходу воды из русла и затоплению обширных территорий. По оценкам Росгидромета (Информационное..., 2024), наводнения на реках занимают первое место по суммарному среднегодовому ущербу среди всех опасных природных явлений (прямые экономические потери от наводнений составляют более 50% общего ущерба). В Пермском крае протекает более 29 тыс. рек (Комлев, Черных, 1984), а в районах, подверженных потенциальному влиянию затоплений, расположено множество населённых пунктов, объектов инфраструктуры и промышленности, а также сельскохозяйственных территорий. Одним из наиболее крупных населённых пунктов Прикамья, регулярно подвергающемся негативному влиянию поверхностных вод в период весеннего половодья, является г. Кудымкар, расположенный на берегах р. Иньвы.

Для анализа стока весеннего половодья важную роль играют процессы снеготаяния. Их величину и интенсивность определяют по методам водного или теплового баланса, а также их различных модификаций, часто реализованных в виде моделей снежного покрова, или включённых в гидрологические модели формирования стока. Наиболее известными зарубежными полураспределёнными моделями формирования стока являются HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) (Bergstrom, 1976; Lindström et al., 1997), SRM (Snowmelt Runoff Model) (Martinec, 1975; Martinec et al., 1994) и GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) (Perrin et al., 2003). Все они описывают процессы формирования и таяния снежного покрова с шагом в одни сутки и позволяют получить на выходе величину расхода. В Российской Федерации широкое применение получили модели формирования стока с распределёнными параметрами, к которым относятся ЕСОМАГ (Motovilov et al., 1999; Мотовилов, Гельфан, 2018) и Гидрограф (Виноградов, 1988; Виноградов, Виноградова, 2010). Помимо расхода воды, они позволяют проследить динамику накопления снежного покрова и его таяния, запас воды и плотность снежного покрова. Для средних и небольших по

размеру водосборов хорошие результаты показывают эмпирические модели. Они позволяют учитывать региональную неоднородность в накоплении и таянии снежного покрова, используя при расчётах метеорологическую информацию и особенности подстилающей поверхности. Примерами такого подхода могут служить модели снежного покрова с распределёнными параметрами SnowE (Казакова, 2015; Чурюлин, 2018), модель снеготаяния для водосбора Камы (Пьянков, Шихов, 2019) и Геоинформационная модель снеготаяния (Калинин и др., 2019, 2021, 2022, 2023), которая применяется в настоящей работе.

Особая важность моделирования процессов формирования максимального стока весеннего половодья обуславливается глобальной изменчивостью климата. Авторами выполнено построение регрессионных моделей с линейным трендом и оценка статистической значимости сумм атмосферных осадков и среднегодовой температуры воздуха за последние 50 лет для четырёх метеостанций (МС Чердынь, Гайны, Пермь, Бисер) Пермского края, равномерно распределённых по его территории. Так, фиксируется увеличение сумм атмосферных осадков и среднегодовой температуры воздуха в среднем на 1.03 мм/год и 0.04 °C/год соответственно.

Несомненно, изменение климатических параметров отражается и на величине речного стока. Так, согласно (Калинин и др., 2023), изменение стока рек водосбора Воткинского водохранилища выражены с 1977 г. При этом, для современного периода (1978–2022 гг.) увеличение среднегодового стока рек, по данным наблюдений на г/п с наиболее продолжительными периодами наблюдений, составляет от 9.88 до 35.0%.

Исследования стока весеннего половодья (Алексеевский, Фролова, 2013) для рек бассейна Камы показывают тенденцию к снижению его доли в годовом стоке в среднем на 10%. Весенний сток левобережных притоков Камы увеличился на 10–20% (Научно-прикладной ..., 2015). Однако для р. Иньвы – правобережного притока Камы, по данным расчётов, так же отмечается увеличение доли весеннего стока в среднем на 16.4%, увеличение среднемноголетнего значения максимального стока и его дисперсии. Последнее выражается в изменении частоты превышения отметки НЯ по данным наблюдений по г/п Иньва–Кудымкар в весенний период: до 1977 г. один раз в 3.5 года; с 1978 г. – один раз в 2 года.

Цель работы – исследование межгодовой изменчивости дат формирования наибольшей

интенсивности снеготаяния и максимального расхода воды половодья в бассейне р. Иньва.

Водосбор р. Иньвы расположен на восточной окраине Русской равнины, представленной приподнятой холмисто-увалистой территорией, на которой выделяется Верхнекамская возвышенность (Назаров, 2006). Средняя высота водосбора составляет 210 м БС, площадь – 2120 км² (Шайдулина, 2023). На р. Иньве располагается два гидрологических поста – г/п Иньва–Кудымкар и г/п Иньва–Слудка с периодом действия 92 и 66 лет соответственно. По характеру водного режима р. Иньва относится к группе рек с весенним половодьем Восточно-Европейского типа (по классификации Б.Д. Зайкова). Начало интенсивного подъёма уровней воды приходится в среднем на вторую декаду апреля. Пик в среднем приходится на третью декаду апреля. Конец половодья приходится на вторую декаду мая. Продолжительность половодья длится примерно 30–45 дней.

На притоке р. Иньвы – р. Куве в г. Кудымкаре в 1853 г. было сооружено ГТС, представляющее собой железобетонную плотину с водосбросом закрытого типа, вследствие чего образовался пруд в пойме р. Кувы. Во время весеннего половодья 1979 г. сооружение было разрушено, и восстановлено лишь в 2011 г. Площадь водоёма при НПУ – 1.41 км², а объём – 2400 тыс. м³, и в настоящий момент не эксплуатируется.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе используется геоинформационная модель снеготаяния (Калинин и др., 2019, 2022, 2023), основанная на методе температурных коэффициентов (Комаров, 1947; Н.Д. Лебедева, 1959) и реализованная средствами ГИС, в комплексе учитывающая пространственно-распределённую метеорологическую информацию и особенности подстилающей поверхности водосбора.

Суточный объём талой воды определяется по выражению (1):

$$A_0 h = 5t A_n P_n + 2t A_l P_l, \quad (1)$$

где h – количество стаявшего снега в пересчёте на воду, мм слоя; A_0 – общая площадь бассейна, км²; A_n, A_l – площади поля и леса, км²; P_n, P_l – покрытость поля и леса снегом (в долях единицы площади); t – среднесуточная положительная температура воздуха, °C.

Покрытость снегом отдельно для поля и леса определяется при помощи графиков обеспеченности снегозапасов, полученных В.Д. Комаровым (1947), и зависит от начальных снегозапасов S (мм) и суммы положительных температур воздуха Σt^+ ($^{\circ}\text{C}$), накопившихся от начала снеготаяния. Принимая, что при увеличении положительной температуры воздуха на 1°C 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 ведётся расчёт модульного коэффициента стаявшего снега, представляющего 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).

