

7. Р 52.08.70-2009. Рекомендации. Вертушки гидрометрические речные. Методы поверки в установке компараторной для поверки гидрометрических вертушек.

8. РД 52.08.12-97. Методические указания. Вертушки гидрометрические речные типа ГР-21М, ГР-55, ГР-99. Методика поверки в прямолинейном градуировочном бассейне.

9. РЭ УКПГВ.416.441.001. Установка компараторная для поверки гидрометрических вертушек: руководство по эксплуатации.

D.E. Klimenko

ON THE QUESTION OF THE UNITY OF CALIBRATION METHODS OF HYDROMETRIC CURRENT METERS AT LOW SPEEDS

Measurement of low flow rates is an important task, taking into account the minimum river flows. Hydromet Modernization of observation network and change in the grading method of gauging turntables caused some controversial issues regarding the quality and comparability of the results of verification procedures. Mass introduction of instruments tested with the new method can lead to inhomogeneities of long-term series of characteristics of the minimum flow. The author shows the results of experimental tests of the hydrometric vane in different поверительных devices and comparative analysis of the experiments and presents the causes of inflated readings at low speeds.

К е у в о р д с : hydrometric vane; individual transfer function (FPI); small flow rate of liquids; calibration curve.

Dmitriy E. Klimenko, Candidate of Geography, Associate Professor of Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State National Research University; 15 Bukireva, Perm, Russia, 614990; klimenkodi@rambler.ru

УДК 551.48

Д.Г. Сазонова, А.Б. Китаев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ «ГИДРОГРАФ ГГИ-2001» ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРИТОКА ВОДЫ В КАМСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Рассмотрена возможность применения математической модели «Гидрограф ГГИ-2001» для оценки притока воды в Камское водохранилище. Дано физико-географическое описание района исследования, представлена схематизация бассейнов, дано описание основных параметров модели, подготовки входной и проверочной информации, представлены результаты моделирования притока воды в Камское водохранилище, дана оценка применимости модели.

К л ю ч е в ы е с л о в а : водохранилище; приток воды; модель.

В настоящее время, в связи с развитием техники, увеличением потребностей производственной деятельности человека, наука нуждается в усложнении методологической базы исследований. Это

© Сазонова Д.Г., Китаев А.Б., 2013

Сазонова Дарья Григорьевна, магистр кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета; 614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15; hydrology@psu.ru

Китаев Александр Борисович, кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета; 614990 Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15; hydrology@psu.ru

возможно не только благодаря привлечению принципиально новых методов исследования, но и рациональному, комплексному использованию существующих.

Каждый объект исследования представляет собой сложную систему, для изучения которой требуется индивидуальный подход к подбору методов, позволяющих получить объективные, наиболее точные и детальные сведения о предмете изучения.

В основе дальнейшего развития методов описания гидрологических явлений, расчетов и прогнозов стока лежат математическое моделирование и системная методология. Однако следует помнить, что основу математического моделирования всегда должно составлять глубокое понимание природы самого объекта или явления.

В связи с этим создание универсальной детерминированной распределенной моделирующей системы для описания состояния речного бассейна и его пространственно-временной динамики, а также накопление в базах данных информации о водосборах и ее систематизация приобретают особую актуальность. Такого рода моделирующая система была создана Ю.Б.Виноградовым в Государственном гидрологическом институте и называется «Гидрограф ГГИ-2001» [1;2;3].

Проблемы моделирования и прогноза стока имеют важное прикладное значение для решения ряда задач, связанных с долгосрочными и краткосрочными прогнозами стока, исследованиями влияния изменений климата, ландшафтов или экологической ситуации на состояние бассейнов; обеспечением безопасности, оптимального функционирования гидротехнических сооружений, установлением сроков навигации, а также с устойчивым энергообеспечением населения и объектов экономики.

Целью настоящей работы является оценка на основе системной методологии возможности применения метода математического моделирования (ММ) в водно-балансовых и гидродинамических исследованиях водохранилищ.

В качестве объекта исследования было выбрано Камское водохранилище, с его основными притоками: Иньва, Косьва, Обва, Чусовая, Сылва. Основной задачей стало моделирование процессов формирования стока в бассейне водохранилища, расчет распределенного бокового притока и уточнение элементов водного баланса по длине водохранилища. В условиях ограниченности данных наблюдений такие исследования представляются возможными, прежде всего, на основе методов и средств математического моделирования.

Актуальность выбранной темы обоснована возрастающим интересом к вопросам гидродинамики, гидрохимии и экологического состояния водохранилищ, требующим решения воднобалансовых уравнений за суточный интервал времени.

Таким образом, в работе возникла необходимость решения следующих задач:

- 1) системное представление процесса ММ;
- 2) освоение работы с СМ «Гидрограф ГГИ-2001»;
- 3) моделирование притока воды в водохранилище;
- 4) анализ полученных результатов;
- 5) оценка возможностей применения результатов моделирования для изучения водного баланса водохранилищ.

В работе использовались системный подход и методы математического моделирования формирования стока. Для расчетов гидрографов стока рек применялась универсальная детерминированная распределенная модель формирования стока «Гидрограф». Для создания информационной базы, обобщения и систематизации параметров модели использовались методы геоинформационного картографирования. Исходными материалами для исследования послужили суточные данные гидрологических ежегодников и метеорологических ежемесячников. В процессе разработки и адаптации метода привлечены данные из агроклиматических справочников. При картографировании параметров модели применялись цифровая модель рельефа, топографические, ландшафтные и почвенные карты.

Физико-географическое описание района исследования

Физико-географическое описание моделируемых бассейнов во многом определяет качество результатов моделирования. В задаче оценки и корректировки параметров модели оно является одним из важнейших источников информации и понимания того, как происходит формирование стока в данных конкретных условиях. В работе основным источником о климатических, ландшафтных и других условиях района исследования стали Ресурсы поверхностных вод СССР [5].

Моделирование стока воды проводилось в створах рек Иньва (п. Слудка), Косьва (п. Останино), Обва (п. Рождественское), Чусовая (п. Лямино), Чусовая (п. Староуткинск), Сылва (п. Подкаменное),

Лолог (п. Сергеевский), Кама (п. Волосницкое), Кама (п. Тюлькино) за 1971–1996 гг. Информация о расчетных бассейнах представлена в табл. 1.

Бассейн р. Камы расположен на западном склоне Уральских гор и на Русской равнине. Большая его часть находится в лесной природной зоне, и лишь часть бассейнов левобережных притоков нижней половины реки – в зоне лесостепи.

Реки бассейна Камы резко подразделяются на две основные группы: горные и равнинные. К первой относятся левобережные притоки среднего течения р. Камы – реки Вишера с Колвой, Яйва, Косьва, Чусовая с Сылвой и др. Они меандрируют по дну реликтовых древних долин, приуроченных к днищам межгорных депрессий. Одной из особенностей западного склона Урала является наличие продольных участков долин наряду с поперечными, по которым реки перерезают хребты. Остальные притоки, текущие по Восточно-Европейской равнине, как и сама р. Кама, представляют собой типично равнинные водотоки, протекающие среди легко размываемых рыхлых пород, в широких аллювиальных долинах с обширными поймами, изобилующими старицами, озерами и болотами. У этих рек – извилистые русла, небольшие уклоны, спокойное течение.

Таблица 1

Сведения об объектах моделирования

<i>River</i>	<i>Name</i>	<i>ID</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>Area</i>
Кама	Волосницкое	76003	59,63	52,58	9750
Кама	Тюлькино	76011	59,83	56,52	81800
Камское водохранилище	КамГЭС	76023	58,116	56,333	168000
Лолог	Сергеевский	76076	60,02	54,32	1600
Иньва	Слудка	76141	58,98	55,55	5210
Косьва	Останино	76156	58,72	56,77	6220
Обва	Рождественское	76160	58,52	55,25	5540
Чусовая	Староуткинск	76176	57,23	59,35	5450
Чусовая	Лямино	76190	58,3	57,72	21500
Сылва	Подкаменное	76240	57,52	56,92	19700

Положение бассейна в центре материка Евразии определяет резко континентальный его климат, выражающийся в больших колебаниях температуры воздуха как внутри года, так и в течение суток. Наряду с этим велико влияние на климат региона морских воздушных масс, несущих влагу с Атлантического океана.

Бассейн Камы расположен почти целиком в пределах зоны избыточного увлажнения, характеризующейся среднемноголетним модулем стока $7,4$ л/с·км². Он имеет хорошо развитую сеть рек ($73,7$ тыс.), густота которой равна $0,49$ км/км², причем некоторые из рек очень крупные (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика крупных притоков реки Камы

<i>Река</i>	<i>Расстояние от устья р. Камы, км</i>	<i>Длина реки, км</i>	<i>Среднее падение реки, см/км</i>	<i>Площадь водосбора, км²</i>	<i>Показатель лесистости, %</i>
Весляна	1410	266	30	7490	84
Коса	1325	267	40	10300	80
Вишера	1174	415	50	31200	87
Иньва	1022	257	30	5920	61
Косьва	1011	283	180	6300	92
Обва	990	247	70	7390	52
Чусовая	908	592	50	23300	89
Белая	374	1475	–	142730	–
Ик	306	571	50	18100	15
Вятка	201	1314	–	129000	–

Источники питания р. Камы по ее длине изменяются незначительно. Доля снегового питания в годовом стоке от верховья к устью увеличивается от 56 до 60%, дождевых вод уменьшается с 20

до 10%, а доля грунтовых вод увеличивается с 24 до 30%. Основная часть стока (72%) приходится на весеннее половодье.

