ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ДОРПРОЕКТ»
ГОУВПО «МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н. П. ОГАРЕВА»

А. М. ШУТОВ

ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ РЕК РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

САРАНСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОРДОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2005

УДК 556.5(470.345)
ББК Д22
Ш978

Рецензенты:
доктор географических наук профессор *А. А. Ямашкин;*
кандидат географических наук *В. Н. Сафонов*

Редакционная группа: *В. Л. Лутьянова, З. И. Морозова, Л. Н. Панина*

Работа выполнена по программе «Университеты России» (проект УР. 08.01.115).

Шутов А. М.
Ш978 Вопросы инженерной гидрологии рек Республики Мордовия. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2004. – 80 с.

ISBN 5 – 7103

Содержатся современные методы инженерно-гидрологических расчетов, применяющихся в практике проектирования гидротехнических сооружений, дорожном, мелиоративном и природоохранном строительстве. Значительное место уделено выявленным региональным зависимостям по определению основных параметров стока рек Республики Мордовия.

Для специалистов в области гидрологии суши, географии, гидротехники, мелиорации, природопользования и охраны природы.

УДК 556.5(470.345)
ББК Д22

Научное издание

ШУТОВ Александр Михайлович

ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ РЕК РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

Печатается в авторской редакции в соответствии с представленным оригинал-макетом
Компьютерная верстка *Д. Н. Калитина, А. А. Шутова*
Фотографии *Н. Г. Еремкиной*
Дизайн обложки *В. П. Константинова*

Подписано в печать …... Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. …... Уч.-изд. л. ….. Тираж 200 экз. Заказ №
Издательство Мордовского университета
Типография Издательства Мордовского университета
430000, г. Саранск, ул. Советская, 24

ISBN 5 – 7103

© А. М. Шутов, 2005
© Издательство Мордовского университета, 2005 (оформление)

ВВЕДЕНИЕ

Для обоснования проектов гидротехнического строительства, экологических и водохозяйственных мероприятий в первую очередь необходимо располагать достаточно полными и достоверными данными гидрометрических наблюдений на реках республики и полученными на их основе характеристиками поверхностного стока.

При проектировании плотин водохранилищ (прудов) необходимо знать величины среднего годового стока, его распределение в различные сезоны и месяцы. Размеры и типы водосбросных сооружений плотин определяются максимальными расходами воды редкой повторяемости, для определения которых необходимы данные по максимальному стоку. Обеспечение промышленности водой, решение экологических проблем требуют знания величин минимального стока в маловодные годы. Особое значение гидрологическим характеристикам придается при создании проектов мелиоративного строительства, где необходимы исходные данные о среднем многолетнем стоке рек, максимальных объемах и расходах воды половодья и паводков, внутригодовом распределении стока, его показателях в вегетационный период.

В связи с большими объемами дорожного строительства, газификации республики высокие требования предъявляются к качеству проектной документации по автомобильным дорогам, трассам газопроводов, сопутствующим им гидротехническим сооружениям (мостовые переходы, дюкеры, водопропускные сооружения), где требуется определение расчетных характеристик по стоку и уровенному режиму половодья и дождевых паводков каждого пересекаемого трассами постоянного или временного водотока. При принятии архитектурно-планировочных решений по размещению населенных пунктов, различных промышленных и сельскохозяйственных предприятий, находящихся в долинах рек, необходимы данные о возможных величинах зон затопления территории половодьями и паводками редкой повторяемости.

Основным нормативным документом по гидрологическим расчетам в настоящее время является свод правил по гидрологическим расчетам СП 33–101–2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». Эти правила распространяются на определение гидрологических характеристик при проектировании речных гидротехнических сооружений, железных и автомобильных дорог, систем мелиорации, водоснабжения, планировке населенных пунктов, а также при разработке мероприятий по борьбе с наводнениями.

Практика применения методов расчета гидрологических характеристик по указанным правилам показала возможность их использования для рассматриваемого региона с определенными корректировками. Накопление материалов экспериментальных гидрологических, физико-географических, гидрогеологических и геологических исследований по территории Республики Мордовия позволяет осуществить эти корректировки, что существенно повышает точность расчетов гидрологических характеристик. Обеспечение строительного проектирования необходимыми расчетными характеристиками стока рек и водотоков с учетом местных особенностей определяет практическое значение инженерно-гидрологических расчетов для рассматриваемого региона.

Глава 1
ГОДОВОЙ СТОК

1.1. Факторы формирования и норма годового стока

Средний годовой сток является функцией элементов ландшафта, более того, многочисленные исследования показали, что это интегральная характеристика, нивелирующая отдельные ландшафтные условия, а поэтому отличающаяся большей равномерностью распределения по территории, чем другие компоненты ландшафта. Так как норма стока является функцией осадков и испарения, то остальные элементы ландшафта – гидрогеологические условия, рельеф почвы, растительный покров, озерность, заболоченность – изменяют ее через изменение осадков и испарения.

Характерным примером влияния гидрогеологических условий на норму среднегодового стока на территории Республики Мордовия является его повышенная норма в бассейне р. Вад, что связано с повышенной долей грунтового питания. Особенно ярко влияние гидрогеологических условий проявляется в бассейнах Мокши (район г. Темникова), Сивини, Урката и верховьях Алатыря. Специальных исследований в данных районах не проводилось, но по модулям стока можно предположить, что в бассейне р. Уркат происходит активная разгрузка подземных вод (модуль стока – 4,40 л/с · км^2), а в бассейне р. Сармы – частичное их поглощение (модуль стока – 2,96 л/с · км^2).

Влияние залесенности водосборов, по данным последних исследований, двояко. Благодаря повышенной шероховатости поверхности и восходящим токам воздуха над лесом больше осадков, чем над открытыми пространствами (до 10 – 20 %), с другой стороны, растительный покров задерживает некоторую часть осадков (зимних – 5 – 10, летних – 20 – 40 %) [Евстигнеев, 1990]. Потери на испарение в лесу несколько больше, чем на открытых частях водосборов. Это превышение составляет 8 – 11 % при неглубоком залегании грунтовых вод (4 – 10 м) и 15 – 20 % – при более глубоком (свыше 10 м) [Водогрецкий, Крестовский, 1975]. Тем не менее, по исследованиям этих авторов, под влиянием леса увеличение нормы стока рек, имеющих полное грунтовое питание в лесостепной зоне, в том числе на рассматриваемой территории, доходит до 20 %, при глубоком залегании подземных вод наблюдается тенденция к уменьшению данного показателя до 10 – 15 %.

Проведенные исследования позволили выявить эмпирические зависимости нормы стока от залесенности водосборов. Коэффициент корреляции этих связей $r = -0{,}66 \pm 0{,}02$ (бассейн р. Мокши) и $r = -0{,}66 \pm 0{,}01$ (бассейн р. Суры). Полученные зависимости (рис.1, 2) аппроксимируются уравнениями:

– для бассейна р. Мокши

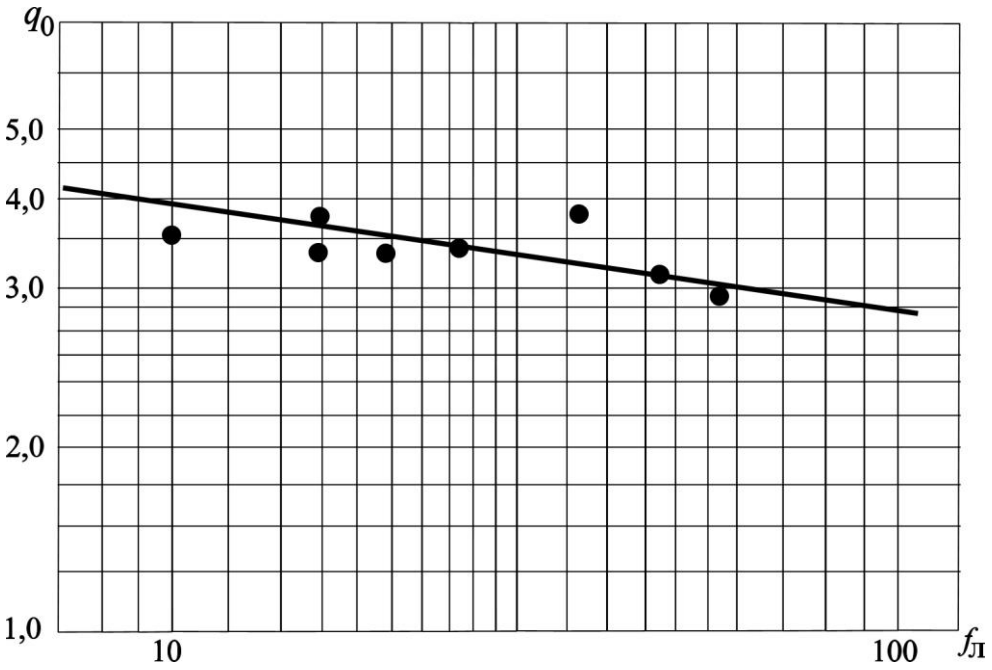
$$q_0 = \frac{5{,}52}{f_{\text{л}}^{0{,}152}},$$

– для бассейна р. Суры

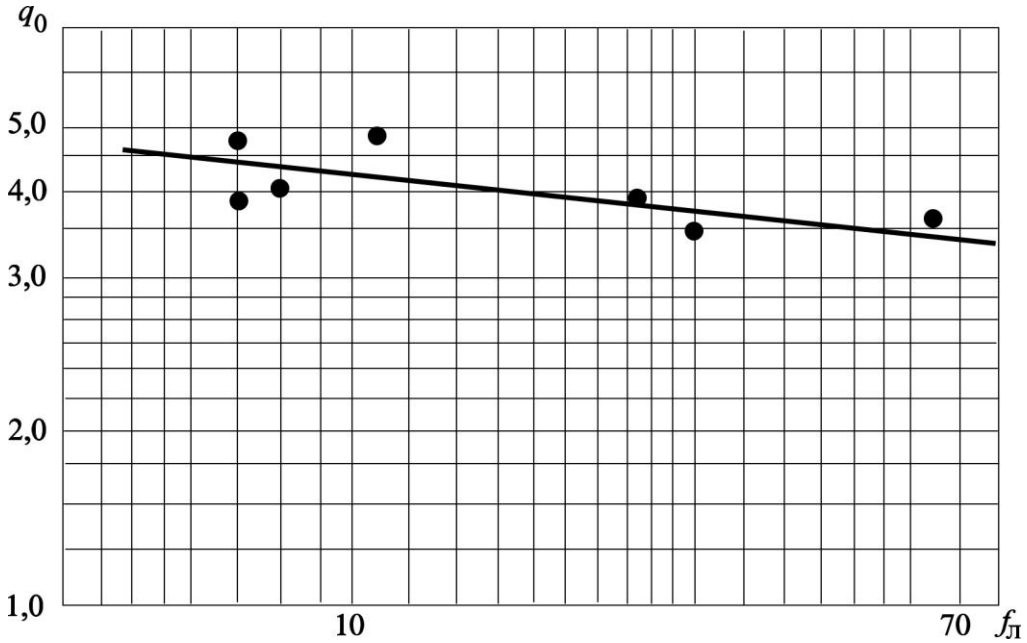
$$q_0 = \frac{5{,}61}{f_{\text{л}}^{0{,}117}},$$

где q_0 – норма годового стока, л/с · км^2;

$f_{\text{л}}$ – залесенность водосборов, %.



Р и с . 1. Зависимость модуля годового стока от залесенности водосбора для бассейна р. Мокши



Р и с . 2. Зависимость модуля годового стока от залесенности водосбора для бассейна р. Суры

Преобразования ландшафтов, выраженные в рассматриваемом регионе, в частности, в распаханности водосборов, также нарушают естественные условия формирования стока, что проявляется в выявленной зависимости нормы годового стока от величины распаханности водосборов (рис. 3).

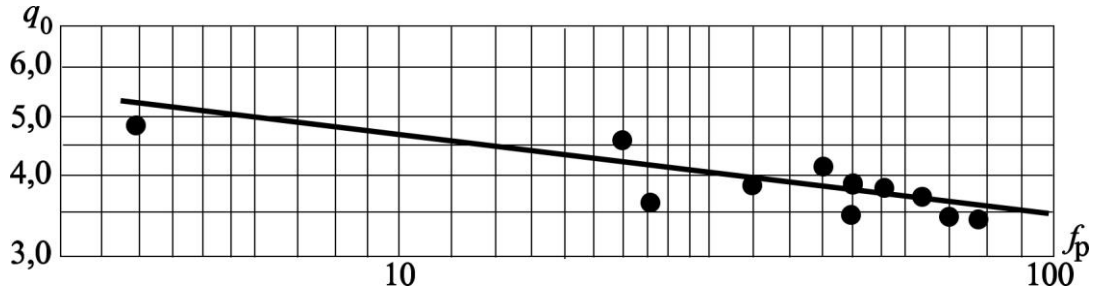


Рис. 3. Зависимость модуля годового стока от распаханности водосбора

Полученная зависимость аппроксимируется уравнением

$$q_0 = \frac{6{,}23}{f_р^{0{,}123}},$$

где $f_р$ – распаханность водосборов, %.

Коэффициент корреляции этой связи –

$$r = -0{,}78 \pm 0{,}01.$$

Влияние озер на норму годового стока выражается в ее уменьшении вследствие большого испарения с водной поверхности по сравнению с испарением с суши. Снижение нормы годового стока ΔY под влиянием озер может быть установлено по выражению

$$\Delta Y = (E_в - E_с) f_{оз},$$

где $E_в$ и $E_с$ – норма испарения с водной поверхности и суши, мм;

$f_{оз}$ – озерность бассейна, %,

$$f_{оз} = \frac{A_{оз}}{A},$$

где $A_{оз}$ – площадь зеркала озер, км^2;

A – площадь водосбора, км^2.

В условиях недостаточного увлажнения озера могут существенно уменьшить норму годового стока. Специальных исследований, посвященных данному вопросу, на территории Республики Мордовия не проводилось, но в расчетах можно воспользоваться данными А. А. Соколова [1964] (табл. 1).

Таблица 1

Возможное уменьшение нормы годового стока за счет дополнительного испарения с озер

Озерность водосбора, %	1	5	10	20	30	40	50
Уменьшение нормы годового стока, %	3	14	30	60	85	–	–

Влияние болот на норму годового стока в основном определяется различием норм испарения заболоченной и незаболоченной территорий, расположенных в одинаковых физико-географических условиях. Исследования К. Е. Иванова [1957] и других показывают, что в зоне достаточного и избыточного увлажнения изменение степени заболоченности отдельных водосборов по отношению к средней заболоченности территории мало меняет норму стока. В условиях недостаточного увлажнения болота (при значительной доле их площади в бассейне) могут существенно влиять на этот показатель.

Характеристика годового стока для рассматриваемого региона дана по средним величинам расходов и модулей стока по 18 створам (табл. 2). Короткие ряды наблюдений были приведены к многолетнему периоду путем построения графиков связи годовых расходов за одинаковый период опорного и приводимого пунктов. Коэффициенты корреляции этих связей имели значения 0,71 – 0,92.