Отдельно учитываются осадки, выпадающие в период снеготаяния. При отрицательной среднесуточной температуре воздуха осадки, выпавшие за сутки, полностью относятся к твёрдым и добавляются к снегозапасам. При положительной температуре воздуха выполняется разделение жидкой и твёрдой составляющих осадков. Рассчитывается доля жидких осадков, и их величина добавляется к слою стаявшего снега. При этом в модели не учитываются потери на испарение со снежного покрова.

Для расчёта весеннего снеготаяния разработаны картографическая и атрибутивная базы данных ГИС, а также программный модуль «Расчёт снеготаяния» (Шайдулина, 2023).

Входной метеорологической информацией послужили ежедневные данные наблюдений за температурой воздуха, величиной атмосферных осадков и информация о максимальном снегозапасе (мм слоя воды) и датах его наступления отдельно для полевой и лесной частей водосбора с 8 метеорологических станций (МС) и гидрологических постов (г/п) (см. рис. 1, а).

Важной задачей является пространственное распределение метеорологической информации, определённой в точках метеостанций, по всем растровым ячейкам водосбора. Для этого создаётся векторный слой с точками, соответствующими каждой растровой ячейке цифровой модели рельефа, в атрибутивную базу данных которого добавляется метеорологическая информация с помощью инструмента интерполяции «полигоны Вороного». Такой полигон представляет из себя участок территории, «контролируемый»

метеостанцией. При этом учитывается, что рассматриваемые метеорологические характеристики могут измеряться не на всех пунктах наблюдений. Поэтому полигоны влияния строятся для каждой характеристики отдельно. Подробно данная модель рассмотрена в работе (Шайдулина, 2023).

Для расчётов использованы данные о рельефе по глобальной модели GEBCO_2022 Grid (Gebco..., 2022), приведённые к единой проекции (Pulkovo 1995 GK Zone 10) и разрешению ячейки раstra 250×250 м. Информация о залесённости территории получена с применением маски леса по карте растительности С.А. Барталева с коллегами (Барталев и др., 2016) (см. рис. 1, а–б).

Для верификации расчётов и определения максимального стока собраны ряды максимальных расходов по г/п Иньва–Кудымкар (Государственный водный ..., 1940, 1980, 2002), обработанные с применением методов математической статистики. Моделирование границ затопления территорий г. Кудымкар выполнено в программной среде Agisoft Metashape (Agisoft..., 2024). Входной информацией послужили: результаты съёмки местности (снимки с разрешением 4000×3000 пикс., перекрытием не менее 60% в поперечном и 75% в продольном направлениях), выполненные с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4, оснащённого камерой FC350 и GNSS приёмником; данные наблюдений за уровнями воды и уклонами водной поверхности р. Иньвы.

На начальном этапе моделирования рельефа выполнены обработка и уравнивание снимков, корректировка и удаление недостоверных данных. Построение и классификация плотного облака точек выполнены в полуавтоматическом режиме, с ручной классификацией, что обусловлено необходимостью построения корректной карты высот с точками, относящимися исключительно к классу «земля». Завершающий этап построения цифровой модели рельефа (ЦМР) заключается в построении ортофотоплана на основе карты высот.

Определение площадей затопления, соответствующих заданным уровням воды, реализовано средствами ГИС. Верификация полученных результатов выполнена с помощью автоматической классификации водной поверхности на спутниковых снимках (Sentinel..., 2024) за периоды отсутствия облачности.

Анализ погодных условий весны и максимальных расходов половодья, а также расчёты снеготаяния выполнены для периода 2010–2020 гг.

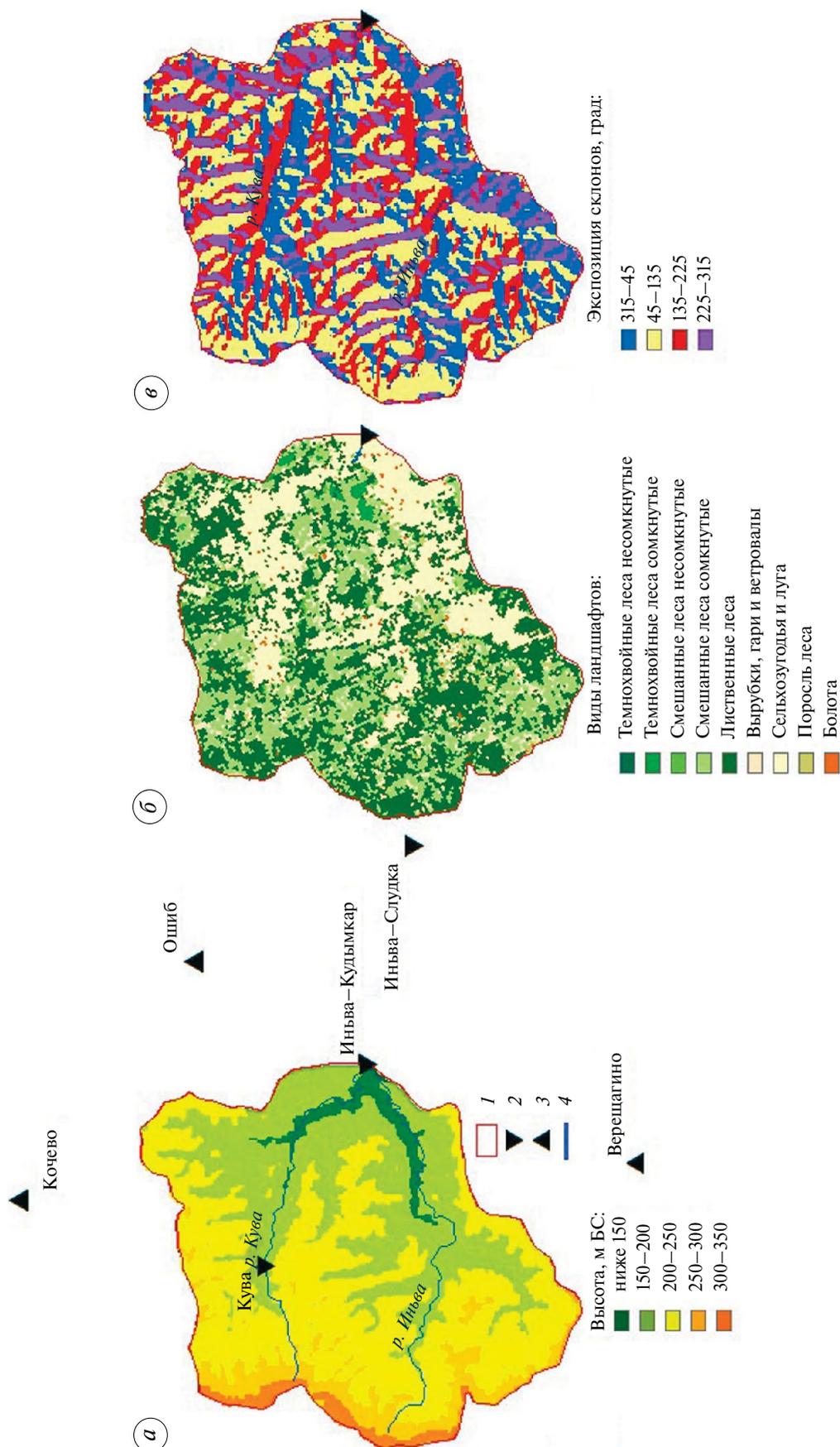


Рис. 1. Волосбор р. Иньва до г/п в г. Кулымкарю Рельеф (а); виды ландшафтов (б); экспозиция склонов (в); 1 — граница водосбора; 2 — гидрологические посты; 3 — метеостанции; 4 — реки