Зимой территория Прикамья находится под преимущественным влиянием сибирского антициклона, обуславливающего повсюду устойчивую морозную погоду. Наблюдаются частые вторжения холодных воздушных масс с севера, а также прорывы южных циклонов, с которыми связаны резкие изменения погоды. Более многоснежные зимы наблюдаются в Предуралье, малоснежные – в юго-западной части региона.

Летом территория находится в основном в области низкого давления. Нередко происходят вторжения воздушных масс с Баренцева и Карского морей, а также с Азорских островов. В последнем случае на юге бассейна наблюдается жаркая и даже засушливая погода.

Переход от теплого сезона к холодному происходит сравнительно медленно: на севере региона в первой половине, а на юге во второй половине октября среднесуточная температура воздуха переходит через 0°. Вскоре после этого на реках появляются первые ледовые образования – забереги, сало и шуга. На реках со спокойным течением забереги, постепенно увеличиваясь в размерах, образуют сплошной ледостав. Общая продолжительность периода замерзания обычно составляет 10–15 дней, в верховьях – до 25 дней. В период установления ледостава (чаще на северных и горных реках) образуются зажоры. Они возникают на участках ниже полыней, в местах перелома продольного профиля и в извилинах русла. В результате зажоров уровень воды на средних реках редко поднимается выше 100 см. Длительность зажорных явлений составляет 15–20 дней, иногда до 50 дней. Устойчивая морозная погода и небольшая высота снежного покрова обуславливают интенсивное нарастание толщины льда в начальный период (8–10 см в декаду). К концу зимы (в марте) толщина льда достигает 55–75 см, а в суровые зимы – 100 см и более. Промерзание до дна с образованием обширных наледей наблюдается только на малых реках.

Вскрытие рек происходит обычно в течение 15–20 дней: во второй декаде апреля в южной и в конце апреля – начале мая – в северной части бассейна. Оно весьма часто сопровождается заторами льда, которые образуются в первые дни ледохода, в начале подъема весеннего половодья, а в отдельные годы совпадают по времени с максимумом половодья. Заторы формируются, как правило, на участках, изобилующих крутыми поворотами, островами, осередками, в местах сужений русла.

Продолжительность весеннего половодья, как правило, увеличивается вниз по течению от 30–50 суток на малых реках лесостепной зоны до 100–150 суток в низовьях Камы. Подъем уровней в половодье обычно составляет 5–6 м, достигая в отдельные годы 11 м на р. Белой.

Осадки в бассейне выпадают неравномерно. Большая их часть, 60–70% от годовой суммы, выпадает в теплый период года. Годовое количество осадков в регионе значительно: от 800–900 мм в северной предгорной части до 500–600 мм на равнинной территории.

Для исходных данных о величине осадков, температуре и влажности воздуха использовались наиболее репрезентативные метеостанции (табл. 3).

Таблица 3

Сведения об используемых метеостанциях

<i>Название станции</i>	<i>Номер</i>	<i>Широта, град.</i>	<i>Долгота, град.</i>	<i>Высота, м</i>
Чердынь	23914	60,4	56,52	206
Гайны	23909	60,28	54,3	198
Соликамск	28026	59,65	56,8	180
Березники	28028	59,38	56,6	178
Кудымкар	28116	58,98	54,65	150
Чермоз	28128	58,82	56,23	123
Бисер	28138	58,52	58,85	464
Лысьва	28234	58,12	57,78	226
Верещагино	28216	58,08	54,68	228
Пермь	28225	58,02	56,3	172
Кын	28238	57,83	58,65	176
Оханск	28321	57,72	55,38	121
Кунгур	28326	57,42	56,93	140

Окончание табл. 3

Название станции	Номер	Широта, град.	Долгота, град.	Высота, м
Чернушка	28428	56,5	56,13	142
Нижний Тагил	28240	57,88	60,07	258
Шамары	28334	57,35	58,22	244
Свердловск	28445	56,8	60,63	237
Верхний Уфалей	28541	56,05	60,233	399
Кирс	28009	59,33	52,23	167
Глазов	28214	58,13	52,58	169
Дебессы	28312	57,63	53,82	189
Аскино	28522	56,08	56,58	168
Нязепетровск	28533	56,05	59,58	320
Ивдель	23921	60,68	60,43	101

Схематизация бассейнов

В модели «Гидрограф» используется гексагональная сетка, обладающая тем свойством, что каждая точка удалена от шести соседних на одинаковые расстояния. Точки, равномерно покрывающие площадь бассейна и отстающие друг от друга на одинаковое расстояние, называются репрезентативными или РТ. Каждой РТ соответствует определенная, своего рода «подкомандная», площадь шестиугольной формы (рис. 1).

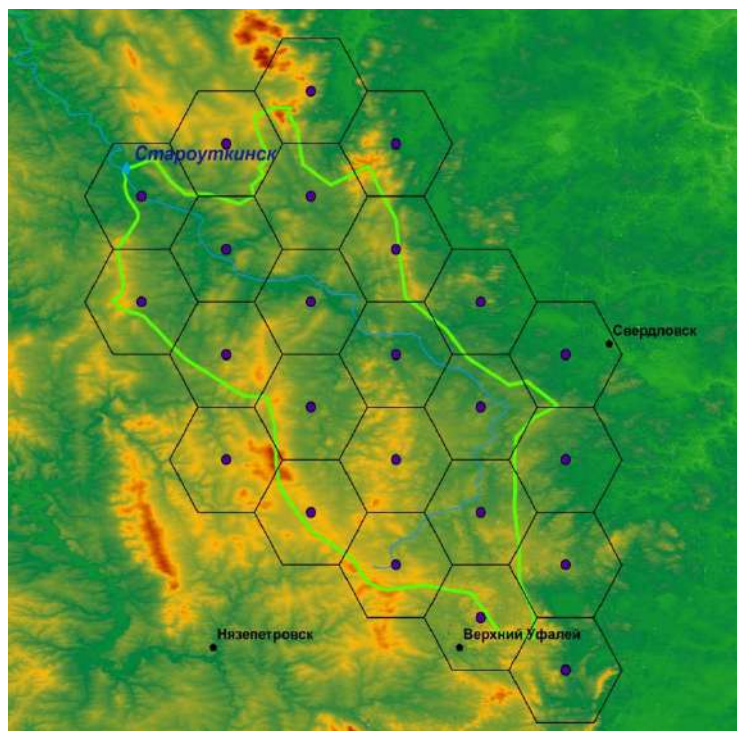


Рис. 1. Назначение РТ в бассейне р. Чусовой (п. Староуткинск)

Количество РТ $N_{РТ}$ есть функция площади бассейна $F_{бас.}$, его орографии, а также густоты и равномерности расположения сети метеорологических пунктов наблюдений. В среднем количество РТ в зависимости от величины площади водосбора определяется выражением

$$N_{РТ} = \kappa_{10} F^{0,2}, \quad (1)$$

где κ – коэффициент, зависящий от сложности бассейна и наличия имеющейся информации ($\kappa=1\div 2$).

Каждой РТ соответствует подкомандная единичная площадь $F_{ед.}$ размером

$$F_{e0} = \frac{F_{e0}}{N_{PT}} \quad (2)$$

Определенному количеству РТ соответствует шаг гексагональной сетки:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{F_{e0}}{0,866}} \quad (3)$$

Каждой подкомандной площади соответствует тот стокоформирующий комплекс (СФК), на территории которого расположена РТ. Таким образом, параметры ландшафтного, почвенного и растительного покрова определяются только для СФК. Общая площадь подкомандных площадей, принадлежащих одному СФК, должна быть приблизительно равна площади самого СФК.

Выбор количества расчетных слоев почвы (РСП), зависящий от однородности вертикального разреза почвенной толщи; обычно принимается равным 10.

Количество ярусов подземных вод является функцией площади бассейна и оценивается по формуле

$$N = 2[\lg(F+10)+1]. \quad (4)$$

Репрезентативная точка характеризуется географическими координатами, высотой над уровнем моря, ориентацией, уклоном, временем добегания и, в принципе, может быть отождествлена с «точкой» на местности. Целесообразное число РТ для каждого данного бассейна нелинейно связано с площадью бассейна.

Метеорологическая информация по станциям и постам интерполируется в РТ. Таким образом, РТ-площади являются одинаковыми равновеликими элементами речного бассейна (за исключением пересекаемых водораздельной линией). Карта-схема бассейна с упорядоченным набором РТ совмещается с картой стокоформирующих комплексов, с которыми связана информация о большинстве параметров модели.

СФК – часть территории речного бассейна, условно однородная по свойствам ландшафта и единообразно функционирующая в гидрологическом плане. Предполагается, что в пределах СФК процесс формирования стока достаточно единообразен, а его количественные характеристики могут быть осреднены. Система СФК в бассейне подлежит генерализации в зависимости от масштабов картирования и моделирования. Предполагается, что все параметры модели характеризуют СФК в целом, неизменны в его пределах и скачкообразно изменяются на его границах.

В бассейне Камского водохранилища площадью 168000 км² были назначены 64 репрезентативных точки (РТ). Согласно Атласам Пермского края, Кировской и Свердловской областей на территории бассейна распространены следующие типы ландшафтов: с/х поля, болота, лиственные, еловые и сосновые леса и типы почв: песчаные, супесчаные, суглинистые и глинистые, торфяно-болотные. Территории распространения перечисленных типов почв и растительности были оцифрованы полигонами и наложены друг на друга с помощью программы ArcGIS. Таким образом, в бассейне выделены 15 стокоформирующих комплексов (СФК), однородных по типу почвы и растительности (табл. 4). Карты почв и растительности представлены на рис.2,3.