Таблица 2

Годовой сток различной обеспеченности

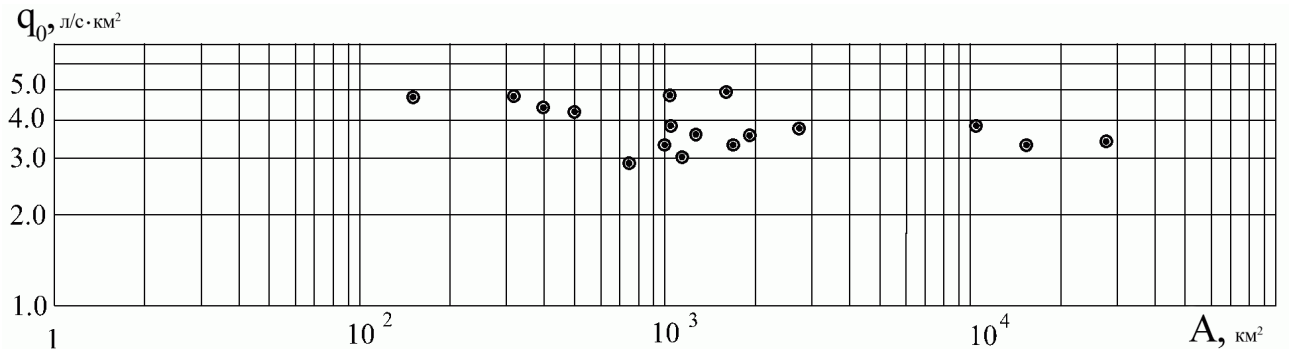
Река (пункт)	Площадь водосбора, км²	Период наблюдений, годы	Норма годового стока*	C_v	C_s	Средний расход воды, м³/с, обеспеченностью p%						
						1	3	5	10	2	50	75
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Мокша (Темников)	15800	1934–1995	$\frac{53,7}{3,4}$	0,32	0,19	101	90,1	84,6	76,6	64,2	52,0	41,3
Мокша (Шевелевский Майдан)	28600	1934–1995	$\frac{97,0}{3,39}$	0,32	0,38	178	160	151	138	117	95,0	75,1
Исса (Паево)	1790	1949–1995	$\frac{6,44}{3,6}$	0,33	0,20	11,7	10,6	10,1	9,2	7,82	6,38	4,97
Сивинь (Сивинь)	1060	1949–1995	$\frac{4,13}{3,9}$	0,33	0,10	7,4	6,75	6,41	5,89	5,03	4,1	3,20
Уркат (Урей 1–й)	402	1969–1995	$\frac{1,79}{4,46}$	0,30	0,84	3,36	2,97	2,78	2,51	2,1	1,71	1,40
Сатис (Росстанье)	1230	1967–1995	$\frac{3,81}{3,1}$	0,27	0,76	6,75	6,03	5,69	5,19	4,41	3,69	3,06
Сарма (Сарминский Майдан)	741	1968–1995	$\frac{2,19}{2,96}$	0,32	1,40	4,48	3,85	3,56	3,13	2,53	2,04	1,68
Вад (Вадинск)	527	1955–1995	$\frac{2,29}{4,35}$	0,22	0,44	3,62	3,33	3,18	2,96	2,6	2,25	1,93
Вад (Авдалово)	1930	1936–1995	$\frac{7,24}{3,75}$	0,31	0,37	13,1	11,8	11,1	10,2	8,67	7,09	5,66
Виндрей (Виндреевское)	1010	1949–1995	$\frac{3,43}{3,4}$	0,30	0,36	6,08	5,81	5,21	4,79	4,09	3,37	2,71
Алатырь (Мадаево)	1410	1959–1995	$\frac{5,12}{3,63}$	0,29	0,58	9,16	8,25	7,78	7,09	6,03	4,98	4,05
Алатырь (Тургенево)	11000	1934–1995	$\frac{42,8}{3,89}$	0,34	0,10	77,7	70,7	67,1	61,6	52,4	42,5	32,9
Рудня (Дивеев Усад)	1140	1963–1995	$\frac{4,67}{4,1}$	0,24	0,79	7,91	7,11	6,73	6,17	5,32	4,52	3,85

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Инсар (Саранск)	1610	1955–1995	7,89 / 4,9	0,22	0,44	12,5	11,5	10,9	10,2	8,97	7,75	6,66
Калыша (Васильевка)	166	1969–1995	0,81 / 4,9	0,27	0,54	1,4	1,27	1,2	1,1	0,95	0,79	0,65
Меня (Олевка)	329	1969–1995	1,56 / 4,75	0,28	0,56	2,75	2,48	2,34	2,14	1,83	1,52	1,25
Пьяна (Гагино)	2880	1948–1995	11,1 / 3,86	0,38	0,19	21,5	19,4	18,3	16,6	13,8	11,0	8,19
Сура (Кадышево)	27900	1933–1995	98,2 / 3,52	0,30	0,60	179	161	151	137	116	95,2	77,0

* В числителе – расход, м³/с; в знаменателе – модуль стока, л/с•км².

Анализ годового стока (модуля стока) показал относительно постепенное его увеличение на территории Мордовии с юга на север. Построение графика зависимости среднего модуля стока от площади водосбора свидетельствует, что площадь водосбора средних и больших рек практически не влияет на изменение модуля стока (рис. 4). Изменение по рассматриваемому региону элементов ландшафта, подчиняющихся географической зональности, а также независимость модуля среднего стока от площади водосбора позволили отобразить пространственные изменения модуля в виде изолиний.



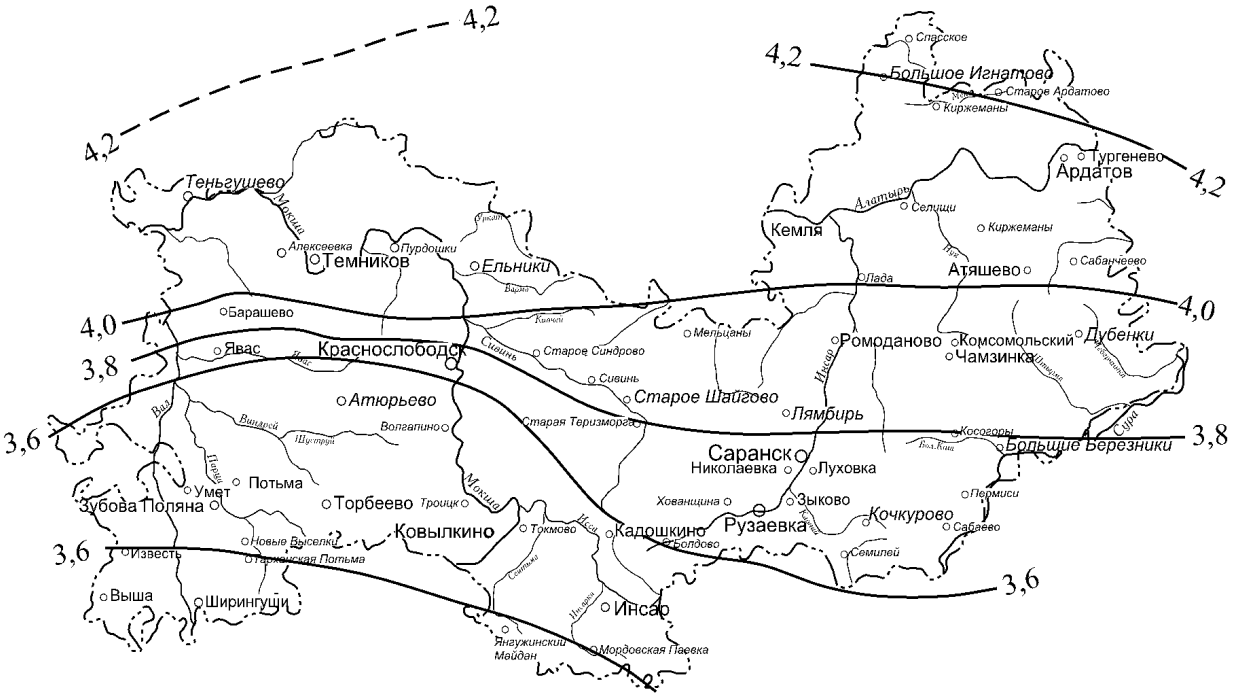
Р и с . 4. Зависимость модуля годового стока от площади водосбора

В отличие от ранее составленной нами карты среднегодового стока [Схема мелиорации…, 1972] представленная в данной работе карта более детальна в связи с увеличением продолжительности рядов наблюдений (рис. 5). Она может быть использована при расчетах стока по средним и большим рекам.

1.2. Изменчивость годового стока

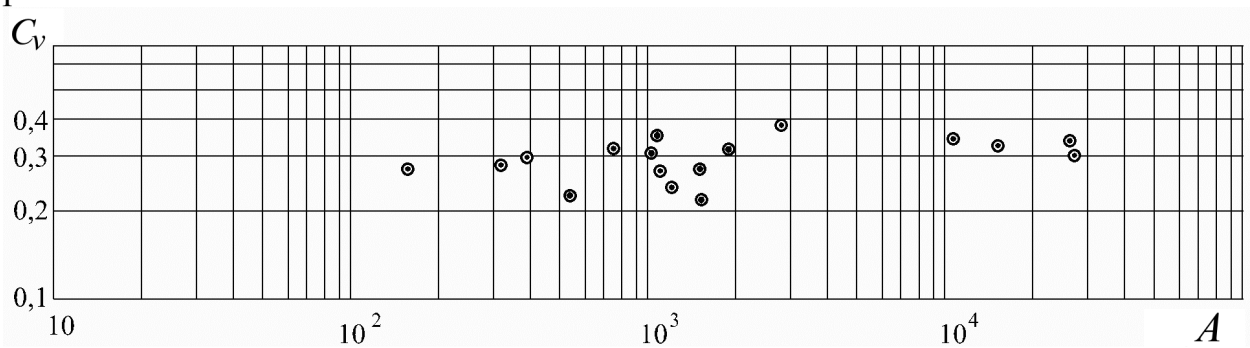
В многолетней последовательности годовых величин стока наблюдается чередование многоводных и маловодных циклов, обусловленных различными сочетаниями атмосферной циркуляции и, как следствие, различным соотношением осадков и испарения. Кроме естественных факторов, влияющих на

сток, немаловажную роль на его изменение оказывает хозяйственная деятельность (строительство водохранилищ, забор воды на нужды промышленности,

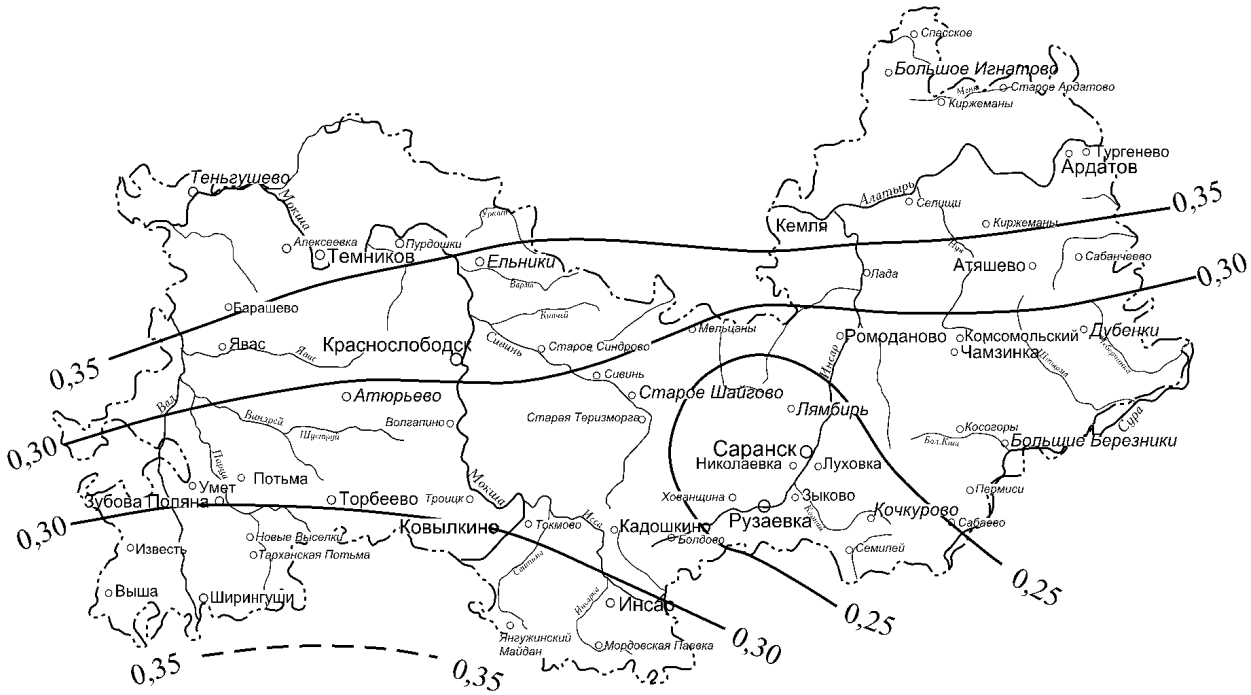


Р и с . 5. Средний годовой сток рек, л/с·км²

сельского хозяйства). Наиболее многоводными большинство рек республики были в 1942, 1947, 1963, 1970 гг., маловодными – в 1936, 1954, 1972, 1989, 1992 гг., особенно маловодным был 1972 г., когда модуль стока на многих реках не превышал 1,5–2 л/с·км². Изменчивость годового стока по сравнению с его нормой характеризуется относительным среднеквадратическим отклонением, или коэффициентом вариации (C_V). Коэффициенты изменчивости годового стока в исследуемом регионе колеблются в пределах 0,22–0,38, а для преобладающего числа пунктов – от 0,27 до 0,32. Влияние площади водосбора на величину коэффициента вариации практически не прослеживается, коэффициент корреляции исследуемой связи очень низок (рис. 6). Это определило возможность построения карты изолиний изменчивости годового стока для территории республики (рис. 7). Представленная карта может быть использована при инженерно-гидрологических расчетах для неизученных рек.



Р и с . 6. Зависимость коэффициента вариации годового стока от площади водосбора



Р и с . 7. Коэффициент изменчивости годового стока

Анализ коэффициентов вариации малых водотоков сопредельных территорий показал, что с уменьшением площади водосбора изменчивость годового стока возрастает. Ряд авторов [Исследование и расчеты..., 1980] рекомендуют для водосборов менее 10 км² увеличивать коэффициент вариации в 1,2 раза, а для площадей более 10 км² – в 1,1 раза. Коэффициенты асимметрии (C_S), подобранные по признаку наилучшего соответствия теоретических кривых эмпирическим точкам для большинства рек, за исключением Сармы, Сивини, Пьяны, Урката и Сатиса, составляют от 0,1 до 0,79. При инженерно-гидрологических расчетах C_S следует определять по вычисленному коэффициенту асимметрии аналога.

1.3. Практические приемы расчета годового стока при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений

Практические приемы расчета годового стока при отсутствии гидрометрических данных, рекомендуемые действующим СП 33–101–2003, основаны на следующих операциях.

1. Прямолинейная интерполяция значений нормы годового стока по карте этого параметра (см. рис. 5). Коэффициент вариации определяется таким же образом по карте его значений (см. рис. 7) для центра тяжести исследуемого бассейна.

После определения среднего многолетнего значения стока (нормы) в модулях стока, коэффициента его вариации и отношения C_s/C_v находится значение расхода воды (нормы) по формуле

$$Q_{\text{ср.год}} = \frac{q_0 A}{1000}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее с помощью таблицы отклонения ординат биномиальной кривой обеспеченности от середины определяется среднегодовой расход воды требуемой ежегодной вероятности превышения.

2. Использование эмпирических зависимостей, установленных для рек рассматриваемого региона.

Анализ связи величины среднегодового расхода воды рек региона с площадью водосбора позволил установить зависимости, которые аппроксимируются уравнениями:

– для бассейна р. Мокши

$$Q_{\text{ср.год}} = 0{,}00315\, A^{1{,}014};$$

– для бассейна р. Суры

$$Q_{\text{ср.год}} = 0{,}0059\, A^{0{,}952}.$$

Полученные уравнения можно использовать в практической деятельности на стадиях технико-экономических обоснований проектов при площадях водосборов от 1 000 до 30 000 км².

3. Выполнение инженерно-гидрологических расчетов с применением аналога, форма водосбора которого должна быть подобна форме водосбора исследуемой реки. Для этого должны выполняться приближенные равенства

$$\frac{L}{A^{0{,}56}} \approx \frac{L_{\text{а}}}{A_{\text{а}}^{0{,}56}}, \quad IA^{0{,}5} \approx I_{\text{а}} A_{\text{а}}^{0{,}5},$$

где $L, L_{\text{а}}$ – соответственно длина исследуемой реки и реки-аналога;

I, $I_{\text{а}}$ – уклон исследуемой реки и реки-аналога;

$A, A_{\text{а}}$ – площадь водосбора исследуемой реки и реки-аналога.

При этом необходимо учитывать различия в залесенности и распаханности исследуемого водосбора и аналога. Последнее возможно выполнить с помощью выявленных региональных зависимостей (см. рис. 1 – 3) путем определения поправочных коэффициентов на залесенность – $K_{\text{Л}}$ и распаханность – $K_{\text{р}}$ водосборов.

Если залесенность водосбора-аналога больше залесенности исследуемого водосбора, то

$$K_{\text{Л}} = \frac{q_0}{q_{0\text{а}}},$$

в обратном случае

$$K_{\text{Л}} = \frac{q_{0\text{а}}}{q_0},$$

где q_0, $q_{0\text{а}}$ – модули среднегодового стока соответственно исследуемой реки и аналога, полученные по уравнениям

$$q_0 = \frac{5{,}52}{f_л^{0{,}152}}$$

или

$$q_0 = \frac{5{,}61}{f_л^{0{,}117}}.$$

Аналогично необходимо вводить поправку на различия в распаханности водосборов, а именно:

$$K_р = \frac{q_0}{q_{0а}}$$

или

$$K_р = \frac{q_{0а}}{q_0},$$

где q_0, $q_{0а}$ – модули среднегодового стока соответственно исследуемого водосбора и аналога, полученные по уравнению

$$q_0 = \frac{6{,}23}{f_р^{0{,}123}}.$$

Отсутствие наблюдений за стоком малых рек на территории республики не позволяет провести анализ величин среднегодового стока этих водотоков для определения его истинного значения и установления расчетной шкалы поправок. При определении модуля среднегодового стока рек с площадью водосбора менее 100 км^2 можно использовать рекомендации [Исследования и расчеты…, 1980], в которых предлагается норму стока, полученную по карте, уменьшать на 10 – 20 %, при сильной залесенности водосбора – на 50 – 60 %.

1.4. Внутригодовое распределение стока

Реки республики по виду питания и водному режиму относятся к восточно-европейскому типу, характеризуются высоким длительным половодьем, пониженным стоком в летнюю и зимнюю межени и повышенным стоком в осенний период. Продолжительность половодья колеблется от 20 до 76 суток в зависимости от размеров бассейнов. Максимальный расход половодья в 10 – 25 раз выше среднего годового. Летние дождевые паводки обычно невелики и нечасты, осенние бывают почти ежегодно. Питание рек смешанное. Соотношение долей питания зависит от ландшафтных условий, но в основном соответствует распределению, характерному для рек лесостепной зоны: снеговое – 60 – 80 %, дождевое – до 10 и подземное – 15 – 30 %.