Fig. 1. The catchment area of the Inva River to the gauging station of Kudymkar: relief (а); types of landscapes (б); slope aspect (в); 1 — watershed boundary; 2 — gauging stations; 3 — meteorological stations; 4 — rivers

Величина и динамика зоны весеннего затопления для г. Кудымкара приводятся для многоводного 2017 г., в который наблюдались расходы воды, близкие к 25%-й обеспеченности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетние характеристики климатических условий и погодная обстановка конкретного года определяют ход снеготаяния и весеннего половодья. Характеристику климата на территории можно дать по данным МС Кудымкар. За анализируемый период 2010–2020 гг. средняя температура воздуха весной составляла $+3.6^{\circ}\text{C}$, а величина атмосферных осадков 98.8 мм.

Среднее многолетнее значение снегозапаса в поле и в лесу на МС Кудымкар составляет 346 мм и обычно приходится на конец марта. В последнее десятилетие (2010–2020 гг.) величина снегозапасов была в среднем на 10% больше, чем за период 1970–2020 гг. Сам процесс снеготаяния и прохождение максимумов весеннего половодья приходятся на апрель. Температура воздуха в этот месяц составляет в среднем 2.63°C , а количество осадков – 37.4 мм. Средняя продолжительность снеготаяния составляет 26 дней, начало приходится на первую декаду апреля, а конец – на третью.

Характер прохождения весеннего половодья определяется динамикой поступления слоёв стаявшего снега, а также среднесуточной температурой воздуха и выпадающими атмосферными осадками. Анализ соответствия пиков слоя стаявшего снега и расхода воды позволяет получить бассейновое время добегания (таблица). Так, за 2010–2020 гг. на водосборе г/п Иньва–Кудымкар наблюдались однопиковое (2010, 2017, 2018 гг.), двухпиковое (2011, 2014, 2015, 2019 гг.) и трёхпиковое (2012, 2013, 2020 гг.) формы половодья. Анализ таблицы показал, что амплитуда времени бассейнового добегания составляет 16 сут, а в среднем оно равно 7 сут. При этом быстрое время бассейнового добегания не всегда создаёт условия для формирования неблагоприятных (НЯ) и опасных (ОЯ) явлений.

Выполнен анализ причин межгодовых различий в датах формирования максимальных расходов воды половодья и максимальной среднебассейновой интенсивности снеготаяния. Интенсивность снеготаяния зависит от максимальных запасов воды в снеге на начало снеготаяния и продолжительности таяния, которая, в свою очередь, определяется условиями весеннего

периода. За исследуемый период в восьми годах наблюдалась прямая зависимость максимальных расходов воды половодья и максимальной среднебассейновой интенсивности снеготаяния, т.е. при увеличении/уменьшении одного параметра увеличивался/уменьшался другой. Только в 2013 и 2020 гг. эта закономерность нарушалась. В 2013 г. наблюдалось затяжное снеготаяние, его интенсивность была ниже (6.37 мм/сут) среднемноголетнего значения (7.01 мм/сут). А 2020 г. характеризовался поздним (конец апреля – начало мая), но интенсивным (7.32 мм/сут) снеготаянием (см. таблицу).

В полной мере результаты, полученные с помощью модели таяния снежного покрова, применены для характеристики весеннего периода 2017 г., когда максимальные расходы воды были близки к расходам, при которых наблюдается затопление селитебных территорий. Так, в 2017 г. на г/п Иньва–Кудымкар расходы воды соответствовали 25% обеспеченности, а уровни воды поднимались до отметок в 580 см. Для г. Кудымкара отметка НЯ, при которой вода выходит на пойму и начинается затопление городских территорий, составляет 550 см. Рассмотрим подробнее весеннее половодье 2017 г. (рис. 2).

Снеготаяние в 2017 г. длилось 27 дней: с конца первой декады апреля до конца первой декады мая. Максимальный снегозапас составлял 232 мм, а интенсивность снеготаяния – 8.59 мм/сут (см. таблицу). За этот период наблюдалось 70% пасмурных, 20% ясных, и 10% малооблачных дней. Переход среднесуточных температур воздуха к положительным значениям начался с 5 апреля, что способствовало стаиванию снежного покрова на открытых участках водосбора с 8 апреля, а в лесных массивах – с 14 апреля.

Амплитуда температуры воздуха за период снеготаяния составляла 15.7°C (от 1.7°C до 17.4°C), а сумма атмосферных осадков – 61 мм. Наибольшее количество выпавших осадков пришлось на 25 апреля – 14.0 мм. Половодье было однопиковым: 6 мая на г/п Иньва–Кудымкар был зафиксирован максимальный расход воды $235 \text{ м}^3/\text{с}$. Время бассейнового добегания составило 12 дней, что на 5 дней больше, чем среднее время добегания воды за 2010–2020 гг. (см. рис. 2).

Анализ заснеженности территории показал, что к началу третьей декады апреля снег покрывал 69% территории, а к концу этой декады только 27%, т.е. за день от снега освобождалось более 4% площади. В мае снег стаивал

Таблица. Характеристика условий снеготаяния на водосборе р. Иньва для створа г. Кудымкар за 2010–2020 гг.
Table. Characteristic of snowmelt conditions in the catchment at the Inva–Kudymkar gauging station for 2010–2020

Год	Количество пиков слоя стаявшего снега и расхода воды	Пик слоя h , мм	Пик расхода воды Q , м ³ /с	Время добегания, сут	Условия весеннего периода (март–май)			Интенсивность снеготаяния, мм/сут
					Сумма осадков, мм	Средняя температура воздуха, °С	Максимальный снегозапас, мм	
2010	1	08.04./6.65	26.04./161	18	101	5.38	172	8.19
2011	2	14.04./15.2	18.04./117	4	112	4.32	178	5.93
2012	3	27.04./8.33	01.05./124	4	166	4.80	160	8.00
2013	3	09.04./16.5	12.04./81.3	3	156	2.47	172	6.37
		16.04./15.4	22.04./147	6				
		18.04./9.91	26.04./117	8				
		20.04./21.4	23.04./169	3				
		27.04./4.96	30.04./222	2				
		01.05./1.96	02.05./177	1				
2014	2	20.04./22.9	24.04./178	4	123	4.75	202	8.42
		30.04./16.6	05.05./234	5				
2015	2	24.04./5.68	27.04./91.8	3	76	5.64	156	5.57
		29.04./9.28	04.05./214	5				
2017	1	24.04./12.2	06.05./235	12	102	2.66	232	8.59
2018	1	27.04.6.32	03.05./121	6	111	1.40	133	5.12
2019	2	11.04./19.4	14.04./31.5	3	79	5.19	179	6.63
		22.04./8.07	27.04./112	5				
2020	3	16.04./7.58	20.04./129	4	78	2.92	183	7.32
		28.04./2.23	03.05./109	5				
		04.05./1.61	08.05./120	4				