Толщина расчетного слоя почвы (РСП) не регламентируется, в сумме общая мощность всех расчетных слоев почвы обычно составляет один метр, но может быть и больше. Количество расчетных слоев почвы не должно быть меньше трех. В бассейне Камского водохранилища толщина одного РСП принималась равной 10 см, а их общее количество – 20.

Свойства почвы определяются следующими параметрами: плотность (кг/м³); пористость (б/р); максимальная водоудерживающая способность (б/р) (синонимы, используемые в почвоведении: наименьшая влагемкость, предельная полевая влагемкость); коэффициент фильтрации (мм/мин) при отсутствии данных непосредственных измерений корректируется вручную; удельная массовая теплоемкость вещества (Дж/(кг×°С)) и удельная массовая теплопроводность (Вт/(м×°С)) (или коэффициент теплопроводности).

Параметры растительного и особенно почвенного покрова являются определяющими при расчете динамики тепла и влаги в почве и оказывают большое влияние на результаты моделирования стока. Каждый тип почвы и растительности характеризуется своими значениями параметров, которые отражают особенности процессов формирования стока.

Таблица 4

Выделенные СФК бассейна Камского водохранилища

№ СФК	Тип растительности	Тип почв	Кол-во РТ
1	Сосновые леса	Песчаные подстилаемые глинами	3
2		Суглинистые	1
3		Песчаные	1
4	С/х угодья	Глинистые	6
5		Суглинистые	5
6		Суглинисто-каменистые	2
7		Песчаные	1
8	Лиственные леса	Глинистые	1
9		Суглинистые	3
10		Суглинисто-каменистые	4
11	Еловые леса	Глинистые	15
12		Песчаные подстилаемые глинами	2
13		Суглинистые	5
14		Суглинисто-каменистые	8
15		Песчаные	6

Определение основных параметров модели

Параметры почвенно-растительного покрова. Для оценки параметров почвенной колонки, типичной для данного СФК, необходимо использовать данные по почвенным разрезам, расположенным на территории бассейна в пределах характеризуемого СФК или его аналогом.

Доля вклада расчетных слоев почвы в общее испарение (б/р) характеризует степень участия каждого расчетного слоя почвы в процессе испарения. Доля вклада первого расчетного слоя почвы K_1 меняется от 0,1 (глубокое проникновение корневой системы в почву) до 0,5 (при отсутствии растительности в песчаных почвах). Для прочих слоев почвы доля вклада определяется по формуле $K_i = K_1(1-K_1)^{i-1}$, где K_i – доля вклада в испарение i -го расчетного слоя почвы.

Гидравлический параметр почвенного притока при отсутствии данных принимается равным 10–6 (m^3/c). Уточнение оценок может быть сделано по наблюдаемым гидрографам стока.

Для определения свойств почвы были использованы Агрогидрологический справочник и Метеорологический ежемесячник. В первом приводятся плотность и пористость почвы по слоям толщиной 10 см. В Метеорологическом ежемесячнике опубликованы описания почвенных разрезов.

Использованные значения почвенных параметров представлены в табл. 5.

Почвенный разрез характеризует одну точку, в то время как необходимо выделить параметры, которые правдоподобно будут отображать свойства почвы на всей территории СФК. Очевидно, что невозможно решить эту задачу абсолютно точно. Предполагается, что если будут назначены параметры почвы, попадающие в некоторый интервал наблюдаемых значений, то гидрологическое функционирование СФК будет описано с достаточной точностью.

Параметры растительного покрова. Максимальная емкость перехвата элементами растительного покрова (мм) – максимальная водоудерживающая способность растительного сообщества, определяющая потенциальную возможность всех ярусов растительности данного СФК задерживать некоторый слой дождевой влаги. Минимальная емкость перехвата (мм) при отсутствии специальных данных принимается как 20–35% от максимальной емкости перехвата.

Максимальная затененность кронами (б/р) – доля площади СФК, недоступной для попадания прямых солнечных лучей, зависит от сомкнутости и прозрачности крон. Величина назначается по конкретным измерениям на местности, по литературным данным, по экспертным оценкам. Максимальное значение затененности (1,0) дает сомкнутый еловый лес; минимальное значение (до 0,01) – редкостоящие отдельные мелколиственные деревья. Минимальная затененность кронами для хвойных деревьев принимается равной максимальной; для лиственных – 20–35 % от максимального значения.

Параметр подвода тепловой энергии ($Вт/(m^2 \times ^\circ C)$) – нормированный коэффициент теплообмена для данного типа подстилающей поверхности. При полном отсутствии данных параметр принимается

равным 4,0; в зависимости от густоты растительного покрова над поверхностью почвы по мере роста густоты параметр изменяется от 2,0 до 5,0.

Альbedo почвы (подстилающей поверхности) и альbedo ёмкости перехвата (б/р) можно найти в работах по метеорологии и агрометеорологии (табл. 6).

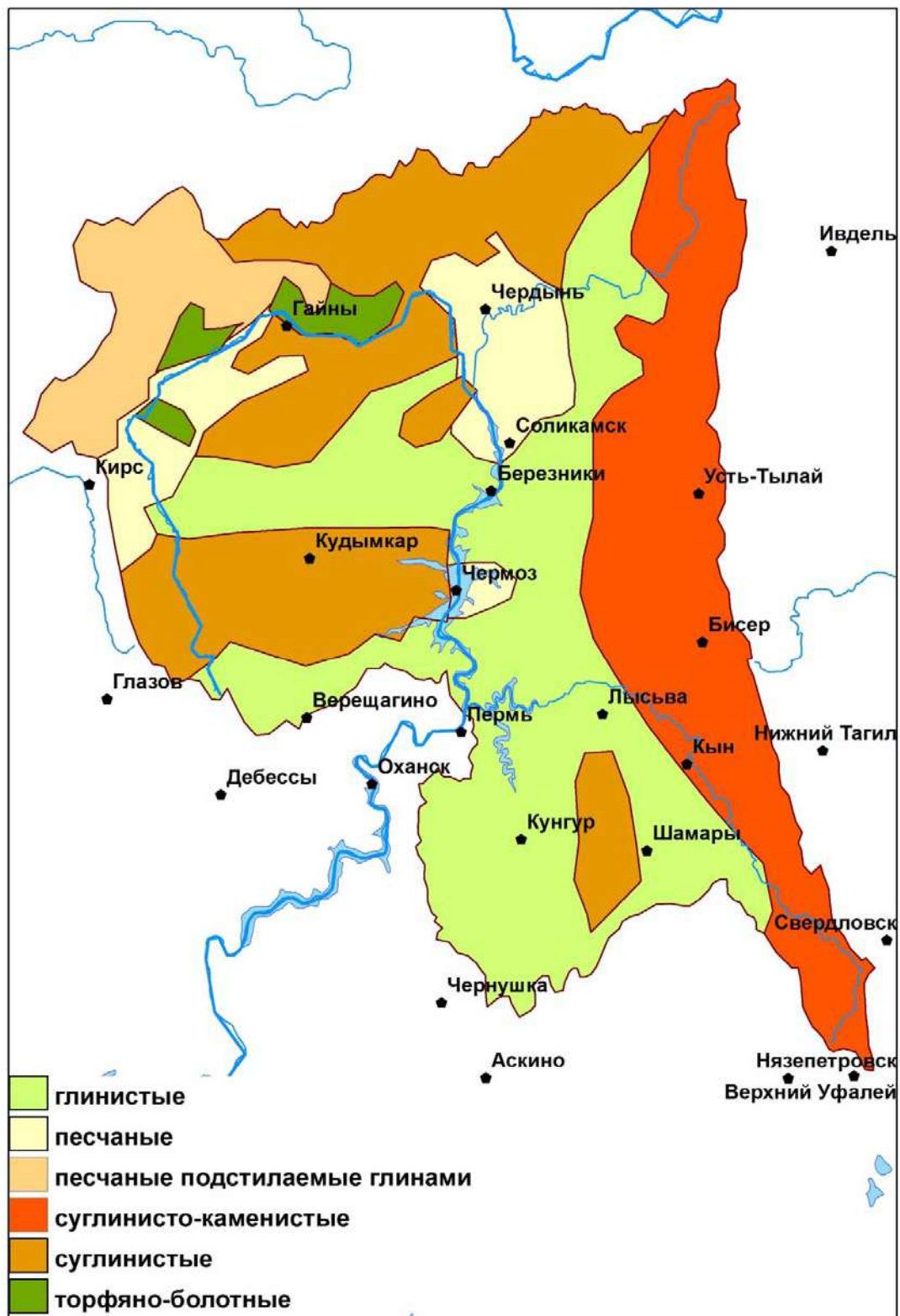


Рис. 2. Механический состав почвы бассейна Камского водохранилища [5]