Внутригодовое распределение стока (по сезонам, месяцам) обычно выражается в процентах от величины годового стока. Установить закономерности внутригодового распределения стока рек республики важно с практической точки зрения для определения этого показателя для неизученных рек. Распределение стока в течение года в соответствии с климатическими факто-

рами и факторами подстилающей поверхности (степень озерности, заболоченности, лесистости, наличие карста) неравномерно. Это объясняется тем, что последние весьма существенно перераспределяют сток, обусловленный климатическими факторами.

Степень озерности и заболоченности ландшафтов Мордовии на распределение стока явного воздействия не оказывает ввиду незначительной доли озер и болот в бассейнах рек. Основное регулирующее влияние принадлежит таким факторам, как залесенность и величина площади водосбора, который сам по себе является регулятором стока как интегратор многих местных влияний (типа почв, уклонов, соотношения поверхностного и грунтового стока). Оба указанных фактора, как правило, снижают долю весеннего стока и увеличивают ее в летне-осенний и зимний периоды (рис. 8, 9). На реках республики, в бассейнах которых близко к поверхности расположены карстующиеся породы (верховья реки Алатырь, река Мокша в районе с. Пурдошки, г. Темникова), чаще всего наблюдается выравнивание стока в году за счет снижения весеннего и увеличения летне-осеннего и зимнего. Степень зарегулированности стока различна и зависит от ряда условий: площади карстовых ландшафтов в бассейне, интенсивности разгрузки подземных вод, русловых потерь стока и т. д. Обычно доля весеннего стока снижается на 10 – 15 %, летне-осеннего повышается на 5 – 12 %, а зимнего – на 2 – 5 %.

Под влиянием рассмотренных факторов в средние по водности годы 64 – 80 % годового стока рек республики приходится на весну (март – май), в летне-осенний период (июнь – ноябрь) сток составляет от 12 до 26 %, на долю зимы (декабрь – февраль) приходится 4 – 10 %.

Большое исследование, посвященное внутригодовому распределению стока, проведено «Мосгипроводхозом» [Исследования и расчеты..., 1980]. Данные по рекам рассматриваемой территории представлены в табл. 3. Они могут применяться в качестве аналога для неизученных бассейнов при решении общенаучных задач гидрологии и географии.

Таблица 3

Внутригодовое распределение стока

Река (пункт) площадь водосбора, км²	Характеристика года	Сток, % от годового												Среднегодовой расход, м³/с
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Мокша (Темников), 15 800	средний	2,0	1,9	3,6	62,2	13,2	3,4	2,3	2,0	1,9	2,2	2,7	2,6	54,6
	многоводный	2,2	1,9	10,0	68,6	7,4	3,0	1,4	1,0	1,1	1,1	1,3	1,0	86,4
	с наиболее низкой меженью	1,5	1,2	1,1	57,6	7,5	4,3	5,2	3,4	2,6	3,7	5,0	6,9	59,2
Исса (Паево), 1 790	средний	1,1	1,2	10,0	72,6	5,6	1,5	1,1	1,0	0,9	1,3	2,0	1,7	6,52
	многоводный	1,2	1,6	1,6	81,4	5,2	1,4	0,9	0,6	0,8	1,4	2,6	1,3	10,0
	с наиболее низкой меженью	1,3	0,9	15,4	64,5	9,4	2,8	0,6	0,7	0,8	2,2	0,5	0,9	2,15

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Сивинь (Сивинь), 1 060	средний	1,0	1,0	9,6	71,9	5,6	2,0	1,4	1,0	0,9	1,5	2,4	1,7	2,75
	многоводный	0,8	0,6	15,4	75,7	3,5	0,8	0,4	0,3	0,5	0,5	0,7	0,8	4,3
	с наиболее низкой меженью	2,9	1,5	31,2	51,2	4,8	0,7	0,5	0,3	0,5	1,5	2,0	2,9	6,32
Уркат (Урей 1-й) 402	средний	1,1	1,1	4,4	75,9	6,1	3,0	3,1	1,4	1,2	1,6	4,1	2,0	1,8
	многоводный	0,8	0,7	0,8	83,7	6,5	1,7	1,1	0,9	0,9	1,0	1,2	0,7	2,56
	с наиболее низкой меженью	1,0	1,1	28,2	48,2	5,7	1,8	1,8	1,6	1,9	2,6	2,5	2,7	1,04
Сатис (Росстанье), 1 230	средний	2,4	2,4	6,2	62,5	6,0	3,4	3,0	2,7	2,6	2,7	3,2	2,9	3,68
	многоводный	1,8	1,9	5,3	61,3	12,2	4,7	2,8	2,1	2,0	2,0	2,2	1,7	5,57
	с наиболее низкой меженью	2,8	2,6	7,3	55,7	6,6	2,7	3,4	2,7	2,8	3,1	6,0	4,3	2,92
Вад (Авдалово), 1 930	средний	2,3	2,2	8,7	59,4	9,6	2,8	2,0	1,8	1,9	2,7	3,6	3,0	7,25
	многоводный	3,0	2,2	31,8	49,0	4,9	2,2	0,8	1,0	0,7	1,4	1,8	1,2	12,2
	с наиболее низкой меженью	3,8	2,7	16,7	39,3	10,4	4,4	1,8	0,7	1,3	4,6	6,1	8,2	3,34
Виндрей (Леплеев-ское), 1 010	средний	1,5	1,4	11,1	65,5	6,5	2,1	1,7	1,5	1,5	2,2	2,6	2,4	3,43
	многоводный	1,8	1,5	39,2	44,1	5,6	2,1	0,8	0,8	0,7	1,3	1,3	0,8	4,75
	с наиболее низкой меженью	3,8	4,1	15,7	56,6	3,7	1,1	1,1	2,3	2,0	2,6	3,4	3,6	1,78
Сура (Кадышево), 27 900	средний	3,1	3,2	5,2	46,9	11,9	5,9	4,6	4,0	3,7	3,9	4,0	3,6	97,6
	многоводный	2,3	5,1	14,0	54,5	7,5	4,6	2,7	2,3	2,0	2,0	1,6	1,4	16,1
	с наиболее низкой меженью	3,5	3,4	4,4	39,3	13,1	6,3	5,1	5,0	5,2	5,5	5,2	3,9	46,7
Алатырь (Мадаево), 1 410	средний	1,0	1,0	5,0	73,6	5,9	2,7	2,2	1,7	1,2	1,6	2,3	1,8	5,14
	многоводный	0,8	0,6	5,3	71,7	12,7	3,2	1,7	0,9	0,8	1,0	1,2	0,7	7,79
	с наиболее низкой меженью	0,8	1,1	22,3	64,7	4,9	0,8	0,6	0,7	0,9	0,8	1,0	1,4	3,52
Алатырь (Тургенево), 11 000	средний	1,7	1,8	7,3	65,6	7,5	2,8	2,2	2,1	1,8	2,1	2,7	2,4	40,0
	многоводный	1,0	0,8	5,0	79,1	6,8	1,5	1,2	0,9	1,0	0,9	0,8	1,0	65,8
	с наиболее низкой меженью	1,5	1,5	1,6	64,3	11,3	2,0	1,8	2,1	2,4	4,1	4,7	2,7	15,9
Рудня (Дивеев Усад), 1 140	средний	1,1	0,9	8,5	69,8	5,3	2,1	1,8	1,4	1,2	1,8	4,5	1,6	4,6
	многоводный	0,6	0,7	0,6	79,0	4,8	2,0	2,3	1,0	0,9	1,8	5,3	1,0	6,4
	с наиболее низкой меженью	2,4	1,6	32,8	45,6	5,6	1,8	1,3	0,9	0,7	2,0	2,4	2,9	2,39
Инсар (Саранск), 1 610	средний	2,0	2,4	13,3	59,7	5,8	2,6	2,3	2,0	2,0	2,5	2,9	2,5	7,86
	многоводный	2,5	2,5	3,3	64,9	6,1	3,4	2,6	2,5	2,5	3,4	3,6	2,7	11,1
	с наиболее низкой меженью	1,6	8,1	50,0	31,6	3,7	1,4	0,6	0,6	0,6	0,8	0,7	0,3	10,4
Калыша (Васильев-ка), 166	средний	2,5	2,0	3,2	58,1	10,2	4,0	2,7	1,4	1,2	3,3	7,7	3,7	0,82
	многоводный	2,7	2,4	2,7	66,8	8,7	3,8	1,7	1,0	1,2	2,6	4,4	2,0	1,28
	с наиболее низкой меженью	1,6	1,2	3,8	72,8	7,2	2,8	1,8	1,3	1,7	2,1	2,1	1,7	0,33
Меня (Олевка), 329	средний	0,7	0,6	9,3	75,8	4,5	1,5	1,0	0,7	0,7	1,6	2,5	1,1	1,57
	многоводный	0,3	0,3	1,2	85,3	6,8	2,0	0,6	0,3	0,4	1,1	1,1	0,6	2,25
	с наиболее низкой меженью	1,6	0,7	14,5	69,2	4,9	0,8	0,5	0,4	0,3	1,1	4,4	1,6	1,53
Пьяна (Гагино), 2 880	средний	0,7	0,6	5,4	78,1	5,1	1,9	1,6	1,3	0,9	1,3	1,8	1,3	11,1
	многоводный	0,4	0,4	1,2	88,4	5,6	0,8	0,8	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	18,5
	с наиболее низкой меженью	0,8	0,3	25,8	64,1	3,4	1,2	0,8	0,6	0,3	0,5	1,0	1,2	5,55

Значительные исследования осуществлены Государственным гидрологическим институтом [Ресурсы..., 1973]. Их результаты можно применять для решения практических задач, связанных с использованием водных ресурсов рек республики (табл. 4), с учетом гидрологического районирования, которое произведено по степени естественной зарегулированности стока и разделяет исследованную территорию на два подрайона – Va и Vб (рис. 10).

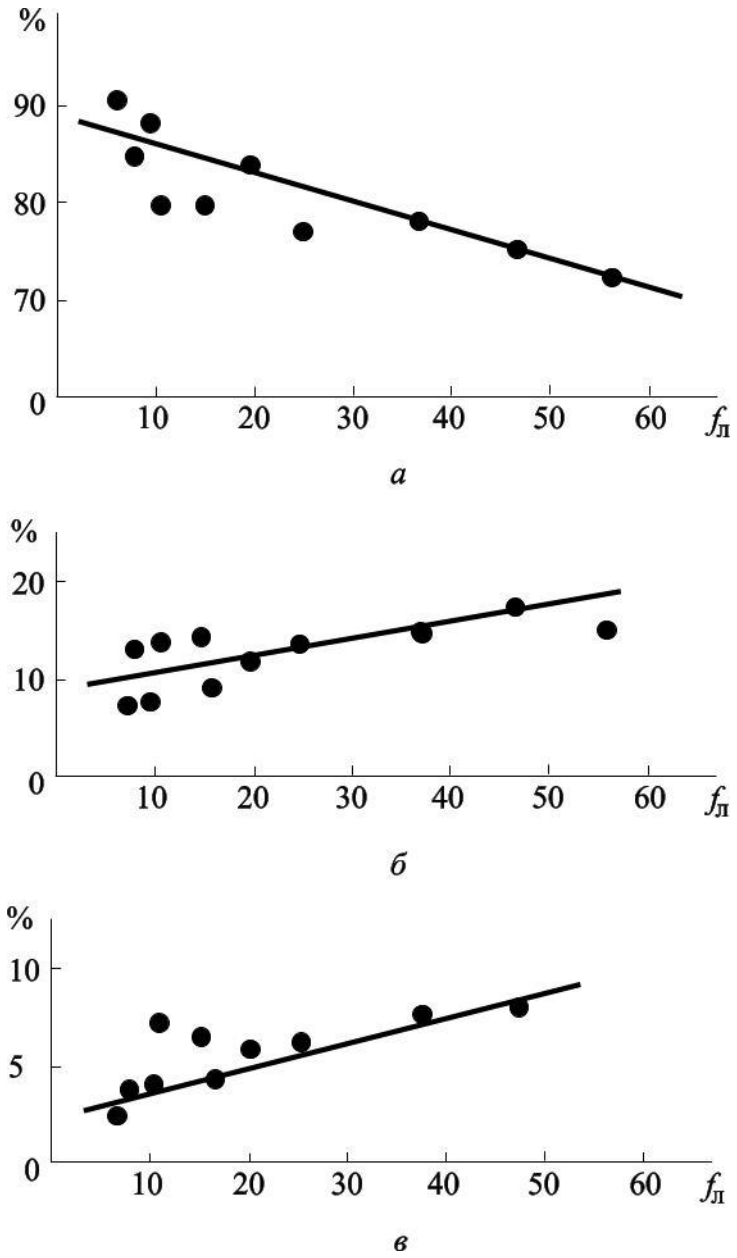
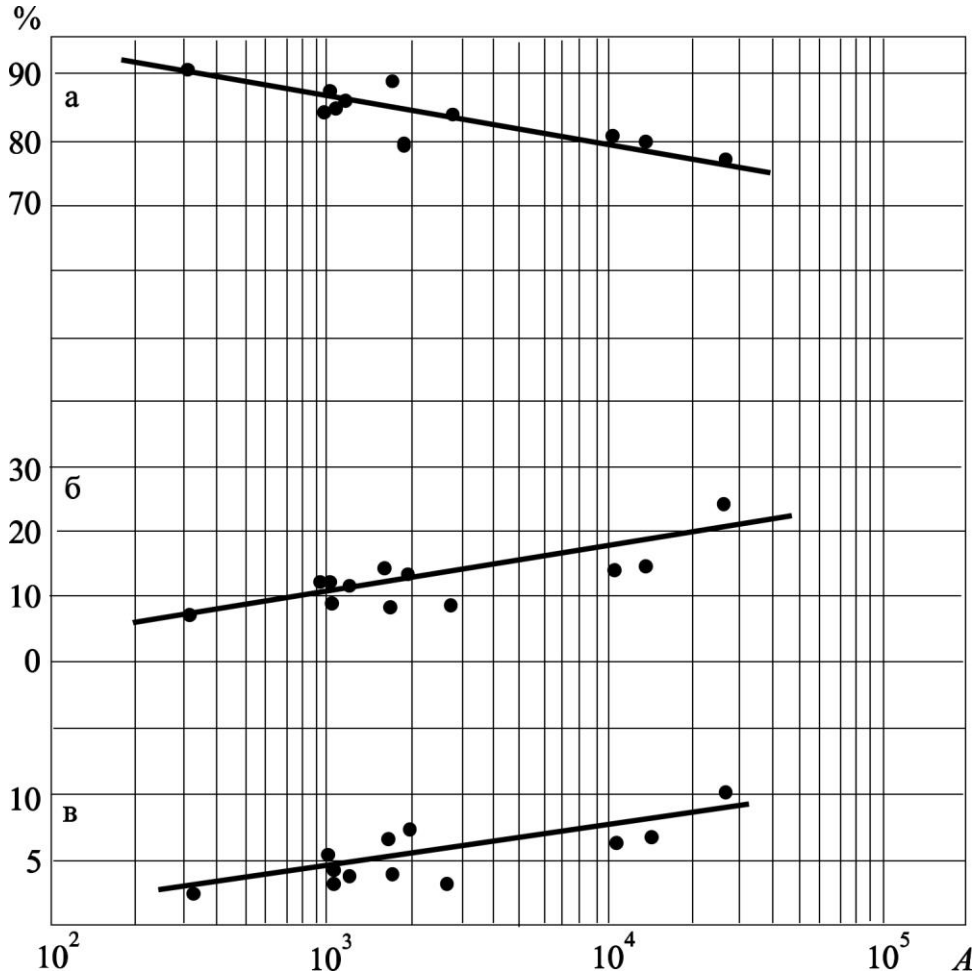
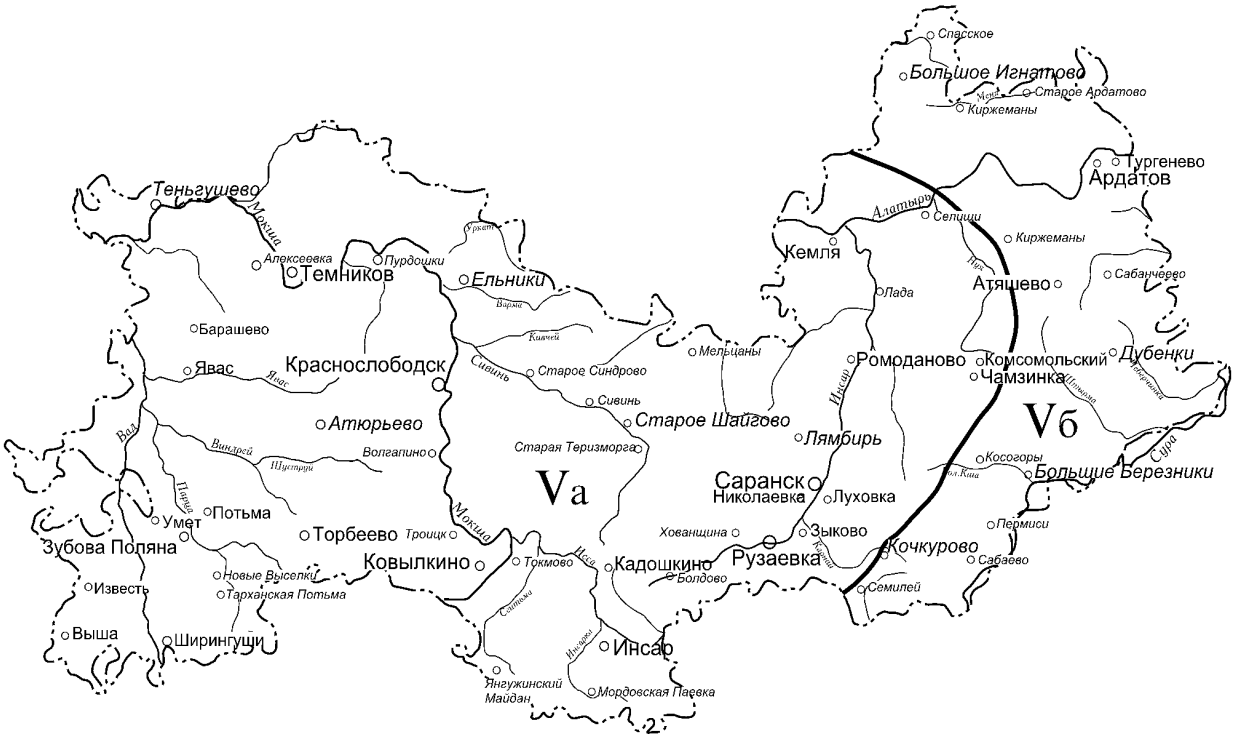