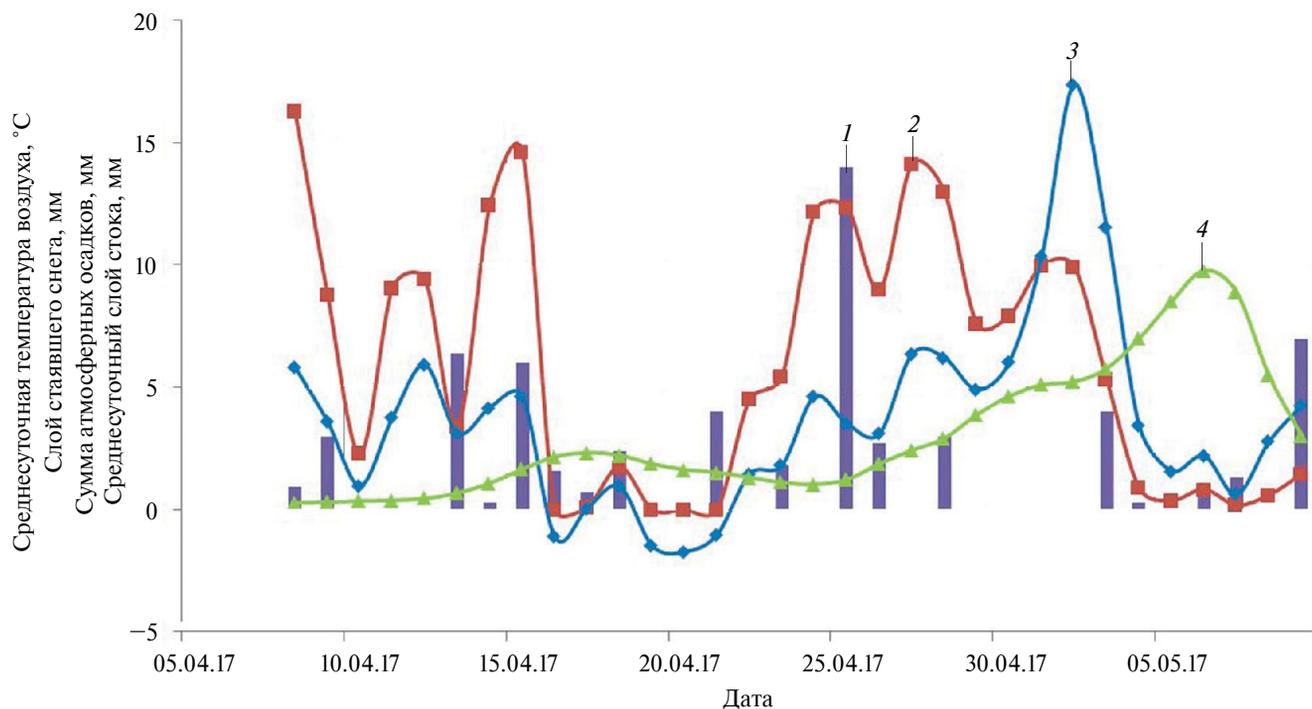


Рис. 2. Временная динамика параметров: 1 – сумма осадков по МС Кудымкар; 2 – среднесуточная температура воздуха; 3 – расчётный слой стаявшего снега; 4 – среднесуточный слой стока по г/п Иньва–Кудымкар

Fig. 2. Temporal dynamics of parameters: 1 – precipitation amount for Kudymkar MS; 2 – mean daily air temperature; 3 – calculated melted snow layer; 4 – average daily flow layer at the Inva–Kudymkar gauging station

в затенённых лесных участках, и за день от снежного покрова освобождалось около 1% площади (рис. 3).

Выполненное сравнение модельных данных по оставшемуся снегозапасу с данными маршрутных снегомерных съёмок показало их хорошее соответствие. Так, в начале и середине периода снеготаяния их отклонение составляло в среднем 17%, а к концу увеличивалось до 50%.

На интенсивность схода снежного покрова оказывает значительное влияние экспозиция склонов (см. рис. 1, в). Для 2017 г. выполнены расчёты стаивания снежного покрова на склонах разной экспозиции (рис. 4). На склоны северной экспозиции приходится 24% территории, южной – 23%, западной – 22% и восточной – 30%. На склонах всех экспозиций, кроме северных, снеготаяние началось 5 апреля, южные склоны освободились от снега к 30 апреля, западные и восточные к 5 мая. С северных склонов снежный покров полностью сошёл к 3 июня.

Для оценки площади распространения негативного влияния талых вод на г. Кудымкар выполнены расчёты максимальной зоны затопления весной 2017 г. (рис. 5 и 6).

Среднемноголетняя дата начала весеннего половодья по г/п Иньва–Кудымкар – 15 апреля, пика расхода воды – 27 апреля. Для 2017 г. дата начала половодья приходится на 8 апреля, а пика – на 6 мая.

Пространственно-временная динамика показала приращение площади затопления территории г. Кудымкара с 8 апреля по 6 мая в среднем на 0.007 км² в сут. Наибольшая интенсивность приращения площади зоны затопления наблюдалась в период со 2 по 6 мая и составляла в среднем 0.52 км²/сут (см. рис. 5). Максимальная площадь затопления в 2017 г. составила 2.0 км² (см. рис. 5–6), при расходах и уровнях воды по г/п Иньва–Кудымкар – 235 м³/с и 580 см (131.73 м БС) соответственно.