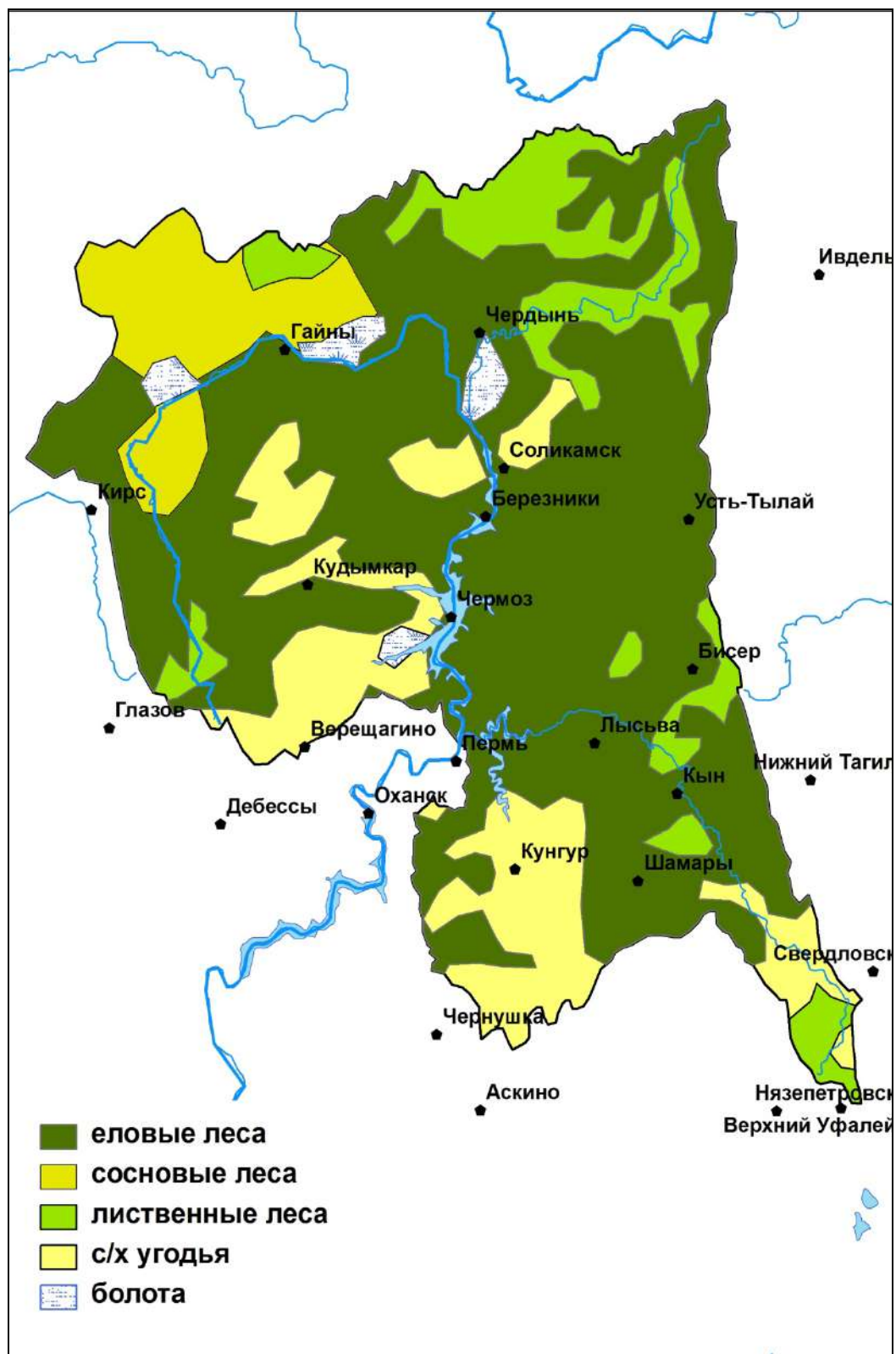


Рис. 3. Растительность бассейна Камского водохранилища [5]

Таблица 5

Основные параметры СФК

№ СФК	Тип растительности	Тип почв	Кол-во РТ	Плотность, кг/м ³	Пористость, б/р	Удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг × °С)	Кэф. теплопроводности, Вт/(м × °С)	Мах вододерживающая способность, мм в метровом слое	Кэф. фильтрации, мм/мин
1	Сосновые леса	песчаные подстилаемые глинами	3	2660	0,35	780	2,5	20	7,28
2		суглинистые	1	2710	0,35	840	1,3	100	0,95
3		песчаные	1	2660	0,35	780	2,5	20	7,28
4	С/х угодыя	глинистые	6	2740	0,3	880	1	160	0,9
5		суглинистые	5	2710	0,35	840	1,3	110	0,9
6		суглинисто-каменистые	2	2650	0,15	940	4,5	20	0,9
7		песчаные	1	2660	0,35	780	2,5	20	0,82
8	Болота	торфяно-болотные	1	1720	0,8	1930	0,8	514	0,45
9	Лиственные леса	глинистые	1	2740	0,3	880	1	160	0,95
10		суглинистые	3	2710	0,35	840	1,3	110	0,95
11		суглинисто-каменистые	4	2650	0,15	940	4,5	20	0,95
12	Еловые леса	глинистые	15	2740	0,3	880	1	160	0,95
13		песчаные подстилаемые глинами	2	2660	0,35	780	2,5	20	7,28
14		суглинистые	5	2710	0,35	840	1,3	100	0,95
15		суглинисто-каменистые	8	2650	0,15	940	4,5	20	2,5
16		песчаные	6	2660	0,35	780	2,5	20	7,28

Таблица 6

Параметры растительного покрова СФК

Показатели		Тип растительности			
		Еловые леса	Листв. леса	Поля	Сосновые леса
Затененность поверхности кронами деревьев, б/р	Макс	0,9	0,7	0,4	0,6
	Мин	0,8	0,5	0,2	0,5
Емкость перехвата жидких осадков растительностью, мм	Макс	6,0	4,5	0,6	4,0
	Мин	5,0	2,0	0,3	2,0
Альбеда ландшафта, б/р	Макс	0,15	0,2	0,25	0,2
	Мин	0,10	0,15	0,10	0,15
Коэффициент испаряемости, гПа×с	Макс	0,45	0,50	0,57	0,50
	Мин	0,25	0,30	0,32	0,30
Коэффициент испарения из емкости перехвата при максимальном развитии растительности, гПа×с		0,45	0,45	0,45	0,50
Параметр подвода тепловой энергии к поверхности почвы, Вт/м ² ×°С		4,5	4,5	4,0	4,0
Фенологические даты	Первая	17,04	17,04	17,04	17,04
	Вторая	15,05	15,05	15,05	15,05
	Третья	18,08	18,08	18,08	18,08
	Четвертая	29,10	29,10	29,10	29,10

Параметры поверхности склона. Казалось бы, что каждый СФК в пределах РТ-площади и есть единообразный и неделимый элемент речного бассейна, где все входные метеорологические величины и параметры СФК одинаковы. Действительно, это было бы так, если бы не локальная пространственная неоднородность некоторых характеристик подстилающей поверхности.

Первой по значимости является неоднородность высоты снежного покрова, а следовательно, и некоторых других его свойств. Поэтому в пределах каждого СФК целесообразно назначить несколько дополнительных «расчетных» точек – рТ, для каждой из которых принимается свое значение запаса воды в снежном покрове. Расчетная точка приписана к репрезентативной и более точного «адреса» не имеет. С какой-либо точкой на местности она не отождествляется и существует лишь статистически.

Поземки и метели перераспределяют снег по территории, засыпая им овраги, ложбины и балки, а в горах – расщелины, цирки и кулуары. Возникающая в результате неоднородность залегания снежного покрова должна быть учтена. Общая схема такого учета выглядит следующим образом.

В качестве исходной принимаем одинаковую суточную сумму твердых осадков H^* для данной РТ-площади. Для учета пространственной неравномерности обычно достаточно использовать пять квантилей, соответствующих центрам одинаковых отрезков на шкале вероятностей: 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 (предполагается нормальный закон распределения). В случае необходимости к пяти «квантильным» расчетным точкам, представляющим данный СФК, добавляется шестая, отвечающая скоплению снега в овражно-балочной системе или рытвинах и горных кулуарах. В результате имеем:

на окружающей овраги местности после сноса части снега в овражно-балочную систему

$$H^*_1 = H^* [m_1(m_2 - 1) + 1], \quad (5)$$

в оврагах

$$H^*_2 = m_2 H_1, \quad (6)$$

где m_1 – овражность (для пораженной оврагами площади СФК) и m_2 – отношение высоты снежного покрова в оврагах к таковой на окружающей местности.

Таким образом, перераспределение снега, которое происходит не столько во время снегопада, но в основном уже после него, имитируется одновременно с выпадением снега. Слой твердых осадков в пяти квантильных точках получается умножением модульных коэффициентов k_p при принятом коэффициенте вариации $C_v(H^*)$ на H^*_1 :

$$H^*_p = k_p H^*_1. \quad (7)$$

Значение k_p в зависимости от $C_v(H^*)$ определяется уравнением

$$k_p = 1 + U_p C_v(H^*), \quad (8)$$

где U_p – квантиль нормированного нормального распределения; для некоторых значений $C_v(H^*)$ его значения приведены в табл.7.

Таблица 7

Значение модульных коэффициентов k_p

Интервал времени	Середина интервала	U_p	k_p при $C_v(H^*)$ равно				
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0 – 0,2	0,1	–1,282	0,872	0,744	0,615	0,487	0,359
0,2 – 0,4	0,3	–0,524	0,948	0,895	0,843	0,790	0,738
0,4 – 0,6	0,5	0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,6 – 0,8	0,7	0,524	1,052	1,105	1,157	1,210	1,262
0,8 – 1	0,9	1,282	1,128	1,256	1,385	1,513	1,641

Параметры, отвечающие за описание перераспределения снежного покрова, определяются на основе данных снегосъемок и специальных наблюдений.

Максимальный коэффициент снегонакопления в оврагах (б/р) показывает степень пространственного перераспределения снега в результате ветрового переноса при наличии глубоких отрицательных форм мезорельефа. Величина колеблется приблизительно от 2 до 12 в зависимости от глубины расчлененности территории оврагами, руслами, кулуарами. Минимальный коэффициент снегонакопления в оврагах принимается равным 15–25% от максимального коэффициента.