Рис. 8. Зависимость сезонного стока (% от годового) от залесенности водосборов: *а* – весна; *б* – лето – осень; *в* – зима



Р и с . 9. Зависимость сезонного стока (% от годового) от площади водосборов:
а – весна; *б* – лето – осень; *в* – зима



Р и с . 10. Гидрологические подрайоны:
Va – Мокшинский; Vб – Сурский

Таблица 4

Районное расчетное распределение стока по месяцам и сезонам, % от годового стока

Водность года	Месячный сток												Сезонный сток			
	Весна			Лето			Осень			Зима			Весна	Лимитир. период	Лето – осень	Зима
	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III–V	VI–II	VI–XI	XII–II
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Подрайон Va																
A = 100 км²																
Многоводный (25 %)	0,8	84,7	4,1	1,3	0,3	0,2	0,6	0,9	1,6	2,9	1,2	1,4	89,6	10,4	4,9	5,5
Средний (50 %)	16,6	73,5	1,8	1,1	0,2	0,1	0,2	1,5	1,0	2,7	0,6	0,7	91,9	8,1	4,1	4,0
Маловодный (75 %)	19,5	71,0	2,8	0,6	0,4	0,2	0,4	0,8	1,0	1,7	0,7	0,9	93,3	6,7	3,4	3,3
Очень маловодный (95 %)	19,6	71,0	2,8	0,6	0,4	0,2	0,4	0,7	0,9	1,7	0,7	1,0	93,4	6,6	3,2	3,4
A = 1 000 км²																
Многоводный (25 %)	2,6	71,0	11,0	2,6	1,8	1,2	0,9	1,4	2,2	3,2	1,2	0,8	84,7	15,3	10,1	5,2
Средний (50 %)	2,6	71,1	11,1	2,8	1,7	1,4	1,1	2,2	1,6	2,09	1,3	1,1	84,8	15,2	10,8	4,4
Маловодный (75 %)	2,6	71,2	11,1	3,4	1,7	1,3	1,3	1,6	2,0	1,5	1,2	1,1	84,9	15,1	11,3	3,8
Очень маловодный (95 %)	2,6	70,7	11,1	3,6	1,9	1,4	1,4	1,7	2,0	1,4	1,1	1,1	84,4	25,6	12,0	3,6
A=10 000 км²																
Многоводный (25 %)	2,9	62,0	14,7	3,6	2,5	2,0	1,6	2,0	2,3	2,8	1,9	1,7	79,6	20,4	14,0	6,4
Средний (50 %)	2,8	61,6	14,6	3,7	2,4	1,8	2,1	2,1	2,8	2,4	1,8	1,9	79,0	21,0	14,9	6,1
Маловодный (75 %)	2,8	61,0	14,4	3,9	2,6	1,9	2,2	2,3	3,0	2,3	1,7	1,9	78,2	21,8	15,9	5,9
Очень маловодный (95 %)	2,8	59,8	14,2	4,2	2,7	1,9	2,2	2,8	3,5	2,3	1,8	1,8	76,8	23,2	17,3	5,9
Подрайон Vб																
A = 100 км²																
Многоводный (25 %)	5,6	58,3	13,1	4,4	1,5	0,8	1,2	1,9	2,6	5,0	3,3	2,3	77,0	23,0	12,4	10,6
Средний (50 %)	5,9	61,3	13,8	2,2	1,5	0,9	0,4	1,8	2,9	4,4	2,9	2,0	81,0	19,0	9,7	9,3
Маловодный (75 %)	6,2	64,5	14,4	1,5	1,1	0,6	0,3	1,3	2,0	3,8	2,5	1,8	85,1	14,9	6,8	8,1
Очень маловодный (95 %)	6,6	68,1	15,3	0,8	0,6	0,3	0,2	0,7	1,1	3,0	2,0	1,3	90,0	10,0	3,7	6,3

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
A = 1 000 км²																
Многоводный (25 %)	3,5	50,4	9,9	6,1	4,7	4,3	3,9	4,9	4,0	3,1	2,5	2,7	63,8	36,2	27,9	8,3
Средний (50 %)	3,8	55,8	10,9	4,8	3,7	3,3	3,0	3,8	3,1	2,9	2,4	2,5	70,5	29,5	21,7	7,8
Маловодный (75 %)	3,8	56,4	11,0	4,7	3,6	3,3	3,0	3,8	3,1	2,7	2,2	2,4	71,2	28,8	21,5	7,3
Очень мало-водный (95 %)	3,9	56,6	11,1	4,7	3,7	3,3	3,0	3,9	3,1	2,5	2,0	2,2	71,6	28,4	21,7	6,7
A = 10 000 км²																
Многоводный (25 %)	4,1	51,6	11,3	5,5	4,1	3,6	3,3	4,0	3,4	3,6	2,8	2,7	67,0	33,0	23,9	9,1
Средний (50 %)	4,1	51,6	11,3	5,5	4,1	3,6	3,3	4,0	3,4	3,6	2,8	2,7	67,0	33,0	23,9	9,1
Маловодный (75 %)	4,1	51,3	11,2	5,5	4,2	3,7	3,3	4,0	3,4	3,7	2,9	2,7	66,6	33,4	24,1	9,3
Очень мало-водный (95 %)	3,9	50,0	10,9	5,8	4,4	3,9	3,5	4,3	3,6	3,8	3,0	2,9	64,8	35,2	25,5	9,7

Глава 2
МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ

2.1. Факторы формирования и норма слоя стока весеннего половодья

Весеннее половодье на территории Мордовии является фазой водного режима, на которую приходится основное количество годового стока (в средние по водности годы 64 – 90 %). Начало фазы половодья зависит от конкретной синоптической обстановки на тот или иной год. Следствие этого – разные сроки наступления рассматриваемого явления (табл. 5).

Таблица 5

Даты начала половодья на реках республики

Река (пункт)	Раннее	Среднее	Позднее
Мокша (Темников)	12.03	02.04	16.04
Исса (Паево)	07.03	31.03	13.04
Сивинь (Сивинь)	08.03	01.04	18.04
Вад (Авдалово)	11.03	31.03	14.04
Виндрей (Леплеевское)	08.03	01.04	16.04
Алатырь (Тургенево)	07.03	30.03	15.04
Инсар (Саранск)	14.03	29.03	09.04

Средняя дата пика половодья приходится на 10 апреля; в ранние весны, которые чаще всего бывают маловодными, он наступает на 5 – 10 дней раньше; поздние даты, характерные для многоводных лет, на 10 – 15 дней запаздывают по сравнению со средними. Продолжительность половодья в основном зависит от величины бассейна, его залесенности, заболоченности, озерности, характера весны и колеблется от 20 до 76 дней.

Сток в период половодья в основном зависит от процесса снеготаяния, и его величина в первую очередь определяется запасами воды в снеге. Средняя величина запасов воды в снежном покрове для ландшафтов Мордовии равна 100 мм. В распределении запасов воды в снеге по водосборам рек большое значение имеют местные факторы – рельеф, растительность, преобладающее направление ветров. Распределение среднего многолетнего слоя весеннего половодья в основном согласуется с распределением максимальных запасов воды в снежном покрове.

Анализ условий, характеризующих весенний сток, показал, что высокие половодья формируются при наличии больших запасов воды в снеге (более 140 мм), холодной зимы и позднего дружного снеготаяния. За период наблюдений на реках республики большие половодья наблюдались в 1941, 1942, 1946, 1947, 1948, 1950, 1955, 1957, 1961, 1963, 1964, 1968, 1970, 1979, 1981, 1997 гг. Самое мощное из них зафиксировано в 1963 г.

Различия в формировании половодья зависят от величины потерь талого стока, на которых сказываются запасы воды в почве, ее промерзание, потери на испарение, поверхностное задержание на водосборах, а также от морфологии ландшафтов бассейнов. Особую роль в этом играют степень залесенности водосборов, их заболоченность, наличие карстовых областей, различие в геоморфологических условиях.

Показательным примером может служить полученная нами эмпирическая зависимость нормы слоя весеннего половодья от залесенности водосборов (рис.11). Этот показатель уменьшается с увеличением площади леса на водосборах, за исключением р. Уркат и верховьев р. Алатырь, которые находятся в карстовых ландшафтах. Явно прослеживается и зависимость модуля максимального половодья 1% вероятности превышения от залесенности и заболоченности бассейнов (рис.12).

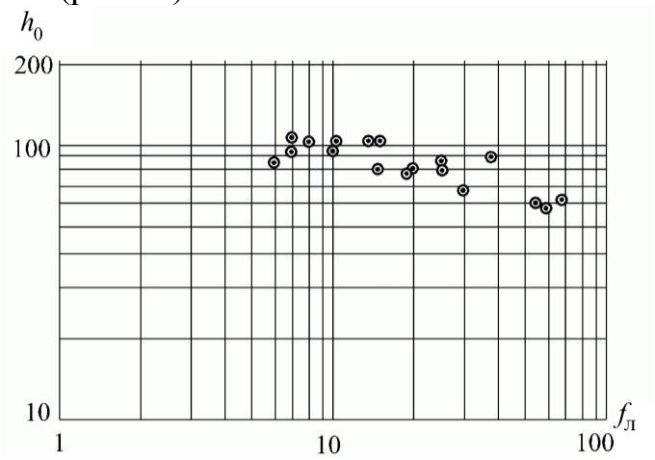


Рис. 11. Зависимость нормы слоя весеннего половодья от залесенности

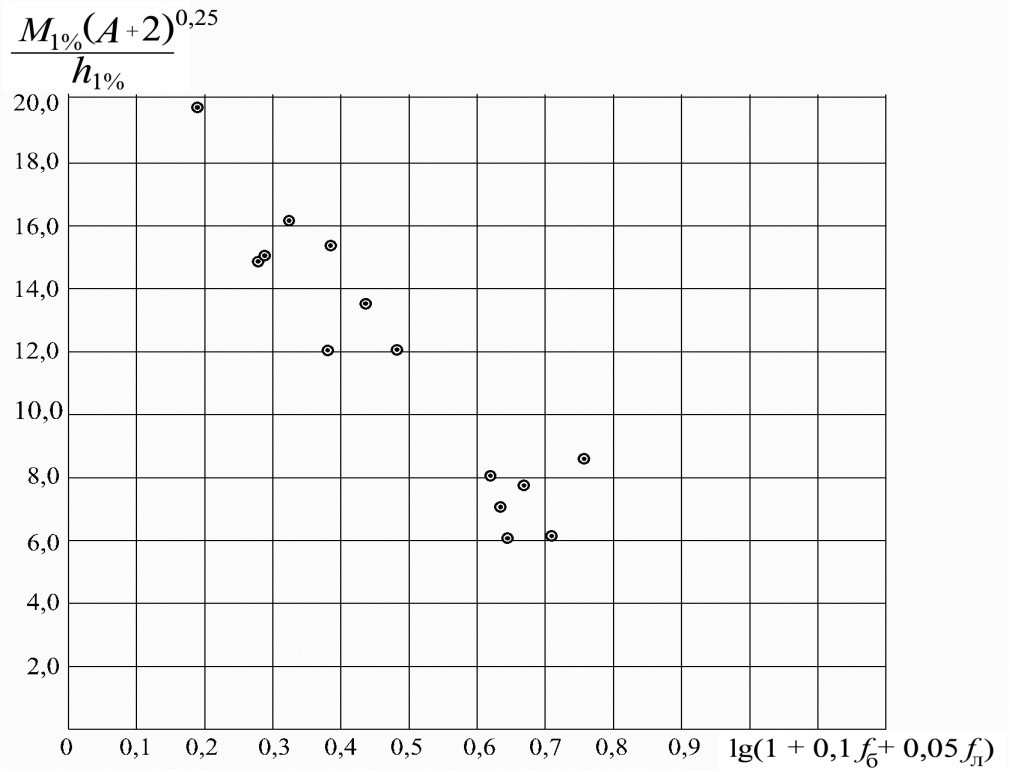


Рис. 12. Зависимость максимального модуля стока ($P = 1\%$) весеннего половодья от залесенности и заболоченности

Модули максимального стока слоя половодья с увеличением площади водосбора уменьшаются, хотя этот показатель по некоторым рекам региона не подчиняется общей закономерности (при близких площадях бассейна они имеют отличающиеся величины максимальных модулей). Установить, под влиянием каких факторов это происходит, не удалось. Очевидно, основным фактором является не столько площадь водосбора, сколько различия в процессах снеготаяния, инфильтрационной способности почв, в геоморфологических характеристиках рек и их пойм. Средний слой весеннего половодья по рекам региона и граничащих с ним территорий был рассчитан по 21 пункту, ряды наблюдений приведены к многолетнему периоду (табл. 6).

Таблица 6

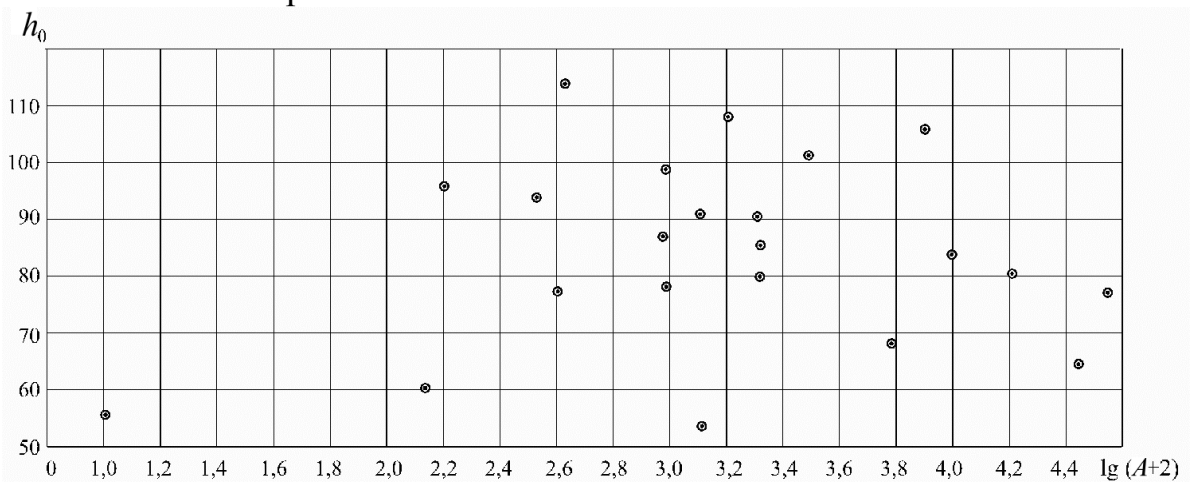
Слой стока весеннего половодья различной обеспеченности

Река (пункт)	Площадь водосбора, км²	Средний слой, мм	C_v	C_s	$\frac{C_s}{C_v}$	Слой стока половодья, мм, обеспеченностью Р, %				
						1	2	3	5	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Мокша (Темников)	15 800	82	0,37	0,32	0,86	160	149	143	134	122
Мокша (Шевелевский Майдан)	28 600	78	0,42	0,90	2,10	175	160	151	139	122
Исса (Паево)	1 790	92	0,37	0,31	0,84	178	167	160	151	137
Сивинь (Сивинь)	1 060	102	0,38	0,11	0,29	195	184	176	167	152
Уркат (Урей 1-й)	402	117	0,40	0,43	1,08	240	223	213	199	179
Сатис (Росстанье)	1 230	56	0,37	0,80	2,16	116	107	101	94	84
Вад (Авдалово)	1 930	88	0,42	0,40	0,95	184	172	163	153	137
Виндрей (Леплеевское)	1 010	80	0,37	0,00	0,00	149	140	136	129	118
Калыша (Васильевка)	166	97	0,55	0,30	0,55	233	215	204	189	167
Сура (Кадышево)	27 900	66	0,39	0,78	2,00	140	129	122	113	100
Алатырь (Тургенево)	11 000	86	0,45	0,60	1,33	192	177	168	146	137
Инсар (Саранск)	1 610	108	0,32	1,00	3,13	212	196	186	173	154
Рудня (Дивеев Усад)	1 140	102	0,40	0,10	0,25	200	188	180	170	155
Штырма (Черная Промза)	398	79	0,50	0,61	1,22	188	172	163	150	132
Синяш (Сабаево)	138	62	0,52	1,00	1,92	159	144	135	120	105
Бездна (Сальный)	1 120	88	0,45	0,50	1,11	194	179	170	158	140
руч. Веселый Дунай (Веселовка)	8,4	57	0,55	1,00	1,82	152	137	128	116	99