Несмотря на то, что зона затопления при прохождении пика расходов воды весеннего половодья 2017 г. составила лишь 6.3% от общей площади города, оказались затоплены 52 домовладения, что подтверждается данными администрации Кудымкарского городского округа (Новости..., 2017). Значительный материальный ущерб обусловлен, главным образом,

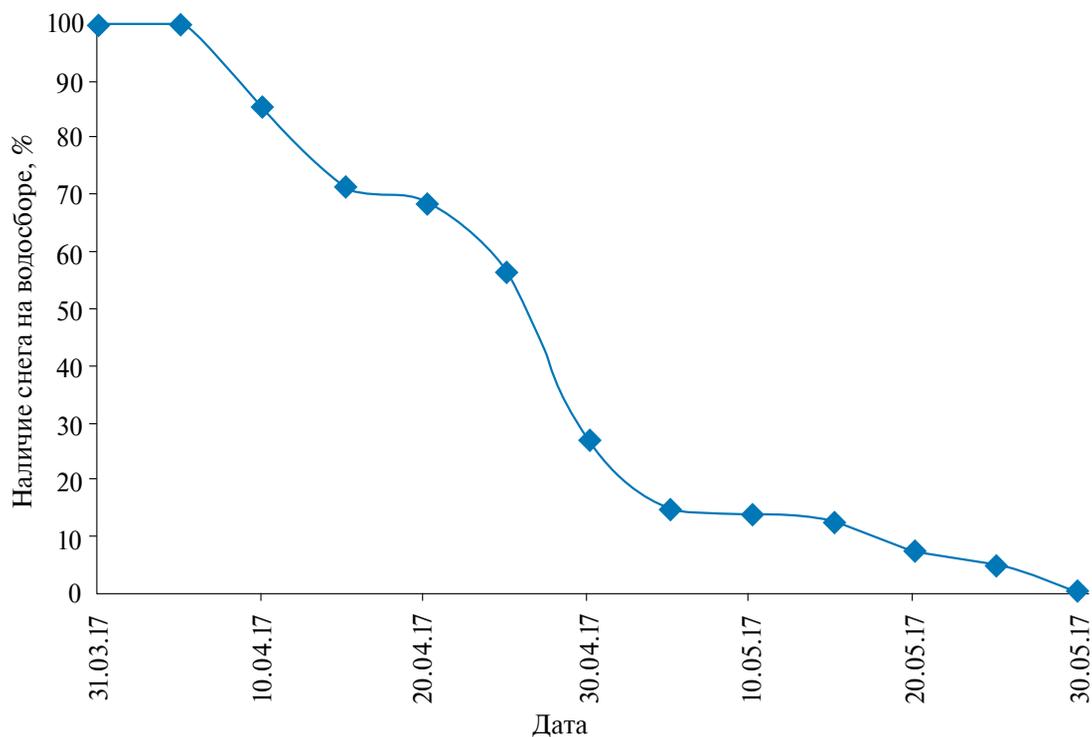


Рис. 3. Временная динамика наличия снега на водосборе, %
 Fig. 3. Temporal dynamics of snow availability in the catchment, %

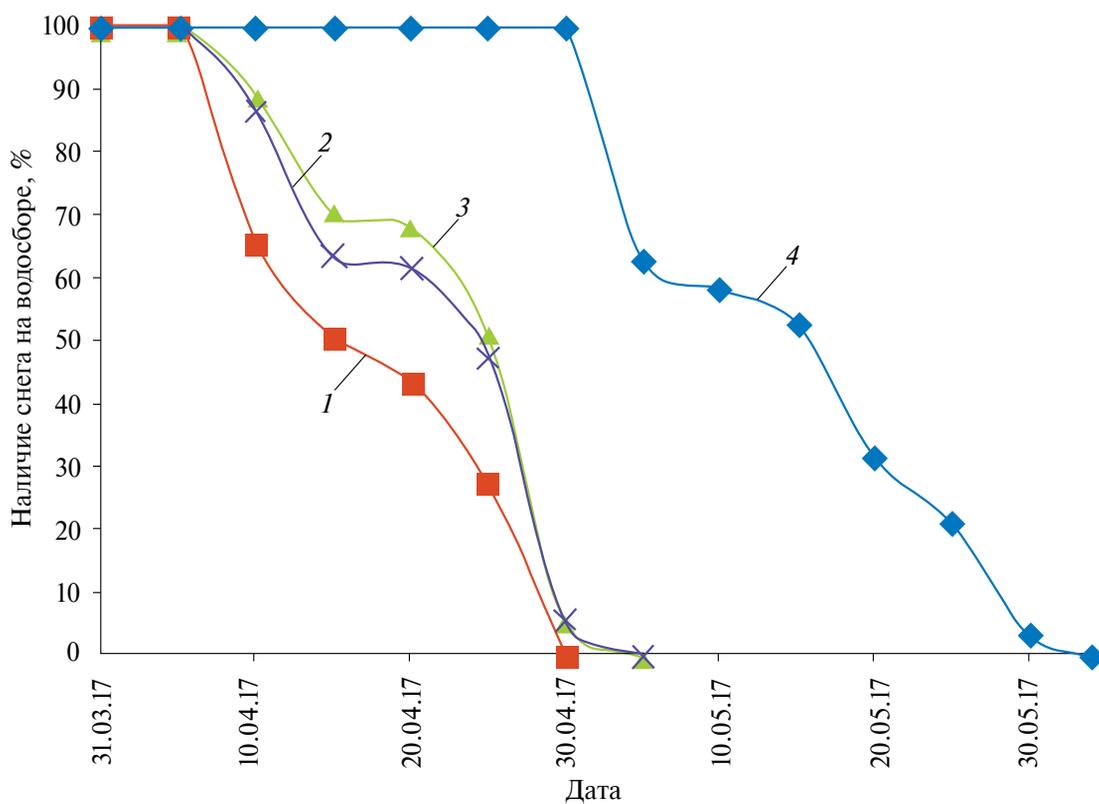


Рис. 4. Таяние снега на различных склонах за 2017 г.: 1 – южный; 2 – западный; 3 – восточный; 4 – северный
 Fig. 4. Snow melt on various slopes for 2017: 1 – south; 2 – west; 3 – east; 4 – north