Коэффициент вариации толщины снежного покрова (б/р) заимствуется из справочной литературы или рассчитывается по материалам снегосъемок. Его значение зависит от характера растительного покрова.

Для всех СФК были приняты 3 квантильные точки и отсутствие овражности. Пространственный коэффициент вариации запасов воды в снеге для леса принят равным 0,5, для поля – 0,7.

Параметры подземного питания. Гидравлический параметр подземного притока ($\text{м}^3/\text{с}$) принимается равным 10^{-6} . Отклонения от этого значения могут быть вызваны наличием карста на подкомандной площади или другими гидрогеологическими причинами. Гидравлические параметры совместно с условными константами (UK13, UK14-I, UK15-J) определяют скорости истечения воды из стоковых элементов.

Доля участия яруса подземных вод в питании водотока (б/р) определяется исходя из опыта моделирования в данных географических условиях, общих соображений и анализа кривых истощения наблюдаемых гидрографов. Некоторые особенности расчетного бассейна (вечная мерзлота, карст, трещиноватость и др.) могут значительно изменять распределение долей между различными ярусами.

Моделирование левобережных притоков осложняется наличием карста. При моделировании для тех РТ, которые располагаются на карстующихся породах, устанавливаются значения гидравлического параметра ярусов подземных вод больше 1.

Подготовка входной и проверочной гидрометеорологической информации

Качество и степень обеспеченности входной метеорологической информацией во многом определяет точность результатов моделирования. Для запуска расчетов процессов формирования стока с использованием модели «Гидрограф» необходимы ежедневные данные по температуре и влажности воздуха, осадкам. Они компонуется в файлы, подготовленные в специальном формате, каждый из которых содержит измеренные на одной метеостанции значения всех метеозаписей за один год. Необходимым требованием является отсутствие пропусков.

Поиск и подготовка метеорологических данных стали самостоятельной задачей в работе. Из-за недостаточной обеспеченности данными исполнителям приходилось пользоваться несколькими источниками, в которых содержалась метеорологическая информация различного качества и формата, в связи с чем возникали задачи приведения ее к единой форме и необходимость проверки и исправления ошибок.

Хотя на территории бассейна Камского водохранилища и вблизи водоразделов находится 52 метеостанции, удалось собрать данные, покрывающие достаточно длительный период времени, лишь по 24 из них. Информация о метеостанциях, использованных для моделирования, представлена в табл. 8.

Ряды данных из любого источника содержат пропуски и ошибки. Продолжительные пропуски по температуре и влажности воздуха, а также все пропуски по осадкам заполнялись значениями с ближайшей метеостанции, а единичные пропуски температуры и влажности воздуха интерполировались по предыдущим и последующим значениям.

В ходе подготовки входной метеорологической информации использовалось несколько источников данных, а именно: Архив Гройсмана, покрывающий период с 1871 по 2001 г., сайты <http://meteo.infospace.ru/> и <http://meteodata.ru/>, данные из метеорологических ежемесячников 1970–2000 гг.

Таблица 8

Сведения об используемых метеостанциях

Название станции	Номер	Широта, град.	Долгота, град.	Высота, м
Чердынь	23914	60,4	56,52	60,4
Гайны	23909	60,28	54,3	60,28
Соликамск	28026	59,65	56,8	59,65
Березники	28028	59,38	56,6	59,38
Кудымкар	28116	58,98	54,65	58,98
Чермоз	28128	58,82	56,23	58,82
Бисер	28138	58,52	58,85	58,52
Лысьва	28234	58,12	57,78	58,12
Верещагино	28216	58,08	54,68	58,08
Пермь	28225	58,02	56,3	58,02
Кын	28238	57,83	58,65	57,83

Окончание табл. 8

Название станции	Номер	Широта, град.	Долгота, град.	Высота, м
Оханск	28321	57,72	55,38	57,72
Кунгур	28326	57,42	56,93	57,42
Чернушка	28428	56,5	56,13	56,5
Нижний Тагил	28240	57,88	60,07	57,88
Шамары	28334	57,35	58,22	57,35
Свердловск	28445	56,8	60,63	56,8
Верхний Уфалей	28541	56,05	60,233	56,05
Кирс	28009	59,33	52,23	59,33
Глазов	28214	58,13	52,58	58,13
Дебессы	28312	57,63	53,82	57,63
Аскино	28522	56,08	56,58	56,08
Нязепетровск	28533	56,05	59,58	56,05
Ивдель	23921	60,68	60,43	60,68

Входом в детерминированную модель формирования стока «Гидрограф» являются суточные (или n -часовые) последовательности метеорологических величин – температура воздуха, относительная влажность или дефицит влажности воздуха, продолжительность выпадения жидких осадков, наблюдаемые на метеостанциях, и слой осадков, наблюдаемый на метеорологических станциях и постах. Метеорологические данные считываются из файлов следующего формата:

- имя файла – $msN_1.N_2$ (N_1 – год, N_2 – номер станции или поста), например, «Ms64.6» – метеоданные по метеостанции № 6, 1964 г.;
- содержание файла – четыре столбца по 365 (366) значений (первый столбец – суточная температура воздуха, °С; второй – дефицит влажности воздуха, мбар, или относительная влажность воздуха %; третий – продолжительность выпадения жидких осадков, ч; четвертый – суточный слой осадков, мм). Для постов первые три столбца заполнены нулями. В случае отсутствия осадков или наблюдений за продолжительностью выпадения осадков ставится ноль.

После подготовки и занесения всей метеорологической информации в модель необходимо ее проверить на наличие ошибок (опечаток, пропусков и т.д.). Для этого используется специальный модуль – «графические результаты–метеоинформация». Он позволяет вывести на графики значения температуры почвы, влажности воздуха и величины осадков по всем используемым в модели метеостанциям (рис. 4–12). Для оценки точности расчетов используются наблюдаемые ежедневные данные по стоку воды в замыкающем створе реки. Данные о среднесуточных расходах воды были взяты из гидрологических ежегодников за 1970–2000 гг. по всем расчетным створам.

Результаты моделирования процессов формирования стока

Для получения более точного гидрографа стока при моделировании вначале производят расчет высоты снежного покрова (рис. 7) и температуры почвы (рис. 8) на различных горизонтах. Сравнение полученных значений дает возможность скорректировать значения параметров почвы и параметров, которые влияют на процесс формирования и стаивания снежного покрова. Их уточненные значения используются при моделировании стока.

Расчет переменных состояний почвы и снежного покрова производится в каждой РТ на водосборе. Проверочная информация доступна только на метеостанциях. Поэтому при оценке результатов моделирования проводится сравнение данных наблюдений за снегом и температурой почвы на метеостанциях с рассчитанными их значениями на ближайших к ним РТ.

Помимо запаса воды в снеге выходом модели являются его высота, плотность, температура, водоотдача и др. Сравнение этих характеристик с их наблюдаемыми значениями позволяет полнее оценить, насколько адекватно модель рассчитывает формирование, накопление и таяние снежного покрова.

Расчет процессов, связанных с формированием и исчезновением снежного покрова, является важным звеном в моделировании стока воды с бассейна, поскольку талая вода весной формирует

половодье, которое является важнейшим событием в гидрологическом режиме рек рассматриваемой зоны. Кроме того, снежный покров влияет на процессы промерзания и оттаивания почвы в холодный период года, что определяет содержание воды и льда в почве и возможность формирования поверхностного, почвенного стока.

Переменные состояния почвы (температура и влажность) играют важнейшую роль в формировании стока. Особенно ярко это проявляется при фазовых переходах в почве, когда происходят резкие изменения в режиме фильтрации и условиях формирования поверхностного и почвенного стока.

При расчете стока воды с водосборов использовались значения параметров, скорректированные при моделировании снежного покрова и температуры почвы.

Расчеты стока по бассейнам выполнялись последовательно, начиная с малых водосборов (р. Лолог – п. Сергеевский) и заканчивая более крупными (закрывающий створ Камской ГЭС).

Наиболее простыми в плане моделирования являются бассейны рек Камы (п. Волосницкое), Лолог (п. Сергеевский) в связи с меньшим разнообразием распределения СФК, равнинным рельефом и достаточной освещенностью метеоинформацией (рис. 9).

После первого прогона модели были введены следующие корректирующие коэффициенты:

- коэффициент влияния прихода прямой солнечной радиации на эффективную температуру воздуха – 0,8;
- коэффициент в формуле расчета показателя снегонакопления в оврагах, ложбинах и кулуарах – 1,6;
- гидравлический параметр подземных стоковых элементов – 1,5.

Введение подобных коэффициентов позволяет корректировать форму гидрографа. В данном случае были увеличены значения снегозапасов, за счет снегозадержания в оврагах и лесной зоне бассейна, и доля подземной составляющей притока воды.

Значения параметров, уточненные на малых бассейнах, переносились на крупные или их соответствующие части, что позволило найти тот набор параметров, который с близкой точностью отображает процессы формирования стока на всех водосборах независимо от их размеров.

Введенные коэффициенты учитывались, например, при расчете гидрографа р. Камы (п. Тюлькино) (рис. 10).

Модель также рассчитывает и выводит на графики значения стока воды по расчетным слоям (РСП), т.е. поверхностный, почвенный и подземный стоки (рис. 11). Можно заметить, что основную долю стока составляет подземная составляющая. Поверхностный сток имеет место при сильных и продолжительных осадках, когда на поверхности земли образуется сток по сети микроручейков. Это характерно для периода половодья и значительных летне-осенних дождевых паводков. Наибольшие значения поверхностной составляющей наблюдаются в многоводные годы. Доля почвенного стока крайне мала и близка к нулю. Поскольку рассчитанный сток определяется как сумма величин стока, распределенных по РСП, то в основном он совпадает с гидрографом подземной составляющей стока.