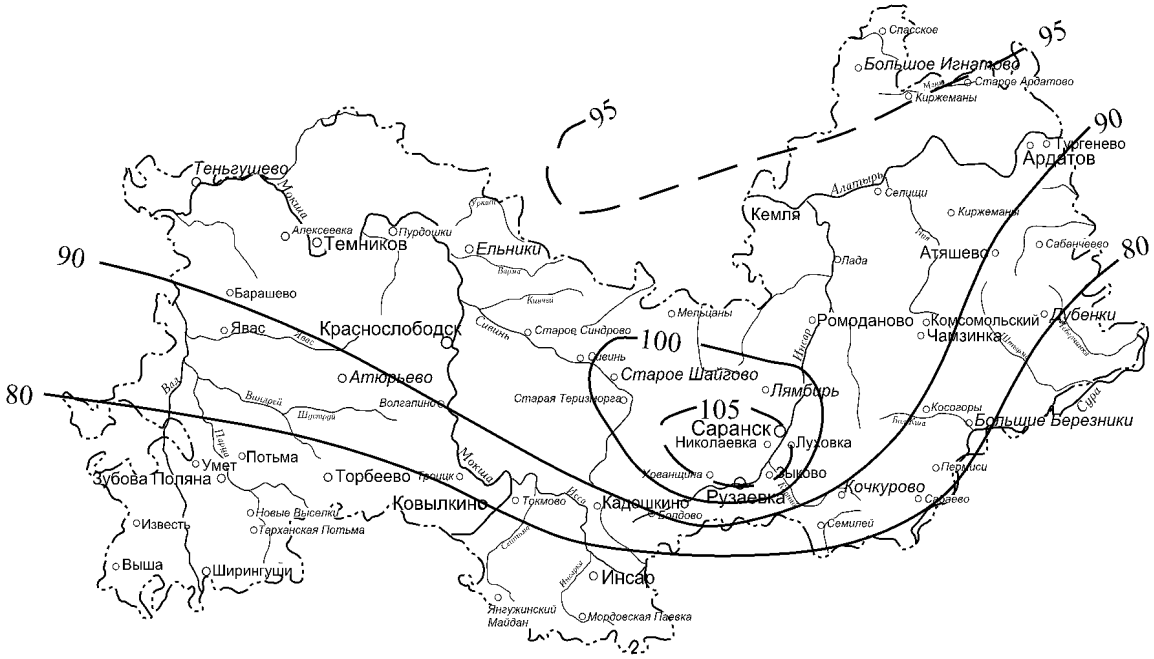
Окончание табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пьяна (Гагино)	2 880	104	0,42	0,50	1,19	221	205	195	181	162
Меня (Олевка)	329	95	0,45	0,50	1,11	210	194	184	171	151
Выша (10-й Октябрь)	2 190	81	0,43	0,00	0,00	162	151	146	138	126
Алатырь (Мадаево)	1 410	92	0,34	0,68	2,00	180	166	159	149	134

Анализ показал, что между средним многолетним слоем стока весеннего половодья и площадью водосбора связь отсутствует (рис. 13). Поэтому слой весеннего половодья представлен нами в виде изолиний нормы слоя стока (рис. 14). Его норма увеличивается с юга на север, повышенные значения наблюдаются в бассейнах рек Инсар, Сивинь, Уркат, пониженные – в бассейнах рек Сатис, Сарма, что связано с их достаточно высокой залесенностью и наличием карста.



Р и с . 13. Зависимость нормы слоя стока весеннего половодья от площади водосбора



Р и с . 14. Норма слоя стока весеннего половодья, мм

Для определения нормы стока в указанных районах к величине, полученной по карте, следует вводить понижающий коэффициент $K = 1{,}6$. Норму стока в бассейне р. Уркат необходимо увеличить на 1,24. Для площадей водосборов менее 150 км² значения нормы слоя весеннего стока за половодье, снятое с карты, необходимо снижать на 15 – 20 %, а для сильно залесенных водосборов (более 50 %) – на 40 – 50 %.

2.2. Изменчивость стока весеннего половодья

Многолетние колебания слоя весеннего стока характеризуются коэффициентом изменчивости C_V, который на реках республики варьирует в пределах от 0,32 до 0,55. Наибольшие показатели относятся, как правило, к малым и залесенным водосборам (реки Калыша, Сивинь, Штырма), в среднем коэффициент вариации равен 0,40. Поскольку четкая связь между ним и площадью водосбора отсутствует (рис. 15), коэффициент вариации слоя стока весеннего половодья целесообразно отобразить на карте (рис. 16).

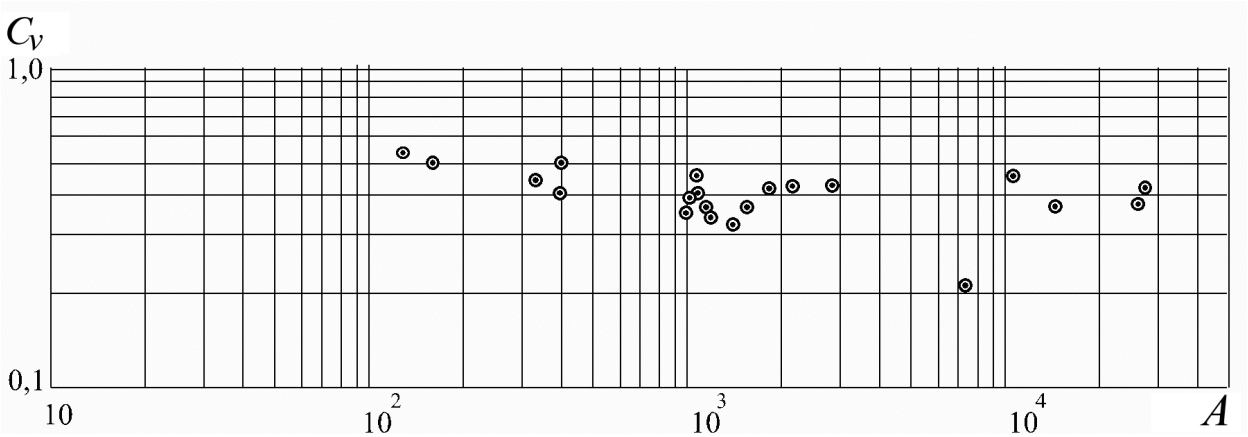


Рис. 15. Зависимость коэффициента вариации слоя стока весеннего половодья от площади водосбора

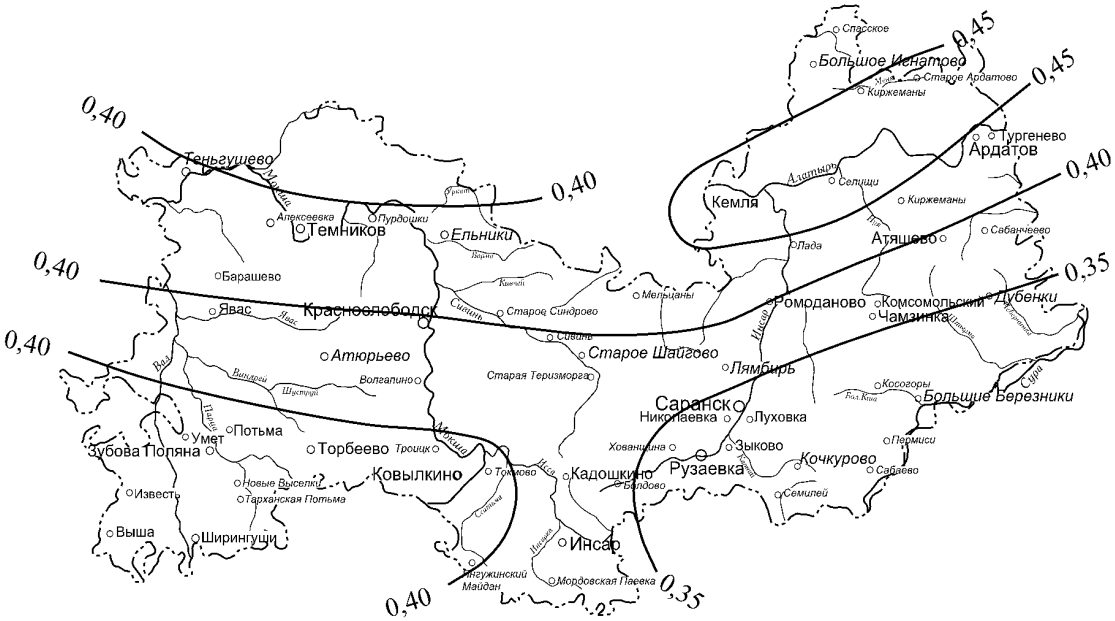


Рис. 16. Коэффициент вариации слоя стока весеннего половодья

В практических расчетах для малых водосборов (от 150 до 500 км²) рекомендуется вводить поправочные коэффициенты (от 1,30 до 1,42), учитывающие повышение изменчивости стока на малых водосборах. Коэффициенты асимметрии C_S на реках региона имеют значения от 0 до 1, отношения C_S/C_V – от 1 до 3. При определении этого соотношения при практических расчетах для неизученных рек рекомендуется принимать его как среднее из значений, установленных для группы рек в гидрологически однородном районе.

2.3. Максимальные расходы воды весеннего половодья

Максимальные расходы воды весеннего половодья наблюдаются обычно в конце марта – середине апреля. Эти данные по 20 пунктам за период от 40 до 62 лет приведены в табл. 7.

Таблица 7

Максимальный расход воды весеннего половодья различной обеспеченности

Река (пункт)	Площадь водосбора, км²	Средний расход**	C_v	C_s	$\frac{C_s}{C_v}$	Максимальный расход, м³/с, обеспеченностью Р, %				
						1	2	3	5	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Мокша (Темников)*	15 800	1200 / 0,076	0,58	1,10	1,9	3 340	2 996	2 770	2 500	2 120
Мокша (Шевелевский Майдан)*	28 600	1500 / 0,052	0,61	1,40	2,3	4 500	3 980	3 680	3 300	2 740
Исса (Паево)*	1 790	272 / 0,152	0,43	0,90	2,0	619	564	532	490	429
Сивинь (Сивинь)*	1 060	231 / 0,218	0,43	1,00	2,3	531	483	455	418	364
Уркат (Урей 1-й)	402	87,1 / 0,217	0,66	1,22	1,9	269	238	220	198	164
Сатис (Росстанье)	1 230	141 / 0,115	0,51	0,17	0,3	318	296	281	263	234
Вад (Авдалово)*	1 930	235 / 0,122	0,55	1,10	2,0	638	568	532	481	410
Виндрей (Леплеевское)*	1 010	169 / 0,167	0,54	0,90	1,7	440	397	370	338	290
Выша (10-й Октябрь)	2 190	235 / 0,107	0,58	0,96	1,7	642	578	540	490	418
Сура (Кадышево)*	27 900	1460 / 0,052	0,58	1,20	2,1	4 100	3 679	3 420	3 100	2 600
Алатырь (Мадаево)	1 410	228 / 0,162	0,58	1,30	2,2	652	581	537	485	405
Алатырь	11	1110	0,61	1,10	1,8	3 220	2 857	2 660	2 400	2 030

(Тургенево)*	000	0,101								

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Инсар (Саранск)*	1 610	332 / 0,206	0,6	2,00	3,3	1 050	912	830	730	590
Пьяна (Гагино)*	2 880	496 / 0,172	0,44	0,9	2,0	1 140	1 042	982	903	789
Рудня (Дивеев Усад)	1 140	193 / 0,169	0,47	0,94	2,0	464	422	396	363	315
Меня (Олевка)	329	93,7 / 0,285	0,60	1,1	1,8	267	239	222	200	169
Штырма (Черная Промза)	398	79,1 / 0,199	0,70	1,4	2,0	260	229	210	187	153
Синяш (Сабае-во)	138	13,2 / 0,096	0,80	0,8	1,0	43,7	39	36,2	32,6	27,4
Калыша (Васильевка)	166	20,2 / 0,122	0,58	1,1	1,9	56,4	50,4	46,9	42,3	35,9
Мокша (Кочелаево)	7 390	654 / 0,088	0,43	0,86	2,0	1 475	1 349	1 273	1 174	1 031

* Данные взяты из книги [Исследования и расчеты..., 1980], кроме расходов 2% вероятности превышения.

** В числителе – средний расход, м³/с, в знаменателе – средний модуль, м³/с•км².

2.4. Практические приемы расчета слоя стока и максимальных расходов воды весеннего половодья при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений

Современные методы расчета слоя стока весеннего половодья основаны на анализе данных гидрометрических наблюдений по опорным водомерным постам рек республики. Для неизученных створов можно предложить следующие методы расчетов:

– с помощью карт параметров слоя стока и коэффициента его вариации;

– с применением аналога.

При использовании вышеприведенных карт нормы слоя весеннего половодья и карты коэффициента вариации (см. рис. 14, 16) определение этих параметров производится прямой интерполяцией. Соотношение C_s / C_v определяется по результатам обобщений по наиболее продолжительным рядам наблюдений по гидрометрическим постам, находящимся в одной ландшафтной зоне с исследуемой рекой (см. табл. 6). При использовании этого метода необходимо учитывать влияние местных факторов формирования весеннего стока (уклоны водосборов, их залесенность, заболоченность и распа-

ханность). Для рек лесостепных зон региона с площадью водосбора менее 200 км^2 в значение слоя стока вводится поправка K', учитывающая разницу в уклонах водосборов. Она определяется по эмпирической региональной зависимости

$$K' = 0{,}2\, J_{\text{в}}^{0{,}43},$$

где $J_{\text{в}}$ – средневзвешенный уклон водосбора, ‰.

При выполнении расчетов с применением аналога, имеющего залесенность, отличную от исследуемого водосбора, к слою стока аналога вводится поправка $K_{\text{л}}$. При равных значениях залесенности аналога и исследуемого водосбора $K_{\text{л}} = 1{,}0$; при $f_{\text{ла}} > f_{\text{л}}$ $K_{\text{л}} = \dfrac{h_0}{h_{0\text{а}}}$, при $f_{\text{ла}} < f_{\text{л}}$ $K_{\text{л}} = \dfrac{h_{0\text{а}}}{h_0}$,

где h_0 и $h_{0\text{а}}$ – норма слоя стока весеннего половодья исследуемого водосбора и водосбора-аналога, мм;

$f_{\text{л}}$ и $f_{\text{ла}}$ – залесенность исследуемого водосборов и аналога, %.

Норма слоя стока половодья исследуемого водосбора и аналога определяется по приведенной выше зависимости $h_0 = f(f_{\text{л}})$ (см. рис. 11), которая аппроксимируется уравнением

$$h_0 = \frac{177}{f_{\text{л}}^{0{,}246}}.$$

Поправка к слою стока половодья, определенному по аналогу, при различной степени распаханности аналога и исследуемого водосбора $K_{\text{р}}$ определяется: при $f_{\text{ра}} > f_{\text{р}}$ $K_{\text{р}} = \dfrac{h_0}{h_{0\text{а}}}$, при $f_{\text{ра}} < f_{\text{р}}$ $K_{\text{р}} = \dfrac{h_{0\text{а}}}{h_0}$,

где $f_{\text{р}}$ и $f_{\text{ра}}$ – распаханность исследуемого водосбора и аналога, %.

Норма слоя стока половодья исследуемого водосбора и аналога определяется по региональной эмпирической зависимости вида

$$h_0 = \frac{113}{f_{\text{р}}^{0{,}066}}.$$

Коэффициент вариации C_v и соотношение C_s / C_v при данном методе расчета следует принимать по выбранному аналогу, при площадях водосборов менее 200 км^2 к коэффициенту вариации следует вводить поправку

$K = 1{,}25$ при площади водосбора 0 – 50 км^2;

$K = 1{,}25 - 1{,}20$ при площади водосбора 51 – 100 км^2;

$K = 1{,}20 - 1{,}05$ при площади водосбора 100 – 200 км^2.

Методика расчета максимальных расходов воды весеннего половодья по эмпирическим региональным зависимостям основана на базе исходных данных по максимальным расходам воды весеннего половодья рек региона. В

результате анализа фактического материала наблюдений выявлены эмпирические зависимости максимального расхода воды от площади водосбора. Они аппроксимируются уравнениями параболы:

– для бассейна реки Мокши

$$Q_0 = 2{,}04\,A^{0{,}646}$$

(действительно в пределах водосборов 400 – 30 000 км^2),

— для бассейна реки Суры

$$Q_0 = 0{,}732\,A^{0{,}812}$$

(действительно в пределах водосборов 100 – 10 000 км^2), где Q_0 – средний максимальный мгновенный расход воды весеннего половодья, м^3/с; A – площадь водосбора, км^2.