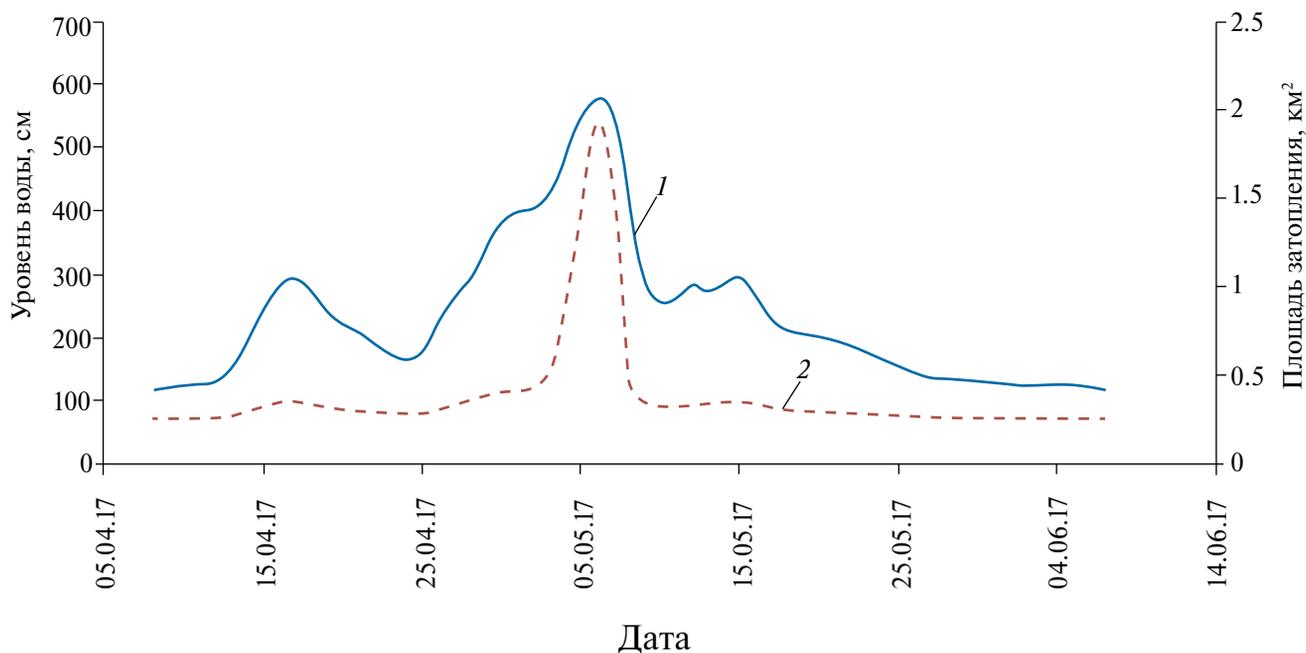


Рис. 5. График хода уровней воды и изменения площади затопления территории г. Кудымкара за период весеннего половодья: 1 – уровень воды по г/п Иньва–Кудымкар; 2 – площадь затопления территории г. Кудымкара

Fig. 5. Water levels and changes in the flooded area of the Kudymkar territory during the spring flood: 1 – water level at the Inva–Kudymkar gauging station; 2 – flooded area of the Kudymkar territory

строительством частных домовладений на пойменных участках р. Иньвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена межгодовая изменчивость дат формирования наибольшей интенсивности снеготаяния, определённых путём геоинформационного моделирования, и максимального расхода воды весеннего половодья за 2010–2020 гг. Подробная оценка прохождения половодья и моделирование зоны затопления г. Кудымкара приведены для 2017 г., когда расходы воды соответствовали 25%-й обеспеченности, а уровни воды поднимались до отметок в 580 см. Можно сделать некоторые выводы.

1. Продолжительность снеготаяния в 2017 г. на водосборе р. Иньвы практически соответствовала средним многолетним характеристикам и составила 27 дней, суммарное значение запасов снега в поле и в лесу по МС Кудымкар составило 454 мм, что на 31% больше среднегоголетнего значения.

2. Снеготаяние на склонах южной, западной и восточной экспозиций началось одновременно – 5 апреля и, в среднем, протекало синхронно. Таяние снега на склонах северной экспози-

ции, занимающих порядка 24% территории водосбора, началось значительно позднее.

3. По данным наблюдений на г/п Иньва–Кудымкар половодье в 2017 г. было однопиковым, при максимальном расходе воды 6 мая – 235 м³/с и времени бассейнового добегаания 12 дней. Сложившиеся факторы снеготаяния 2017 г. привели к затоплению 2.0 км² территории г. Кудымкара, включая 52 домохозяйства. Максимальная интенсивность приращения площади затопления наблюдалась со 2 мая. К этому моменту величина слоя стаявшего снега составила 184 мм (95%).

4. Максимальный уровень воды по г/п Иньва–Кудымкар не превысил отметок ОЯ (610 см), при которых, в соответствии с критериями Росгидромета, происходит подтопление населенных пунктов, хозяйственных объектов, дорог, посевов сельскохозяйственных культур. Однако даже при уровне 580 см в зону затопления попали 52 домовладения в пойме р. Иньвы. В связи с этим можно дать рекомендацию о пересмотре отметки ОЯ для г. Кудымкара в сторону понижения.