На рис. 11–12 приведены гидрографы равнинной (Камы) и горной реки (Чусовая). Это позволяет проследить увеличение роли поверхностной составляющей стока для горных бассейнов. Причиной этого являются как значительные уклоны местности, так и увеличение величины самих осадков. Также следует отметить и состав горных пород. Бассейны горных рек, и в частности р. Чусовая, сложены каменистыми суглинистыми и среднесуглинистыми породами, в то время как равнинные – песчаными, суглинистыми и болотными почвами.

Для объективного сравнения результатов моделирования необходимо математическое представление ошибок расчета. В настоящей работе использовались такие критерии, как среднеквадратическое отклонение, C_v , коэффициент парной корреляции наблюдаемых и рассчитанных значений.

1. $RMSE$ – среднеквадратическое отклонение, оцениваемое по формуле

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{расч}^i - H_{набл}^i)^2}{n}} \quad (9)$$

2. f – критерий эффективности Нэша–Сатклиффа, определяемый следующим образом:

$$Ef = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{\text{расч}}^i - H_{\text{набл}}^i)^2}{\sum_{i=1}^n (H_{\text{набл}}^i - \overline{H_{\text{набл}}})^2} \quad (10)$$

Этот критерий является статистической мерой, которая отражает долю дисперсии наблюдаемых величин, обоснованной рассчитанными значениями. При $Ef > 0.5$ модель достаточно хорошо воспроизводит временную динамику H , при $Ef = 1$ модельный расчет следует признать полностью адекватным. При $Ef < 0$ временная изменчивость H воспроизводится моделирующим алгоритмом плохо. Основным недостатком данного критерия является завышение эффективности моделирования в периоды паводковых пиков и малый вклад в его оценку периодов межennaleго стока. Критерий малочувствителен к систематическим занижениям или завышениям стока, особенно минимального. Точность расчета суточных величин по данному критерию эффективности рассчитывалась для каждого года отдельно, после чего проводилось его осреднение по всему расчетному периоду.

3. Аналогичная вычислительная процедура производилась и для коэффициента парной корреляции наблюдаемых и рассчитанных значений (r). Так же, как и критерий Нэша–Сатклиффа, он более чувствителен к выбросам на гидрографе, чем к значениям около наблюдаемого среднего (табл. 9).

Рассчитанные критерии позволяют сделать выводы о достаточно успешной адаптации модели к условиям водосбора Камского водохранилища. Можно проследить закономерность увеличения ошибки расчета с увеличением площади водосбора реки. Так, параметр эффективности расчета гидрографа р. Лолог (п. Сергеевский) составил 0,93, а р. Камы (п. Тюлькино) – лишь 0,62. Модель также позволяет рассчитать годовые водные балансы рек.

Таблица 9

Статистические характеристики сопоставления рассчитанных и измеренных суточных (числитель) и годовых (знаменатель) значений слоев стока с различных водосборов бассейна Камского водохранилища

Река–створ	Площадь водосбора, км ²	Период расчета	RMSE	Ef	r
Лолог–п. Сергеевский	1600	1971–1996	0,18	0,93	0,94
Иньва–п. Слудка	5210	1971–1996	0,24	0,74	0,83
Обва–п. Рождественское	5540	1971–1996	0,26	0,82	0,85
Косьва–п. Останино	6220	1971–1996	0,29	0,58	0,77
Кама–п. Волосницкое	9750	1971–1996	0,19	0,96	0,92
Сылва–п. Подкаменное	19700	1971–1996	0,17	0,67	0,88
Чусовая–п. Лямино	21500	1971–1996	0,24	0,91	0,95
Кама–п. Тюлькино	81800	1971–1996	0,27	0,62	0,81

Примечание. *RMSE* – среднеквадратическое отклонение; *Ef* – критерий эффективности Нэша–Сатклиффа; *r* – коэффициент парной корреляции наблюдаемых и рассчитанных значений.

При моделировании притока воды в водохранилище замыкающий створ совпадает с береговой линией, таким образом, уменьшается площадь водосбора на величину площади водного зеркала водохранилища при НПГ. Для Камского водохранилища эта величина составляет:

$$1915 \text{ км}^2 / 168000 \text{ км}^2 \times 100\% = 1,14\%. \quad (11)$$

Эту величину необходимо учитывать при использовании моделирующей системы.

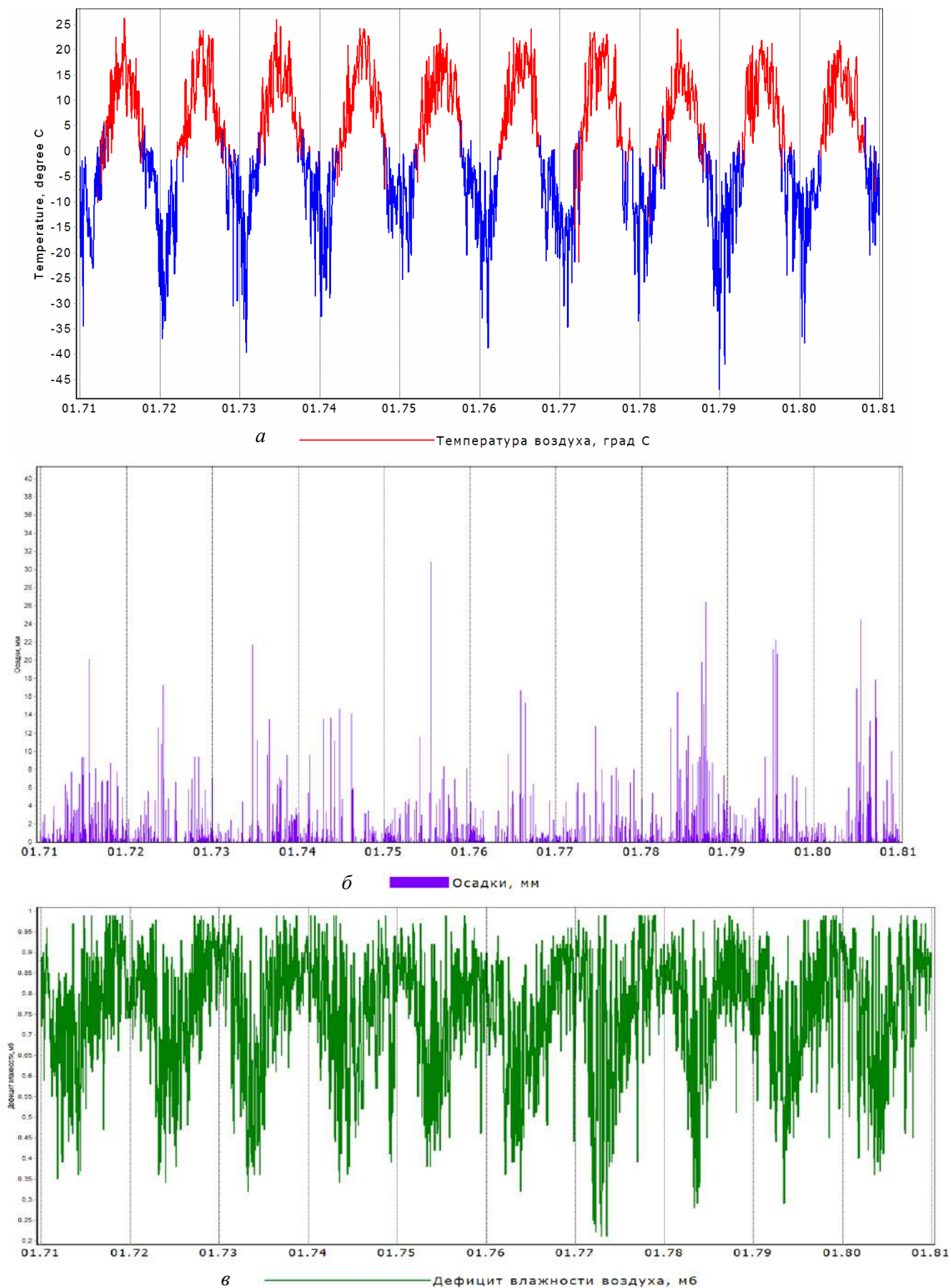


Рис. 4. Графики исходной метеорологической информации по г. Берзhenики: *а* – температура воздуха, °С; *б* – осадки, мм; *в* – дефицит влажности воздуха, мбар.