Коэффициент вариации максимального расхода воды рек региона имеет значения от 0,42 до 0,80. Как правило, большие значения присущи рекам с малыми водосборами, отличающимся большой естественной зарегулированностью стока. Для определения коэффициентов вариации неизученных рек нами выявлены эмпирические зависимости вида

$$C_v M_0 = f(A),$$

где C_v – коэффициент вариации максимального расхода воды весеннего половодья; M_0 – среднемноголетний максимальный модуль стока (мгновенный) весеннего половодья, м^3/с•км^2.

Зависимости аппроксимируются уравнением гиперболы:

— для бассейна реки Мокши

$$C_v M_0 = \frac{2{,}02}{A^{0{,}45}}$$

(действительно в пределах водосборов 400 – 10 000 км^2);

— для бассейна реки Суры

$$C_v M_0 = \frac{0{,}888}{A^{0{,}287}}$$

(действительно в пределах водосборов 300 – 112000 км^2).

$$C_v M_0 = \frac{0{,}65}{A^{0{,}434}}$$

(действительная в пределах водосборов 100 – 300 км^2).

Коэффициент асимметрии максимального расхода варьирует в пределах от $2C_v$ до $2{,}2C_v$.

При расчете максимальных расходов воды весеннего половодья на исследуемой территории кроме указанного выше метода целесообразно использовать редукционную формулу СП 33–101–2003 [Определение… 2003], которая, как показала практика эксплуатации гидротехнических сооружений,

может использоваться на водосборах от элементарно малого (менее 1 км^2) до 20 000 км^2. Формула имеет вид:

$$QP_{\%} = \frac{K_0 hP_{\%} \mu \delta \delta_1 \delta_2 A}{(A + A_1)^n},$$

где $QP_{\%}$ – расчетный мгновенный максимальный расход воды, весеннего половодья заданной ежегодной вероятностью превышения $P\%$, м^3/сек;

K_0 – параметр, характеризующий дружность весеннего половодья;

$hP_{\%}$ – расчетный слой суммарного весеннего стока (без срезки грунтового питания) ежегодной вероятностью превышения $P_{\%}$, в мм;

μ – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов воды, районированный по физико-географическим районам республики [Ямашкин, 1998].

Таблица 8

Значения коэффициента μ

Физико-географический район	$P_{\%}$								
	0,1	1	3	5	10	25	50	75	95
Лесные Мещерская и Северо–Приволжская провинции	1,02	1,0	0,97	0,96	0,93	0,90	0,86	0,82	0,82
Лесостепная Приволжская провинция	1,04	1,0	0,96	0,93	0,89	0,80	0,72	0,64	0,58

δ – коэффициент, учитывающий влияние водохранилищ, прудов и проточных озер;

δ_1 – коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в залесенных бассейнах;

δ_2 – коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в заболоченных бассейнах при распаханности водосборов в лесной и лесостепной зоне в структуру вышеуказанной формулы вводится поправка δ_3: $\delta_3 = 1{,}0$ при $A < 50$ км2; $\delta_3 = 0{,}9$ при $A \geq 70$ км2; при расчетной вероятности превышения $P < 5\%$ поправка не вводится;

A_1 - дополнительная площадь водосбора, км^2;

n - показатель степени редукции.

Согласно СП 33 101 2003 показатель степени редукции n и параметр A_1 следует определять на основе зависимости $q_{\max} = f(A)$ по данным наблюдений на изученных реках региона. Построение этой зависимости (рис.17), несмотря на расположение точек широкой полосой, позволило определить среднее их значение для всего рассматриваемого региона в целом: $A_1 = 2{,}0$; $n = 0{,}25$. Последнее подтверждается исследованиями Д. Л. Соколовского

[1968] и трудами Государственного гидрологического института [Ресурсы…, 1973].

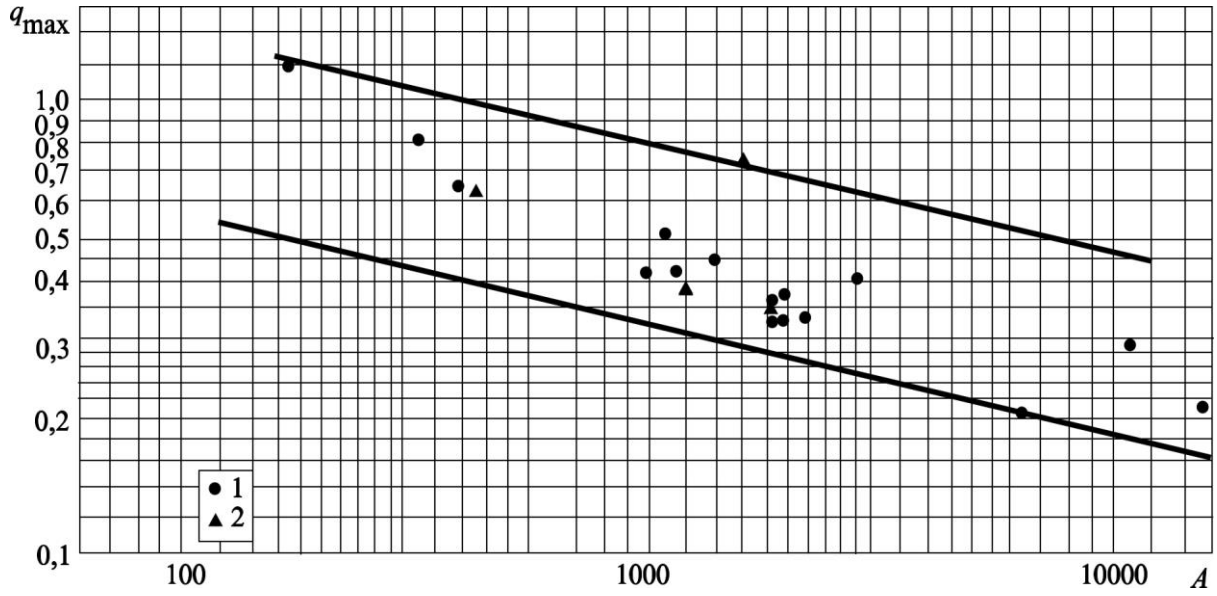


Рис. 17. Зависимость максимальных модулей весеннего стока от площади водосбора: 1 – лесная провинция; 2 – лесостепная провинция

Коэффициент δ определяется по формуле

$$\delta = \frac{1}{(1 + Cf_{\text{оз}})},$$

где C – коэффициент, определяемый в зависимости от нормы слоя стока ($C = 0{,}2 \div 0{,}4$).

Коэффициент δ_1 определяется по региональной зависимости

$$\delta_1 = 1 - 0{,}8\lg(0{,}05 f_{\text{л}} + 1).$$

Коэффициент δ_2, определяется по формуле

$$\delta_2 = 1 - \beta\lg(0{,}1 f_{\text{б}} + 1),$$

где $f_{\text{б}}$ – относительная площадь болот и заболоченных лугов в бассейне, %; β – эмпирический коэффициент, зависящий от преобладающего типа болот на водосборе и механического состава почвогрунтов. Коэффициент β для низинных болот равен 0,8, верховых – 0,3 – 0,5 и болот разных типов – 0,7.

Одним из основных элементов рассматриваемой формулы является параметр K_0. Явной зависимости его величины от факторов, влияющих на формирование стока весеннего половодья (площадь водосбора, распаханность, средневзвешенный уклон), нами не отмечено (рис. 18 – 20), достаточно высокая корреляция наблюдается по связи K_0 с залесенностью бассейна (рис. 21 – 22). Выявленная зависимость $K_0 = f(f_{\text{л}})$ неоднозначна: для лесных провинций региона она выражается уравнением

$$K_0 \cdot 10^3 = \frac{15{,}5}{f_л^{0{,}16}};$$

для провинции лесостепи –

$$K_0 \cdot 10^3 = \frac{21{,}3}{f_л^{0{,}14}};$$

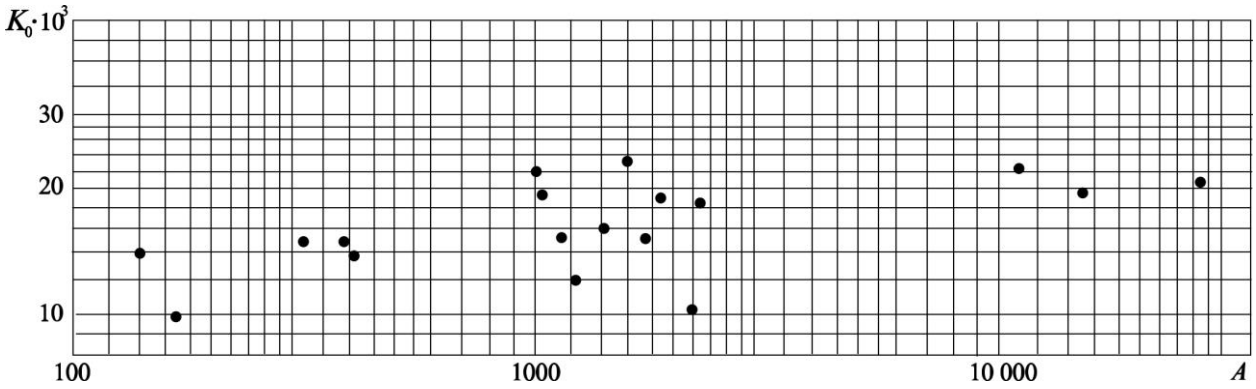


Рис. 18. Зависимость $K_0 = f(A)$

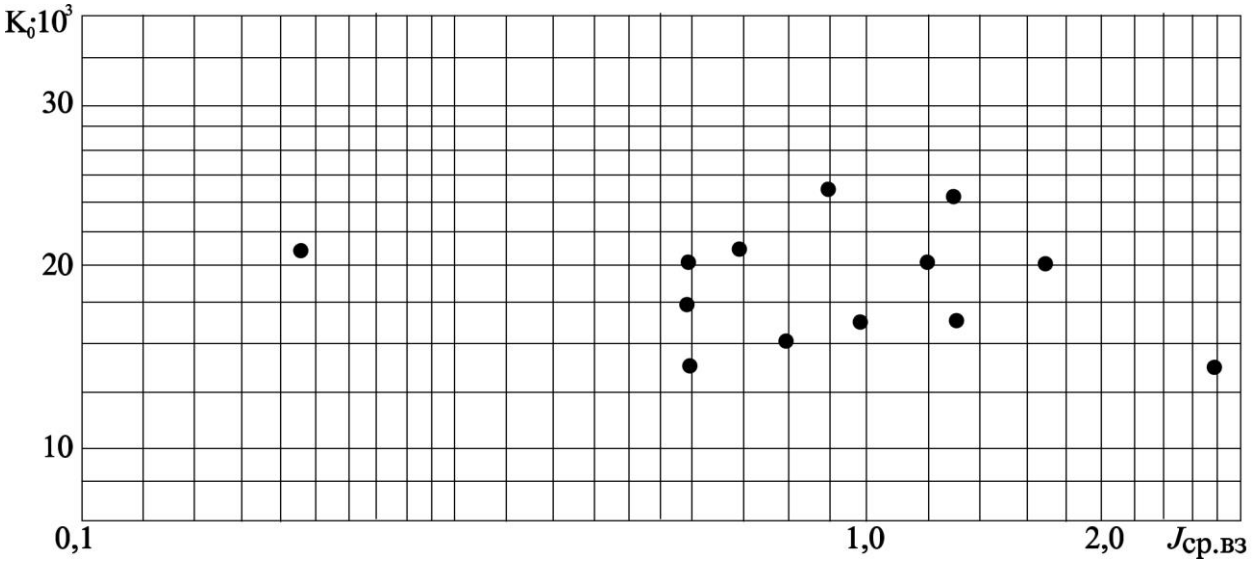


Рис. 19. Зависимость $K_0 = f(J_{ср.вз})$

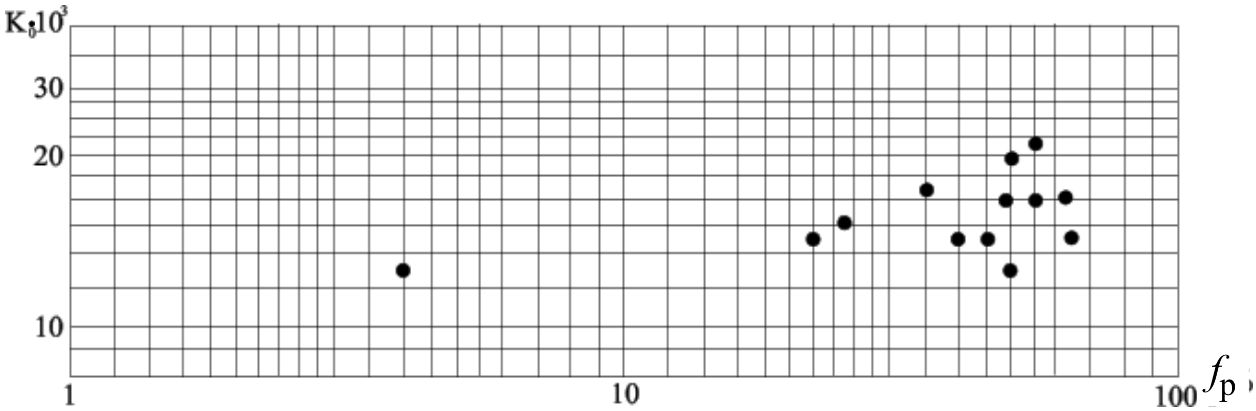


Рис. 20. Зависимость $K_0 = f(f_р)$

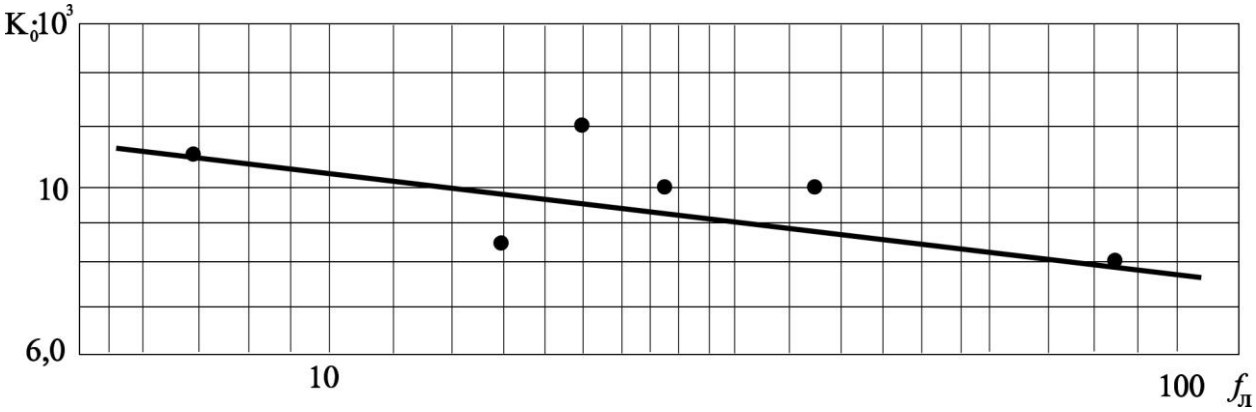


Рис. 21. Зависимость $K_0 = f(f_л)$ в лесных повинциях

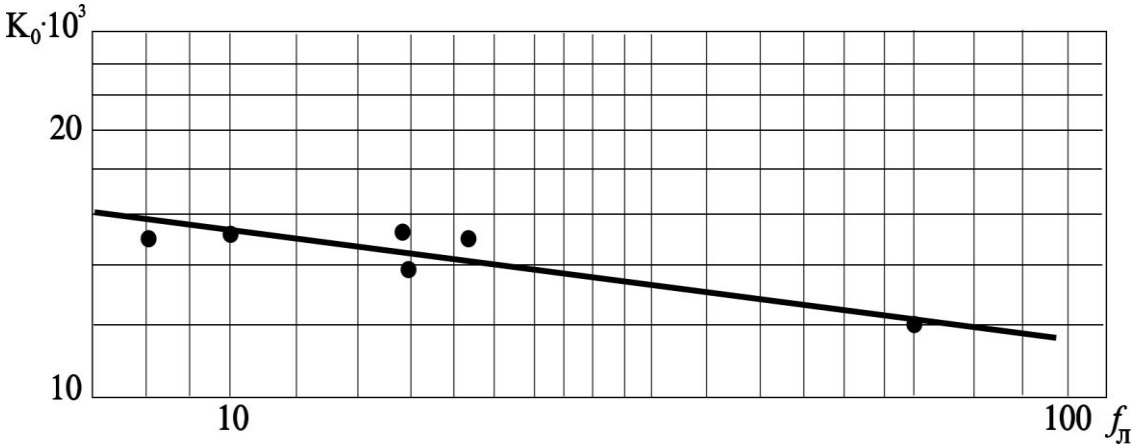


Рис. 22. Зависимость $K_0 = f(f_л)$ в лесостепных провинциях

Вычисленные по данным наблюдений параметры дружности весеннего половодья для рек региона имеют диапазоны значений от 0,0055 до 0,023. В лесных провинциях (Мещерская, Северо-Приволжская) его величина колеблется в пределах от 0,0055 до 0,012 (за исключением зоны активного влияния карста), в лесостепной Приволжской провинции – от 0,012 до 0,023 (рис. 23). Различия значений параметра K_0 внутри провинций объясняются тем, что согласно физико-географическому районированию территории республики [Ямашкин, 1998] лесная провинция представлена ландшафтами смешанных лесов водно-ледниковых равнин, в свою очередь разделенных на районы водно-ледниковых равнин и волнистых междуречных пространств с карстовыми формами рельефа, которые отличаются по геологическим, гидрогеологическим и геоморфологическим условиям.