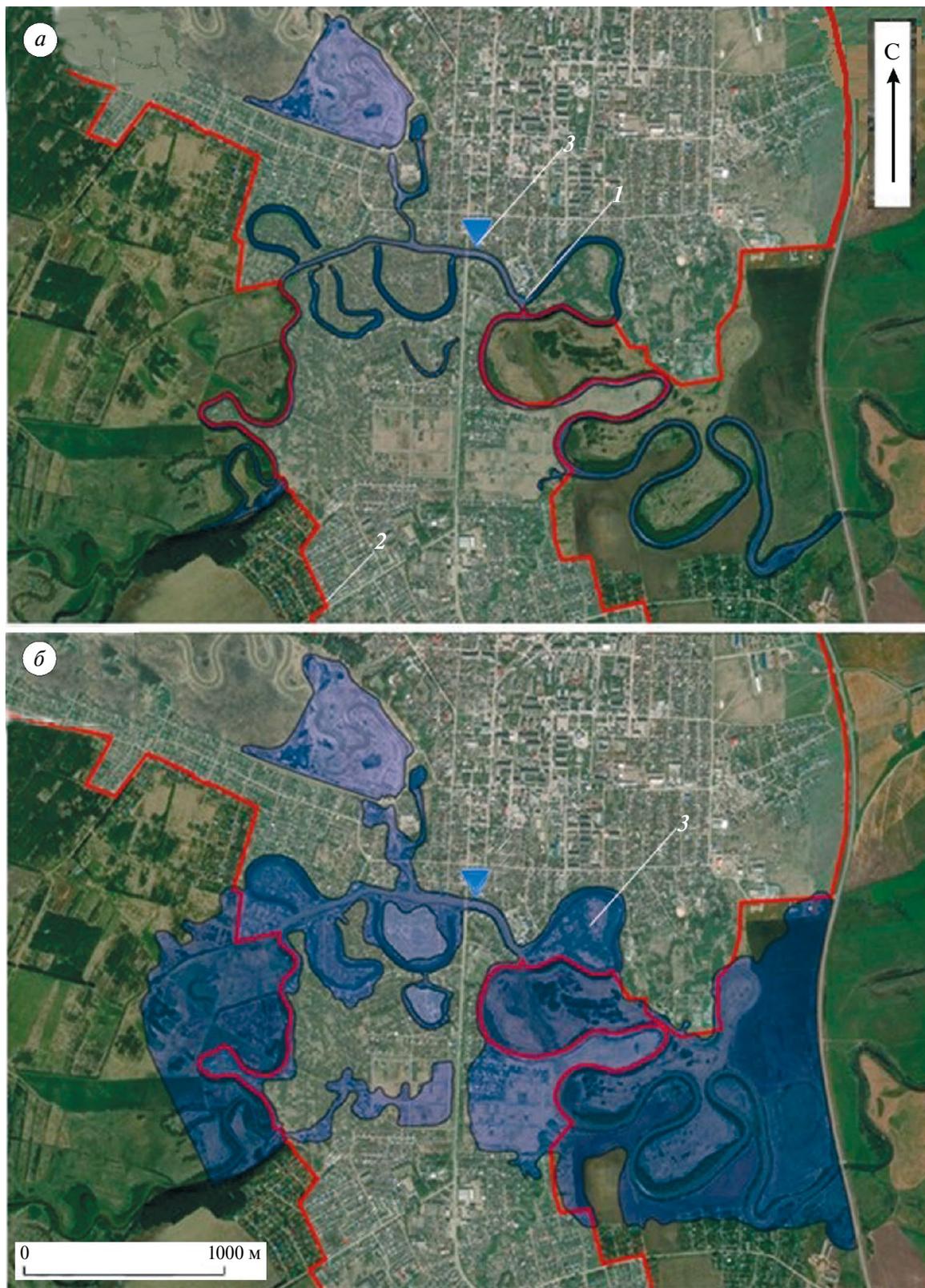


Рис. 6. Зона затопления г. Кудымкар в 2017 г. (2 мая (а); 6 мая (б)): 1 – зона затопления; 2 – граница г. Кудымкар; 3 – г/п Иньва–Кудымкар

Fig. 6. Inundation zone of Kudymkar in 2017 (May 2nd (a); May 6th (b)): 1 – flood zone; 2 – boundary of Kudymkar town; 3 – Inva–Kudymkar gauging station

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Антонова М.М., Игонина М.И.* Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // Вода: химия и экология. 2013. № 4. С. 3–12.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: Ин-т космических исследований РАН, 2016. 208 с.
- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Математическое моделирование в гидрологии: учебное пособие. М.: Академия, 2010. 304 с.
- Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 312 с.
- Гидрологический ежегодник. Бассейн Каспийского моря (без Кавказа и Средней Азии) за 1936–1977 гг. Л.: Гидрометеоздат, 1940–1980. Вып. 5–7. Т. 4.
- Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (Бассейн Каспийского моря без Кавказа и Средней Азии) за 1978–1985 гг. Ч. 1. Свердловск: Уральское территориальное управление по гидрометеорологии и контролю окружающей среды, 1980–1990. Вып. 5–7. Т. 4.
- Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (Бассейн Камы) за 1991–2020 гг. Ч. 1. Екатеринбург: Уральское территориальное управление по гидрометеорологии и контролю окружающей среды, 1991–2020. Вып. 25. Т. 1.
- Информационное агентство ТАСС // Электронный ресурс. URL: <https://tass.ru/spb-news/1302134> (Дата обращения: 19.10.2024).
- Казакова Е.В.* Ежедневная оценка локальных значений и объективный анализ характеристик снежного покрова в рамках системы численного прогноза погоды. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. М.: Гидрометцентр России, 2015. 24 с.
- 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.
- 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.-практич. очно-заочной конф. Минск: Белорусский гос. ун-т, 2021. С. 392–397.
- 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.-практич. конф. Пермь, 2021. С. 99–105.
- Калинин В.Г., Шайдулина А.А.* О верификации расчетов снеготаяния с данными наблюдений на метеорологических станциях // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Тр. IX Всерос. науч.-практич. конф. с междунар. участием. Т. 1. Пермь, 2023. С. 100–104.
- Комаров В.Д.* О процессах формирования половодья на малой реке и предвычисления его гидрографа // Тр. Центрального ин-та прогнозов. Вып. 6 (33). 1947. С. 3–41.
- Комлев А.М., Черных Е.М.* Реки Пермской области. Режим. Ресурсы // Прогнозы и проблемы. 1984. 212 с.
- Лебедева Н.Д.* Расчёт снеготаяния и метод краткосрочного прогноза даты наступления максимального уровня половодья на р. Кама // Тр. Центрального ин-та прогнозов. 1959. Вып. 94. С. 15–33.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Изд-во Ин-та водных проблем РАН, 2018. 300 с.
- Назаров Н.Н.* География Пермского края. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2006. 139 с.
- Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы / Коллектив авторов; под ред. В.Ю. Георгиевского. Ливны, 2015. С. 98–107.
- Новости Кудымкара и Коми округа // Электронный ресурс. URL: <https://parmanews.ru/novost/6465> (Дата обращения: 19.10.2024).
- Пьянков С.В., Шихов А.Н., Михайлюкова П.Г.* Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. Вып. 4. С. 494–508.
- Чурюлин Е.В., Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г.* Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 120–143.
- Шайдулина А.А.* Пространственно-временные закономерности снеготаяния на водосборе Камского водохранилища. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2023. 178 с.

- Agisoft Metashape // Электронный ресурс. URL: <https://www.agisoft.com/> (Дата обращения: 11.11.2024).
- Bergstrom S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian atchments. Norrkoping, Sweden: Univ. Lund. Bull., 1976. 134 p.
- Gebco // Электронный ресурс. URL: <https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data/gebco-2022> (Дата обращения: 10.06.2024).
- Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland L. Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation, Agric. Forest Meteorology. 1999, V. 98–99. P. 257–277.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation // Journal of Hydrology. 2003. V. 279. Is. 1–4. P. 275–289.
- Sentinel Hub EO Browser // Электронный ресурс. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (Дата обращения: 11.11.2024).

Citation: Shaydulina A.A., Gyrdymov D.A., Kozlova M.M. Inter-annual variability of the dates of formation of the highest snowmelt intensity and maximum flood discharge in the Inva River basin (Perm Krai). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (2): 268–281. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425020061

Inter-Annual Variability of the Dates of Formation of the Highest Snowmelt Intensity and Maximum Flood Discharge in the Inva River Basin (Perm Krai)

© 2025 A. A. Shaydulina^{a,#}, D. A. Gyrdymov^a, M. M. Kozlova^b

^aPerm State University, Perm, Russia

^bFar Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

[#]e-mail: adelinash89@mail.ru

Received December 3, 2024; Revised January 28, 2025; Accepted April 18, 2025

The inter-annual variability of the dates of formation of the highest intensity of snowmelt and the maximum spring flood discharge is considered on the example of the Inva River basin for the period 2010–2020. Meteorological and catchment factors have a key influence on the duration of snowmelt, the amount of snow melted per day, water discharge and, accordingly, the levels of water outlets on the floodplain. The applied geo-information model of snowmelt takes into account spatially distributed meteorological information and the characteristics of the floodplain meteorological information and catchment underlying surface features. Model allowed obtaining daily values of the melted snow layer, snowpack and the proportion of remaining snow cover. The basin time which characterizes the period between the peak of the runoff layer and the corresponding peak of water discharge, the peak of the runoff layer and the corresponding peak of water discharge. The results of comparison of snow reserves and frequency of water level exceedance of the adverse event (AE) mark at the gauging station of Inva-Kudymkar for the multi-year period 1970–2020 showed that for the period 2010–2020 the snow reserves were on average 10% higher, and the frequency of exceedance of the AE mark is on average once in 2 years. The application of GIS-technologies allowed visualization of the process of snowmelt and flooding of urban areas. The snowmelt factors of 2017 resulted in flooding of 2.0 km² of the territory of Kudymkar town, including 52 households.