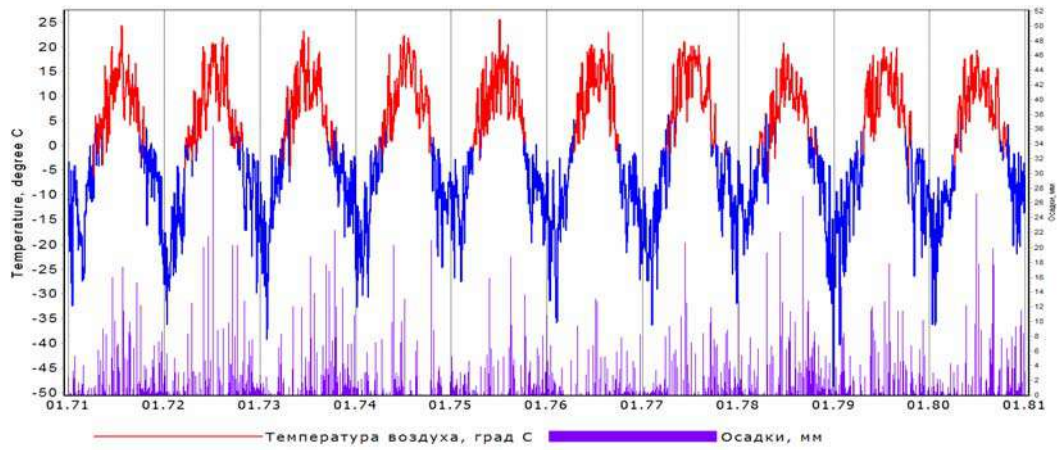


Рис.5. График исходной метеорологической информации по ст. Бисер

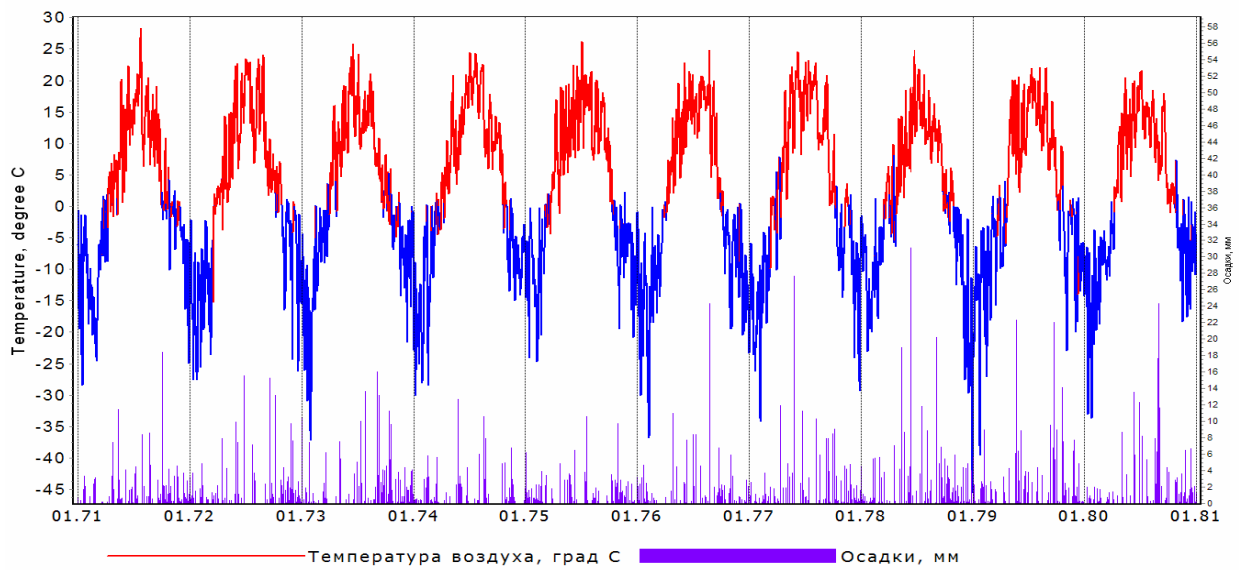


Рис.6. Графики исходной метеорологической информации по ст. Пермь

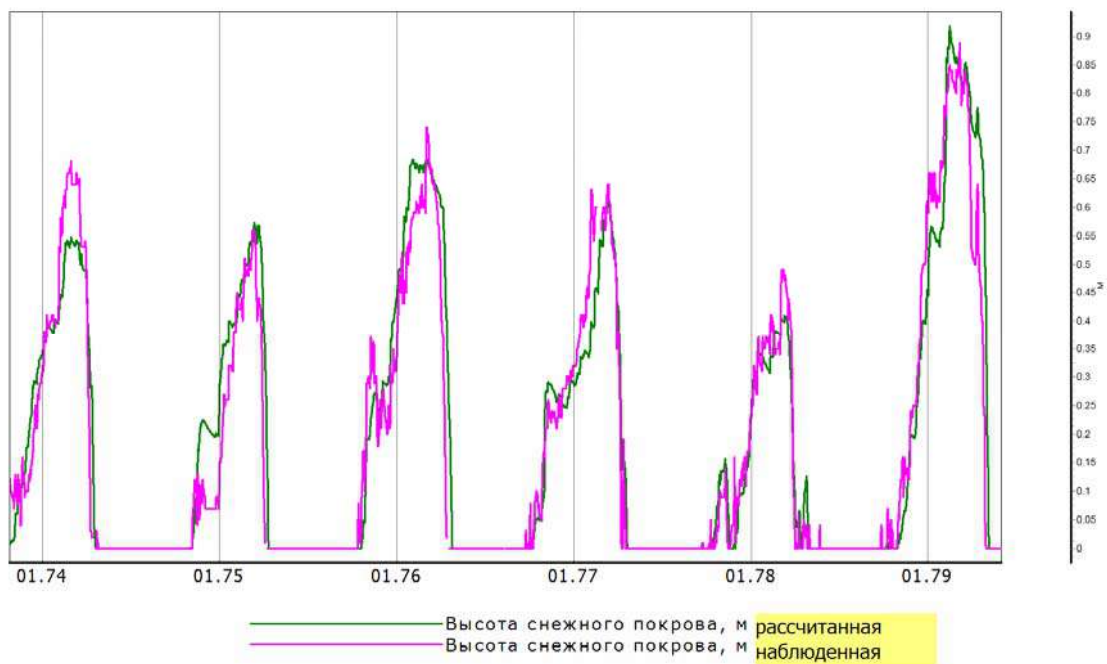


Рис. 7. Высота снежного покрова (р. Чусовая–п. Лямино)

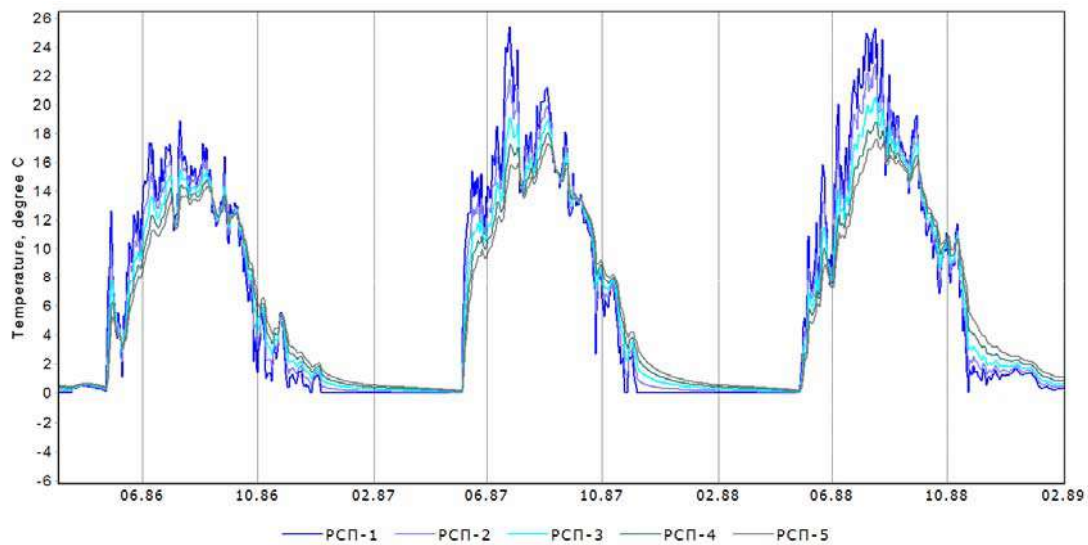


Рис. 8. Распределение температуры почвы по РСП (р.Чусовая–п. Лямино)

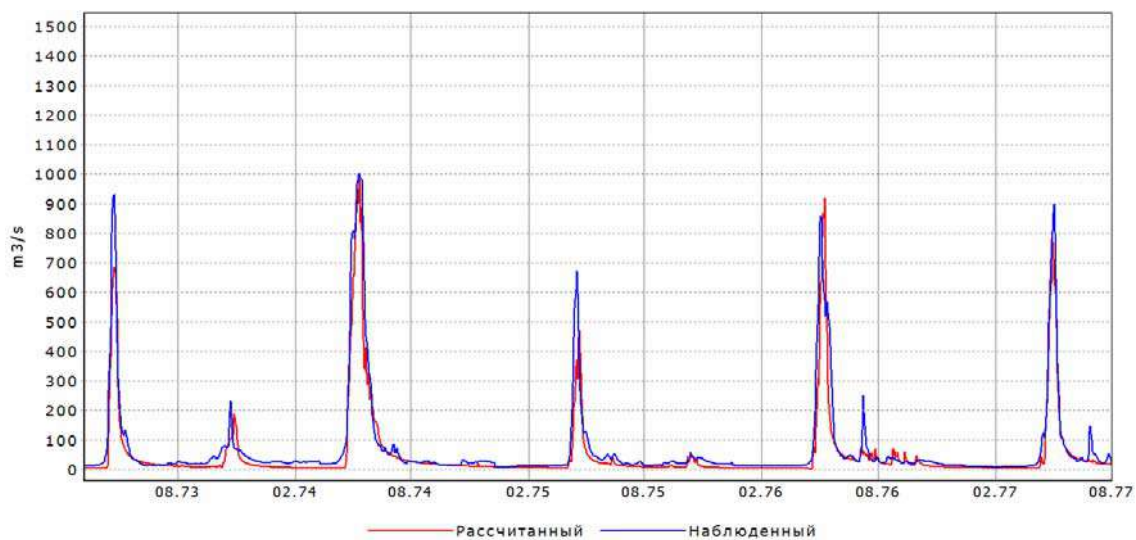


Рис.9. Гидрограф р. Камы (п. Волосницкое)