Этим же можно объяснить различия K_0 в лесостепной Приволжской провинции, которая по классификации А. А. Ямашкина [1998], представлена лесостепными ландшафтами эрозионно–денудационных равнин, включающих останцово-водораздельные массивы, холмистые водораздельные про-

странства, поверхности придолинных склонов и территориальные комплексы долинных ландшафтов (террасовые поверхности).

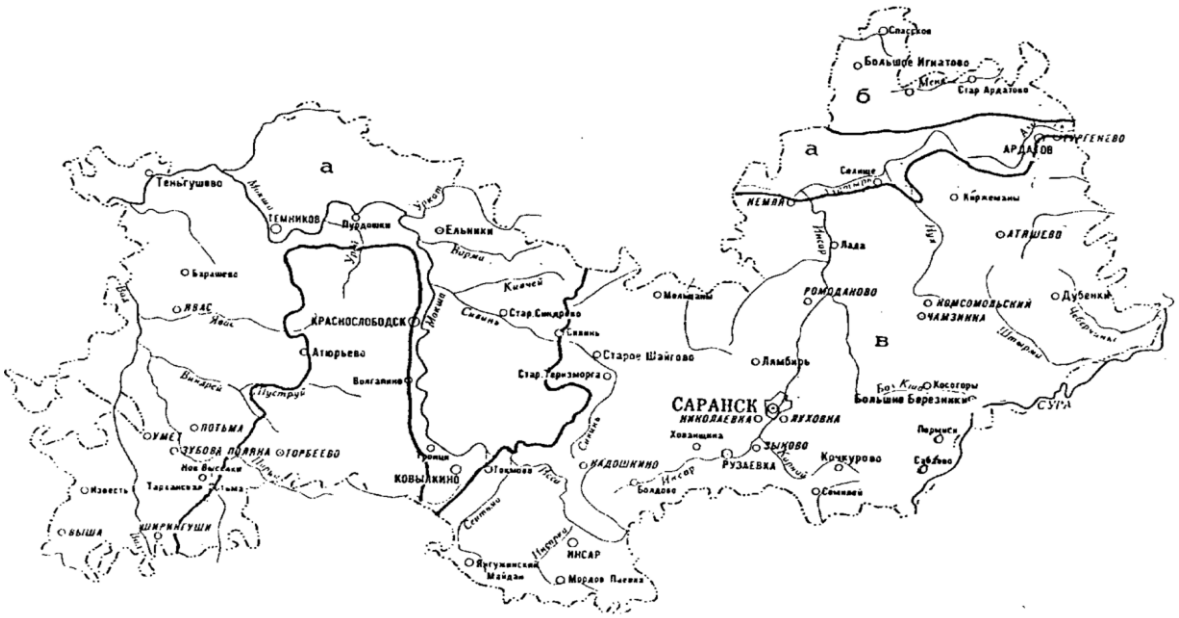


Рис.23. Схема физико-географического районирования:
а – лесная Мещерская провинция; б – лесная Северо-Приволжская провинция;
в – лесостепная Приволжская провинция

С учетом изложенного необходимо отметить, что методология расчетов максимального стока должна опираться на географо-гидрологический анализ материалов гидрометрических наблюдений, проводимых в рассматриваемом регионе, т. е. параметр K_0 следует определять по данным рек-аналогов. При этом за аналог необходимо принимать бассейны, расположенные в одной и той же ландшафтной провинции, с учетом подобия форм водосборов рассматриваемых рек.

При выполнении инженерно-гидрологических расчетов по максимальному стоку половодья мы рекомендуем принимать следующие параметры K_0, рассчитанные по данным наблюдений на реках республики (табл. 9).

Таблица 9

Значение параметра K_0 для рек Мордовии

Физико-географический район			
Лесные Мещерская и Северо-Приволжская провинции		Лесостепная Приволжская провинция	
Река (пункт)	$K_0 \cdot 10^3$	Река (пункт)	$K_0 \cdot 10^3$
Мокша (Темников)	8,6	Мокша (Кочелаево)	15,0
Вад (Авдалово)	10,0	Исса (Паево)	15,0
Виндрей (Леплеевское)	12,0	Сивинь (Сивинь)	14,0
Алатырь (Мадаево)*	18,0	Инсар (Саранск)	23,0
Алатырь (Тургенево)	10,0	Штырма (Черная Промза)	15,0
Пьяна (Гагино)	7,8	Синяш (Сабаево)	12,0
Выша (10 октября)	5,5	Рудня (Дивеев Усад)	15,0
Уркат (Урей I)*	14,0	Сура (Кадышево)	20,0
Сатис (Расстанье)	12,0	–	–
Колыша (Васильевка)	8,1	–	–

Меня (Олевка)	11,0	–	–

* – зоны активного влияния карста на режим стока.

Как отмечалось выше, рассмотренная редукционная формула применяется для рек с площадями водосборов от элементарно малого, менее 1,0 км^2, до 20 000 км^2. В структуру формулы входят несколько поправочных коэффициентов как к слою стока, так и к расходу воды, введение которых увеличивает статистическую неустойчивость расчетов, что может привести к грубым просчетам особенно при малых водосборах (менее 200 км^2). Поэтому в условиях рассматриваемого региона при наличии метеорологических наблюдений СП 33–101–2003 рекомендует определять расход воды весеннего половодья (при $A \leq 200$ км^2) по генетической формуле [Определение.., 2003], учитывающей процессы снеготаяния:

$$Q_{P,\%} = \frac{B_{\text{В},\max,\,P,\%} A}{1 + \tau_{\text{сд}} (B_{\text{В},\max,\,P,\%} / h_{\Pi,P,\%})},$$

где $B_{\text{В},\max,\,P,\%}$ – максимальный суточный слой водоотдачи из снега ежегодной вероятностью превышения $P,\%$, в мм; $\tau_{\text{сд}}$ – время сдвига между центром тяжести максимума водоотдачи и максимума стока, являющееся показателем времени добегания, τ, сут; $h_{\Pi,P\%}$ – максимальный слой стока за фазу подъема весеннего половодья ежегодной вероятностью превышения $P,\%$, в мм.

Применение указанной формулы для практических расчетов на рассматриваемой территории возможно при определении:

1) нормы максимального суточного слоя водоотдачи ($\bar{B}_{\text{В},\max}$) из снега по метеостанциям республики;

2) нормы слоя стока весеннего половодья за фазу подъема ($\bar{h}_{\Pi}$) по гидрометрическим постам на реках региона;

3) коэффициентов вариации и отношения коэффициентов асимметрии к ним для параметров $\bar{B}_{\text{В},\max}$ и $\bar{h}_{\Pi}$;

4) параметра $\tau_{\text{сд}}$ для исследуемого региона.

Исходные данные для определения этих параметров были предоставлены нам Мордовским республиканским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по всем действующим станциям и постам за 25 летний период наблюдений (кроме параметра $\tau_{\text{сд}}$).

Норма максимального суточного слоя водоотдачи из снега по имеющимся метеостанциям республики рассчитана нами по упрощенной схеме А. Г. Ковзеля [1962]. Поскольку метеостанции (табл. 10) расположены на территориях, где отсутствуют леса, значения водоотдачи соответствуют только незалесенным водосборам.

Для определения максимальных суточных слоев водоотдачи снежного покрова заданной ежегодной вероятностью превышения были рассчитаны коэффициенты вариации этих величин $C_{v,\text{В},\max}$ и определено отношение ко-

эффициента асимметрии к коэффициенту вариации $C_{s,\text{В},\max}/C_{v,\text{В},\max}$ (см. табл. 10).

Таблица 10

Параметры аналитической кривой обеспеченности нормы максимального суточного слоя водоотдачи из снега

№ п/п	Метеостанция	$\overline{B}_{\text{В},\max}$, мм	$C_{v,\text{В},\max}$	$C_{s,\text{В},\max}$	$C_{s,\text{В},\max}/C_{v,\text{В},\max}$
1	г. Саранск	16,3	0,45	2,92	6,5
2	г. Краснослободск	13,1	0,47	4,70	10,0
3	п. Торбеево	11,0	0,60	4,20	7,0
4	г. Инсар	12,6	0,64	3,84	6,0
5	с. Б. Березники	10,1	0,62	5,20	8,4
6	г. Темников	11,0	0,52	5,20	10,0

По рассчитанным значениям $\overline{B}_{\text{В},\max}$, $C_{v,\text{В},\max}$ построены карты изолиний этих параметров (рис. 24, 25), что дает возможность их определения на неизученных водосборах. Соотношение $C_{s,\text{В},\max}/C_{v,\text{В},\max}$ при расчетах следует принимать по данным ближайшей метеостанции.

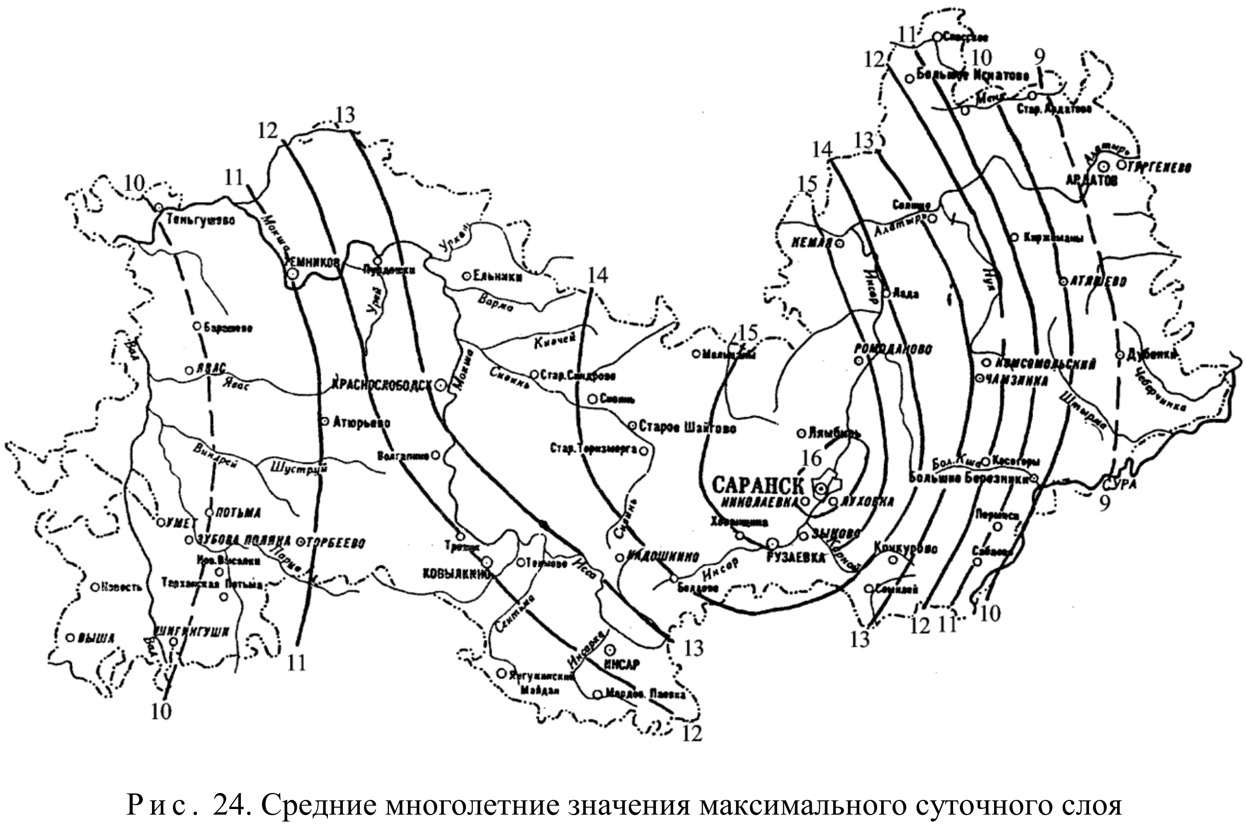
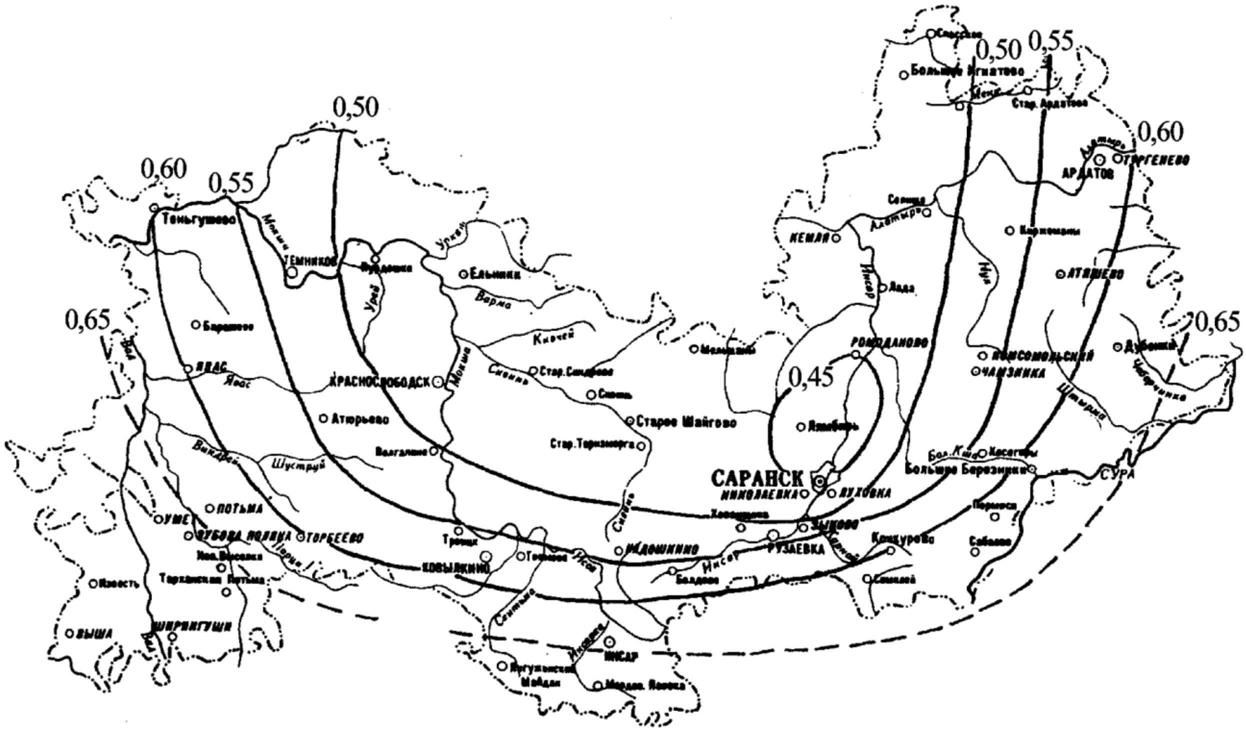


Рис. 24. Средние многолетние значения максимального суточного слоя водоотдачи снежного покрова



Р и с . 25. Коэффициенты вариации максимального суточного слоя водоотдачи снежного покрова

Среднее многолетнее значение слоя стока весеннего половодья за фазу подъема следует определять по выявленной эмпирической региональной зависимости

$$\bar{h}_{\Pi} = 34{,}6\, A^{0{,}153} K_S ,$$

где $\bar{h}_{\Pi}$ – норма слоя стока весеннего половодья за фазу подъема, мм; K_s – коэффициент несимметричности гидрографа половодья.

При выполнении расчетов K_s следует принимать по аналогу, при отсутствии такового его величина определяется по выявленной региональной зависимости

$$K_S = \frac{0{,}456}{A^{0{,}215}} .$$

Рассматриваемая величина имеет пределы от 0,19 до 0,45, причем при площадях водосбора от 0,01 до 1,0 км^2 эта величина постоянная ($K_s = 0{,}45$), с увеличением площади водосбора K_s уменьшается. Последнее объясняется тем, что на малых водосборах с повышением дневных температур сток увеличивается, а в ночное время уменьшается или вообще прекращается, т. е. сток имеет внутрисуточные колебания, гидрограф стока имеет пилообразную форму, и основная часть стока проходит на подъеме. На больших водосборах доля стока на подъеме уменьшается с увеличением их площади, что подтверждается данными по продолжительности половодья: более длительному периоду половодья соответствуют большие водосборы и меньшие значения K_s.

В ландшафтах республики при средних уклонах водосборов менее 70 ‰ к полученной величине $\bar{h}_{\text{П}}$ следует вводить поправку, определяемую по региональной формуле:

$$K' = 0{,}2 I_{\text{в}}^{0{,}43},$$

Для определения коэффициента вариации нормы весеннего половодья за фазу подъема нами получена эмпирическая зависимость вида

$$C_v = \frac{0{,}65}{A^{0{,}72}}.$$

Поскольку на рассматриваемой территории, за редким исключением, не велись наблюдения на малых водосборах, при определении вышеуказанной зависимости были использованы данные соседних регионов в пределах V гидрологического района (районирование Государственного гидрологического института [Ресурсы…, 1973]).