Keywords: snowmelt, maximum runoff, multi-year runoff variability, GIS-technologies, flood zones

REFERENCES

- Alekseevsky N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Assessment of the impact of climate change on the water regime and river flow in the Volga basin. *Voda: himiya i ekologiya*. Water: chemistry and ecology. 2013, 4: 3–12 [In Russian].
- Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Xvostikov S.A., Shabanov N.V. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii*. Satellite

- mapping of the vegetation cover of Russia. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2016: 208 p. [In Russian].
- Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii: uchebnoe posobie*. Moscow: Akademiya, 2010: 304 p. [In Russian].
- Vinogradov Yu.B. *Matematicheskoe modelirovanie processov formirovaniya stoka*. Mathematical modeling of runoff formation processes. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988: 312 p. [In Russian].
- Gidrologicheskij ezhegodnik. *Bassejn Kaspijskogo morya (bez Kavkaza i Srednej Azii) za 1936–1977 gg.* Hydrological yearbook. The Caspian Sea basin (excluding the Caucasus and Central Asia) for 1936–1977. V. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1940–1980: 5–7 (4) [In Russian].
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushy (Bassejn Kaspijskogo morya bez Kavkaza i Srednej Azii) za 1978–1985 gg.* The State Water Cadastre. Annual data on the regime and resources of land surface waters (the Caspian Sea basin excluding the Caucasus and Central Asia) for 1978–1985. V. 1. Sverdlovsk: Ural Regional Department of Hydrometeorology and Counter-Environment, 1980–1990: 5–7 (4) [In Russian].
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. *Ezhegodnye dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushy (Bassejn Kamy) za 1991–2020 gg.* The State Water Cadastre. Annual data on the regime and resources of land surface waters (Kama Basin) for 1991–2020. V. 1. Ekaterinburg: Uralskoe terr. upr. po gidrometeorologii i kontr. okr. Sredy, 1991–2020: 25 (1) [In Russian].
- Kazakova E.V. *Ezhednevnyaya ocenka lokal'nyh znachenij i ob"ektivnyj analiz harakteristik snezhnogo pokrova v ramkah sistemy chislennogo prognoza pogody*. Daily assessment of local values and objective analysis of snow cover characteristics within the framework of the numerical weather forecasting system. PhD thesis. Moscow: Hydrometeoizdat, 2015: 24 [In Russian].
- Kalinin V.G., Sumaneeva K.I., Rusakov V.S. Modeling of the spatial distribution of snow cover during the spring snowmelt. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and hydrology. 2019, 2: 74–85 [In Russian].
- Kalinin V.G., Shajdulina A.A., Rusakov V.S., Fasaxov M.A. On the issue of accounting for the impact of slope exposure in snowmelt calculations. *Razvitie geograficheskikh issledovanij v Belarusi v XX–XXI vekah*. The development of geographical research in Belarus in the XX–XXI centuries. Minsk: Belarusian State University, 2021: 392–397 [In Russian].
- Kalinin V.G., Shajdulina A.A., Rusakov V.S., Fasaxov M.A. On the verification of model calculations of the spatial distribution of snow cover during the snowmelt period. *Sovremennye problemy vodohranilishch i ih vodosborov*. Modern problems of reservoirs and their catchments. Perm, 2021: 99–105 [In Russian].
- Kalinin V.G., Shajdulina A.A. On verification of snowmelt calculations with observation data at meteorological stations. *Sovremennye problemy vodohranilishch i ih vodosborov*. Modern problems of reservoirs and their catchments. Perm, 2023, 1: 100–104 [In Russian].
- Komarov V.D. On the processes of flood formation on the small river and the precomputation of its hydrograph. *Trudy Central'nogo instituta prognozov*. Proc. of the Central Institute of Forecasts. 1947, 6 (33): 3–41 [In Russian].
- Komlev A.M., Chernykh E.M. Rivers of the Perm region. Mode. Resources. *Prognozy i Problemy*. Forecasts and Challenges. 1984: 212 p. [In Russian].
- Lebedeva N.D. Calculation of snowmelt and method of short-term forecasting of the date of the maximum flood level on the Kama River. *Trudy Central'nogo instituta prognozov*. Proc. of the Central Institute of Forecasts. 1959: 15–33. [In Russian].
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachah gidrologii rechnyh bassejnov*. Models of flow formation in the tasks of hydrology of river basins. Moscow: Publishing House of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, 2018: 300 p. [In Russian].
- Nazarov N.N. *Geografiya Permskogo kraja*. Geography of the Perm Region. Perm: Perm University Press, 2006: 139 p. [In Russian].
- Nauchno-prikladnoj spravochnik: Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki rek bassejna Kamy*. Scientific and applied reference book: The main hydrological characteristics of the rivers of the Kama basin. Livny, 2015: 98–107 [In Russian].
- Parma and Komi News. Retrieved from: URL: <https://parmanews.ru/novost/6465> (Last access: October 19, 2024)
- Pyankov S.V., Shixov A.N., Mixajlyukova P.G. Modeling of snow accumulation and snowmelt in the Kama River basin using data from global weather forecast models. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2019, 59 (4): 494–508 [In Russian].
- Churyulin E.V., Kopejkin V.V., Rozinkina I.A., Frolova N.L., Churyulina A.G. Analysis of snow cover characteristics based on satellite and model data for various watersheds in the European territory of the Russian Federation. *Hydrometeorological studies and forecasts*. Hydrometeorological studies and forecasts. 2018, 2 (368): 120–143 [In Russian].
- Sentinel Hub EO Browser. Retrieved from: URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (Last access: November 11, 2024).
- Shajdulina A.A. *Prostranstvenno-vremennye zakonomernosti snegotayaniya na vodosbore Kamskogo vodohranilishcha*. Spatial and temporal patterns of snowmelt in the catchment area of the Kama reservoir. PhD thesis.

- Moscow: Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 2023: 178 p. [In Russian].
- TASS News Agency: official website. Retrieved from: URL: <https://tass.ru/spb-news/1302134> (Last access: October 19, 2024).
- Agisoft Metashape. Retrieved from: URL: <https://www.agisoft.com/> (Last access: November 11, 2024).
- Bergstrom S.* Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian atchments. Norrkoping, Sweden: Univ. Lund. Bull., 1976: 134 p.
- Gebco: official site. Retrieved from: URL: <https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data/gebco-2022> (Last access: June 10, 2024).
- Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland L. and Rodhe A.* Validation of a distributed hydrological model against spatial observation. Agriculture. Forestry. Meteorology. 1999, 98–99: 257–277.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V.* Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology. 2003, 279 (1–4): 275–289.