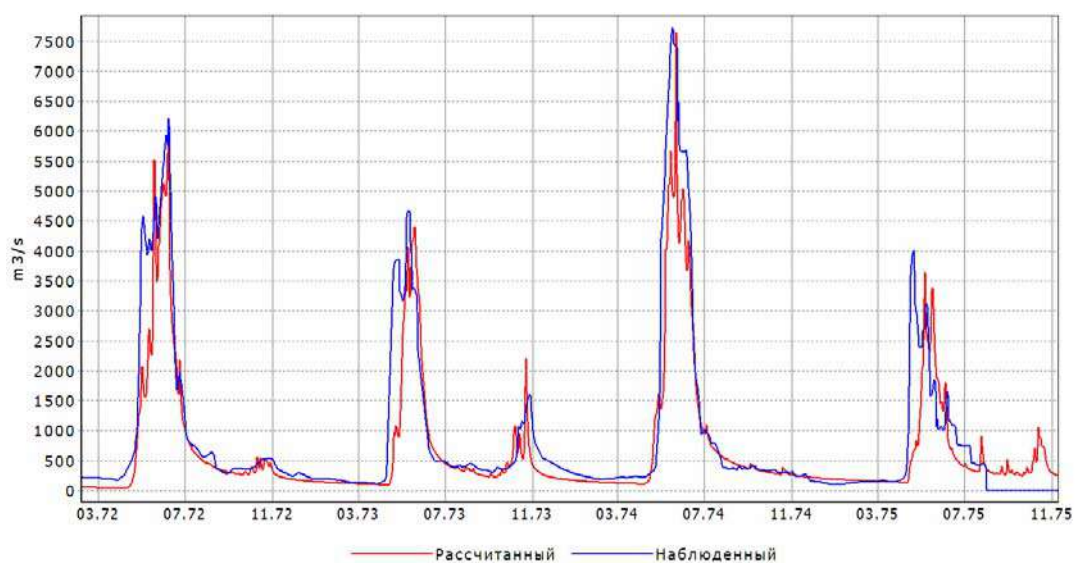


Рис. 10. Гидрограф р. Камы (п. Тюлькино)

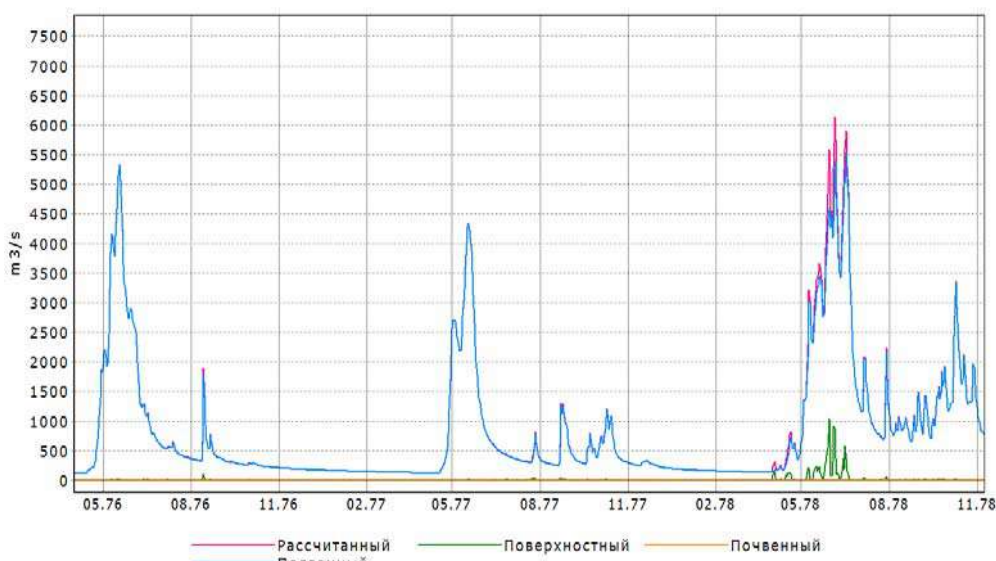


Рис. 11. Гидрографы стока по РСР на р. Каме (п. Тюлькино)

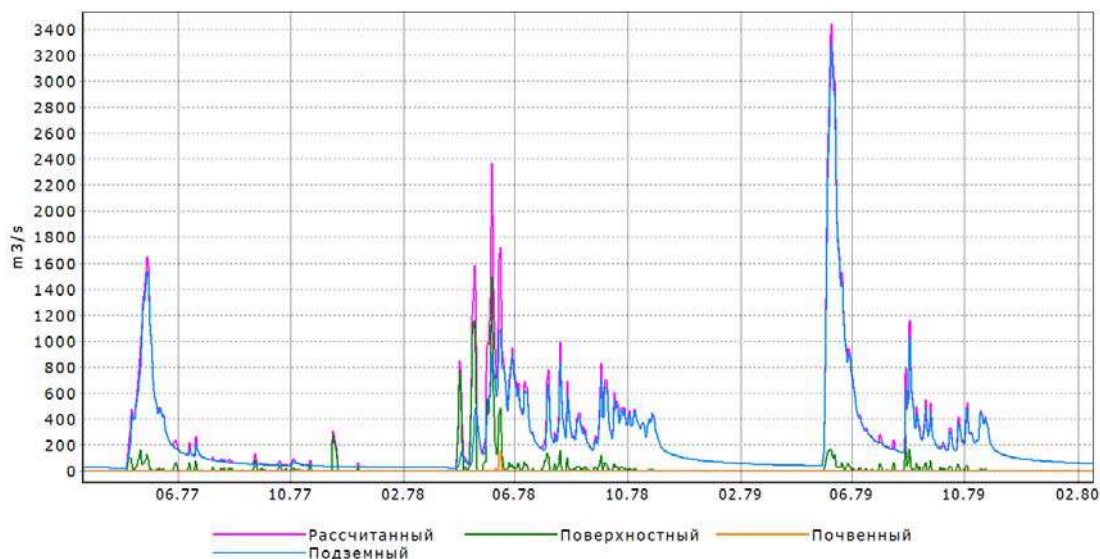


Рис. 12. Гидрографы стока по РСР на р. Чусовая (п. Лямино)

Заключение

Настоящая работа имела целью оценку возможности применения метода математического моделирования в изучении составляющих водного баланса водохранилищ. В основе исследования положена системная методология [4].

Впервые произведено моделирование притока воды в Камское водохранилище при помощи моделирующей системы «Гидрограф ГГИ-2001».

На первом этапе моделирования был собран массив исходной информации – это данные о величине влажности и температуры воздуха, осадков. Затем были изучены физико-географические условия бассейна, собран материал о видах растительности и типах почв, построены соответствующие карты и выделены СФК. Из агроклиматических справочников получена информация о почвенных разрезах и основных характеристиках почв. После сбора всей необходимой информации было произведено ее приведение к необходимому виду для занесения в программный комплекс «Гидрограф». Далее был осуществлён запуск модели, получены первые предварительные результаты и адаптация модели к условиям рек бассейна Камского водохранилища. Эффективность расчетов составила 0,93 – для малых водосборов и 0,64 – для всего водосбора. Коэффициент парной корреляции наблюдаемых и рассчитанных значений притока воды в Камское водохранилище составил 0,77 – 0,95.

Результатом работы является создание базы данных, позволяющей в дальнейшем рассчитать водный баланс любого водного объекта в бассейне (включая само водохранилище) за любой интервал времени (сутки–год).

Располагая створы расчета по длине водохранилища, можно получить значения притока воды для любого его участка с последующим вычислением водного баланса отдельных частей водохранилища. При этом могут быть получены значения слоя осадков, испарения, почвенного, грунтового и поверхностного стоков для месячных и годовых балансов. Подобный расчет также даст величину расхода воды (речного) при естественных условиях (до создания водохранилища). Эта характеристика может использоваться для оценки некоторых гидродинамических показателей водохранилища.

Таким образом, настоящая работа не только обладает самостоятельной практической ценностью, но и становится теоретической базой для исследований особенностей водного баланса и гидродинамики водохранилищ.

Библиографический список

1. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2009. 355 с.
2. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Современные проблемы гидрологии. М.: Академия, 2008. 350 с.
3. *Виноградов Ю.Б.* Математическое моделирование процессов формирования стока. Критический анализ. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.
4. *Девяткова Т.П.* Сущность системной методологии и возможности ее применения в гидрологических, геоэкологических и природоохранных исследованиях // Современные географические исследования. Пермь, 2006. С.49–71.
5. *Ресурсы* поверхностных вод СССР (Средний Урал и Приуралье). Л.: Гидрометеиздат, 1973. Т.11. 848 с.

D.G. Sazonova, A.B. Kitaev

USE OF MODEL «HYDROGRAPHER SHI-2001» FOR THE ESTIMATION OF INFLOW OF WATER IN KAMA WATER BASIN

The possibility of application of mathematical model «Hydrographer SHI-2001 » for an estimation of inflow of water in Kama water basin is considered. The physical-geographical description of the research area is given, the schematization of pools is presented, the description of key parameters of model, preparation of the entrance and verifying information is given, results of modelling of inflow of water in Kama water basin are presented, the estimation of applicability of model is given.

К e y w o r d s : a water basin; inflow of water; model.

Darya G. Sazonova, Master of Hydrometeorology of Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State National Research University; 15, Bukireva, Perm, Russia, 614990; hydrology@psu.ru

Alexandr B. Kitaev, Candidate of Geography, Associate Professor of Department of Hydrology and Water Resources Protection, Perm State National Research University; 15, Bukireva, Perm, Russia, 614990; hydrology@psu.ru