Расчетное значение отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации рекомендуется принимать по аналогам с использованием данных табл. 11.

Таблица 11

Расчетные отношения коэффициентов асимметрии к коэффициентам вариации нормы слоя стока весеннего половодья за фазу подъема

Река (пункт)	C_s/C_v
Мокша (Темников)	0,86
Исса (Паево)	0,84
Сивинь (Сивинь)	0,29
Уркат (Урей I)	1,08
Сатис (Росстанье)	2,16
Вад (Авдалово)	0,95
Виндрей (Леплеевское)	0,0
Калыша (Васильевка)	0,55
Алатырь (Тургенево)	1,33
Алатырь (Мадаево)	2,0
Инсар (Саранск)	3,13
Рудня (Дивеев Усад)	0,23
Шрырма (Черная Промза)	1,22
Синяш (Сабаево)	1,92
Пьяна (Гагино)	1,19
Меня (Олевка)	1,11

Параметр $\tau_{\text{сд}}$ определяется на основе данных наблюдений на метеорологических и гидрометрических постах республики путем определения дат максимальной водоотдачи из снега, максимальной величины подъема уровней воды и выявления зависимости этого параметра от площади водосбора как интегрирующего показателя стока.

В результате получена региональная зависимость, аппроксимирующаяся следующим уравнением

$$\tau_{\text{сд}} = 10{,}3\ A^{0{,}085}.$$

В связи с тем что представленная генетическая формула вводится в практику гидрологических расчетов в рассматриваемом регионе впервые, полученные результаты необходимо сравнивать с измерениями на водомерных постах малых водосборов, а также с показателями, определенными гидроморфометрическим способом. Это позволит оценить точность проводимых расчетов и при необходимости осуществить их корректировку.

Глава 3
МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

3.1. Факторы формирования и норма стока дождевых паводков

Процессы формирования дождевого стока исключительно сложны, обусловлены многими факторами, влияние которых изучено недостаточно. Паводки часто бывают генетически неоднородными, включающими в себя все виды стока, различные по условиям формирования, динамике развития и режиму стекания. В настоящее время многое в механизме формирования стока остается неясным, поэтому теоретическая интерпретация процесса в целом носит характер гипотез и упрощенных схематизаций [Евстигнеев, 1990]. Основными факторами, влияющими на процессы формирования дождевых паводков, являются:

– характеристика дождей;
– геоморфологические условия водосборов;
– гидрогеологические условия;
– характеристика почвогрунтов и подстилающей поверхности.

В инженерной гидрологии осадки разделяют по эффективности образования максимального стока: *ливни* – короткие и интенсивные дожди продолжительностью до 2 – 4 ч и средней интенсивностью 10 – 20 мм/ч; *ливневые дожди* – продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток и средней интенсивностью 2 – 10 мм/ч; *обложные дожди* – продолжительностью до 5 суток и малой интенсивностью – до 2 мм/ч.

Паводки на территории республики образуются, как правило, от осадков, которые связаны с фронтальными системами и часто охватывают весь регион. Дожди даже повышенной интенсивности больших паводков не вызывают ввиду их локального распространения. Максимальные расходы воды дождевых паводков наблюдались на реках региона в 1938, 1941, 1951, 1957, 1958, 1960, 1968, 1970, 1973, 1974, 1977 гг. Характерен в этом отношении 1941 г., когда обложные дожди охватили бассейны рек Мокша, Исса, Вад, т. е. всю западную часть республики.

Не менее важное значение в формировании максимального стока принадлежит геоморфологическим, гидрогеологическим, геологическим условиям водосборов. На слаборасчлененных территориях, сложенных суглинистыми и глинистыми грунтами, главную роль в потерях паводочного стока играет микрорельеф подстилающей поверхности, на котором происходит поверхностное задержание, в связи с чем гидрограф стока имеет большую продолжительность (характерно для западных районов республики). При значительных уклонах склонов и на достаточно расчлененных равнинах (характерно для востока региона) основным источником потерь стока является ин-

фильтрация, величина которой зависит от механического состава слагающих водосбор почвогрунтов и уровня грунтовых вод, который вместе с климатическими факторами характеризует влажность почвенного покрова.

Из геоморфологических характеристик, влияющих на формирование максимального стока следует также отметить уклоны склонов водосборов, их ширину, уклоны гидрографической сети, шероховатость подстилающей поверхности. Они имеют основное значение в процессе стекания дождевых вод по склонам и русловой сети и определяют продолжительность склонового и руслового добегания.

Максимальный модуль дождевого стока на больших реках региона составляет 5,0 – 34,0 л/с·км^2, на средних – 23,0 – 74,0 л/с·км^2, на малых – до 103 л/с·км^2, средний модуль максимального дождевого стока в зависимости от площади водосбора варьирует в пределах от 2,3 до 16,7 л/с·км^2, причем большие показатели отмечаются на водосборах с меньшей площадью. Обработка рядов гидрометрических наблюдений позволила определить максимальный расход воды дождевых паводков для рек региона. Результаты их представлены в табл. 12.

Таблица 12

Максимальный расход дождевых паводков различной обеспеченности

Река (пункт)	Площадь водосбора, км^2	Максимальный расход, м^3/с		Параметры кривой обеспеченности				Максимальный расход, м^3/с, обеспеченностью P,%				
		средний	наибольший	Q, м^3/с	C_v	C_s	$\frac{C_s}{C_v}$	1	2	3	5	10
Мокша (Темников)	15 800	36,9	82,5	36,5	0,51	1,5	2	98,6	87,5	81,1	73,0	61,3
Исса (Паево)	1 790	12,9	97,2	16,1	1,55	3,2	2,1	118	94,5	82,3	65,0	43,3
Сивинь (Сивинь)	1 060	12,9	78,6	15,4	1,27	2,7	2,1	92,0	76,0	65,0	54,5	38,6
Уркат (Урей 1–й)	402	12,0	41,7	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Сатис (Росстанье)	1 230	6,49	31,9	6,96	1,32	3,1	2,4	44,5	35,8	31,5	25,0	17,1
Сарма (Сарминский Майдан)	741	6,07	11,4	6,47	0,5	1,7	3,4	17,6	15,6	14,4	12,8	10,8
Вад (Авдалово)	1 930	9,87	64,8	13,9	1,1	2,7	2,5	73,7	61,3	54,1	44,5	32,0
Виндрей (Леплеевское)	1 010	4,53	14,3	4,75	0,91	1,9	2,1	20,1	17,2	15,5	13,4	10,4
Сура (Кадышево)	27 900	106	287	114	0,65	1,7	2,6	369	323	295	260	212
Алатырь (Мадаево)	1 410	17,0	70,3	18,9	1,64	3,6	2,2	153	117	103	80,0	51,5
Алатырь (Тургенево)	11 000	56,2	372	73,4	1,27	2,9	2,3	446	364	321	259	181
Рудня (Дивеев Усад)	1 140	10,3	28,4	10,9	0,96	2,6	2,7	51,2	43,1	38,4	31,8	23,6
Инсар (Саранск)	1 610	14,1	37,7	15,1	0,75	2,1	2,8	56,5	48,4	43,8	37,9	29,7
Калыша (Васильевка)	166	2,77	4,79	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Меня (Олевка)	329	5,46	19,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–

3.2. Практические приемы расчета максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений

Практическая необходимость расчета максимальных расходов дождевых паводков вынуждает прибегать к очень схематичным представлениям о процессах стока, привязывая их к имеющимся данным наблюдений гидрометеорологической сети, что может служить некоторой гарантией от грубых просчетов [Евстигнеев, 1990].

В настоящее время в связи с увеличением объемов строительства автодорог и сопутствующих им гидротехнических сооружений в рассматриваемом регионе при расчетах максимального дождевого стока в основном используется формула предельной интенсивности стока, что обусловлено отсутствием аналогов:

$$Q_{P,\%} = q'_{1\%}\varphi H_{1\%}\delta\lambda_{P,\%}A,$$

где $q'_{1\%}$ – относительный модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения 1 %, представляющий отношение

$$q'_{1\%} = \frac{q_{1\%}}{\varphi H_{1\%}},;$$

φ – сборный коэффициент стока; $H_{1\%}$ – максимальный суточный слой осадков вероятностью превышения 1%, мм; δ – коэффициент, учитывающий снижение максимальных расходов воды проточными озерами; $\lambda_{P,\%}$ – переходный коэффициент от максимальных мгновенных расходов воды ежегодной вероятностью превышения 1 % к максимальным расходам воды другой вероятности превышения [Определение…, 2003].

Опыт эксплуатации гидротехнических сооружений показал, что рассчитанные по современным методам конечные результаты часто отличаются от фактически наблюдаемых более чем на порядок. Это объясняется рядом условностей, принимаемых в расчетах:

а) предположением, что над рассматриваемым водосбором выпадает дождь такой же интенсивности и продолжительности, как и над ближайшей метеостанцией;

б) предположением, что выбранная метеостанция фиксирует все характерные для данного бассейна дожди, хотя их можно установить только при наличии большого числа осадкомеров на всей территории бассейна.

Неопределенности и условности в расчетах можно избежать, используя данные наблюдений и морфометрических изысканий за период эксплуатации гидротехнических сооружений на малых водосборах. Нами предпринята попытка оценить максимальный дождевой сток по основному показателю, каковым является норма модуля максимального стока, так как она позволяет сравнивать водоносность бассейнов, находящихся в различных физико-географических условиях [Шутов, 1998]. Причем средние многолетние (норма) значения модуля стока освобождены от влияния вариации рядов наблю-

дений, т. е. являются весьма устойчивыми характеристиками. Модули стока не освобождены от влияния факторов местного порядка, каковым служит, например, залесенность водосбора, однако явной их зависимости от доли леса не выявлено. В результате определения нормы максимального дождевого стока по 53 створам рек Мордовии и соседних регионов были выявлены зависимости вида

$$q_0 = \frac{B}{A^n},$$

где B – параметр, различный по бассейнам региона;
n - показатель степени редукции.

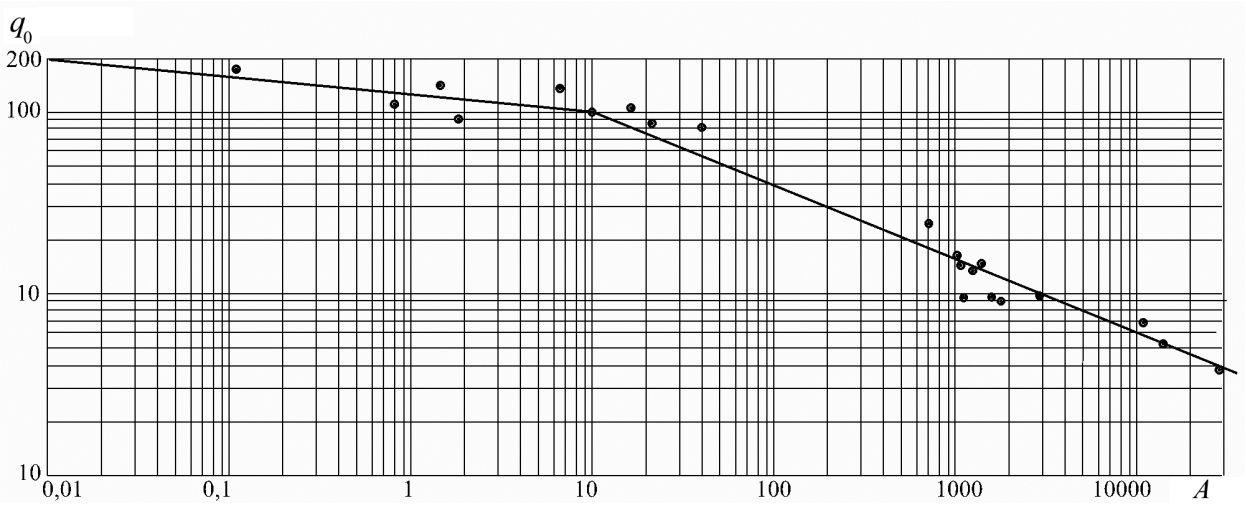


Рис. 26. Эмпирическая зависимость максимального модуля стока дождевых паводков от площади водосбора (бассейн р. Суры)

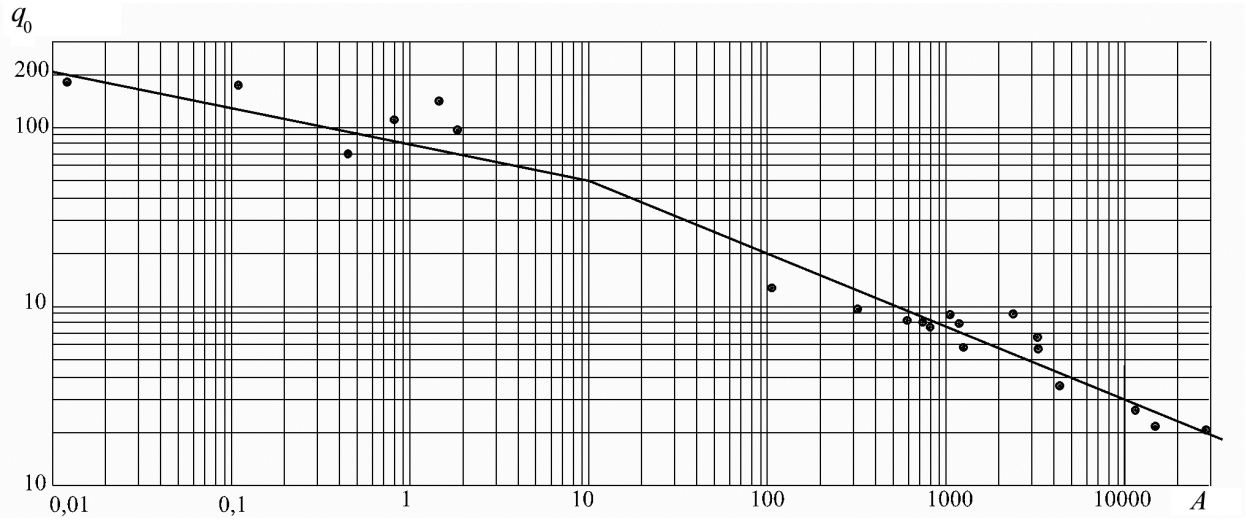


Рис. 27. Эмпирическая зависимость максимального модуля стока дождевых паводков от площади водосбора (бассейн р. Мокши)

Конкретно для бассейна Суры получены зависимости:

$$q_0 = \frac{251}{A^{0,4}} \text{ л/с·км}^2 \quad (\text{при } A\text{, равном } 10 – 30\,000 \text{ км}^2);$$

$$q_0 = \frac{126}{A^{0,1}} \text{ л/с·км}^2 \quad (\text{при } A\text{, равном } 0,01 – 10 \text{ км}^2);$$

для бассейна Мокши

$$q_0 = \frac{115}{A^{0,4}} \text{ л/с·км}^2 \quad (\text{при } A\text{, равном } 10 – 30\,000 \text{ км}^2);$$

$$q_0 = \frac{77,7}{A^{0,21}} \text{ л/с·км}^2 \quad (\text{при } A\text{, равном } 0,01 – 10 \text{ км}^2).$$

Для определения второго параметра кривой распределения – коэффициента вариации C_v использованы те же данные. Наложение значений C_v на логарифмическую шкалу позволило выявить зависимость вида $C_v = f(A)$, единую для всего рассматриваемого региона (рис. 28), которая аппроксимируется уравнением гиперболы

$$C_v = \frac{1,79}{A^{0,081}}.$$

Для определения коэффициента асимметрии C_s был произведен анализ соотношения C_v и C_s, что позволило установить зависимость вида $C_s = f(C_v)$, также единую для всего региона (рис. 29).

Уравнение данной связи имеет вид

$$C_s = 0,78 + 1,6C_v.$$

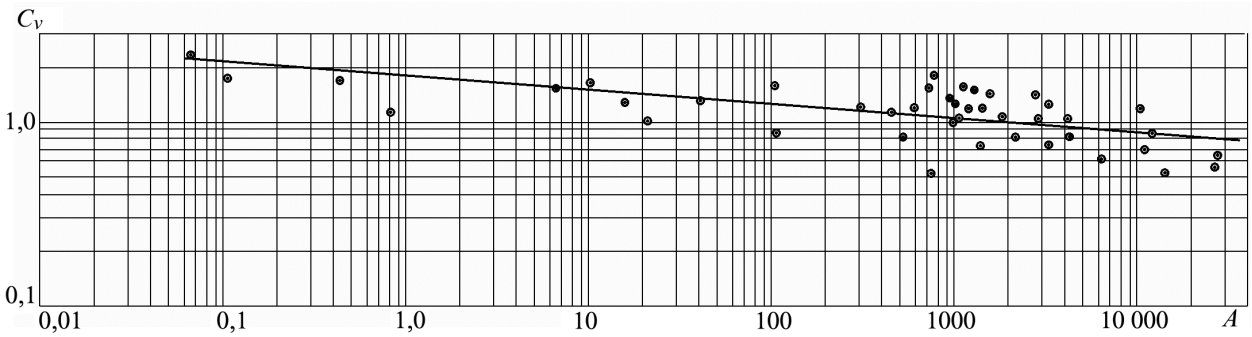


Рис. 28. Зависимость коэффициента вариации максимальных расходов воды дождевых паводков от площади водосбора

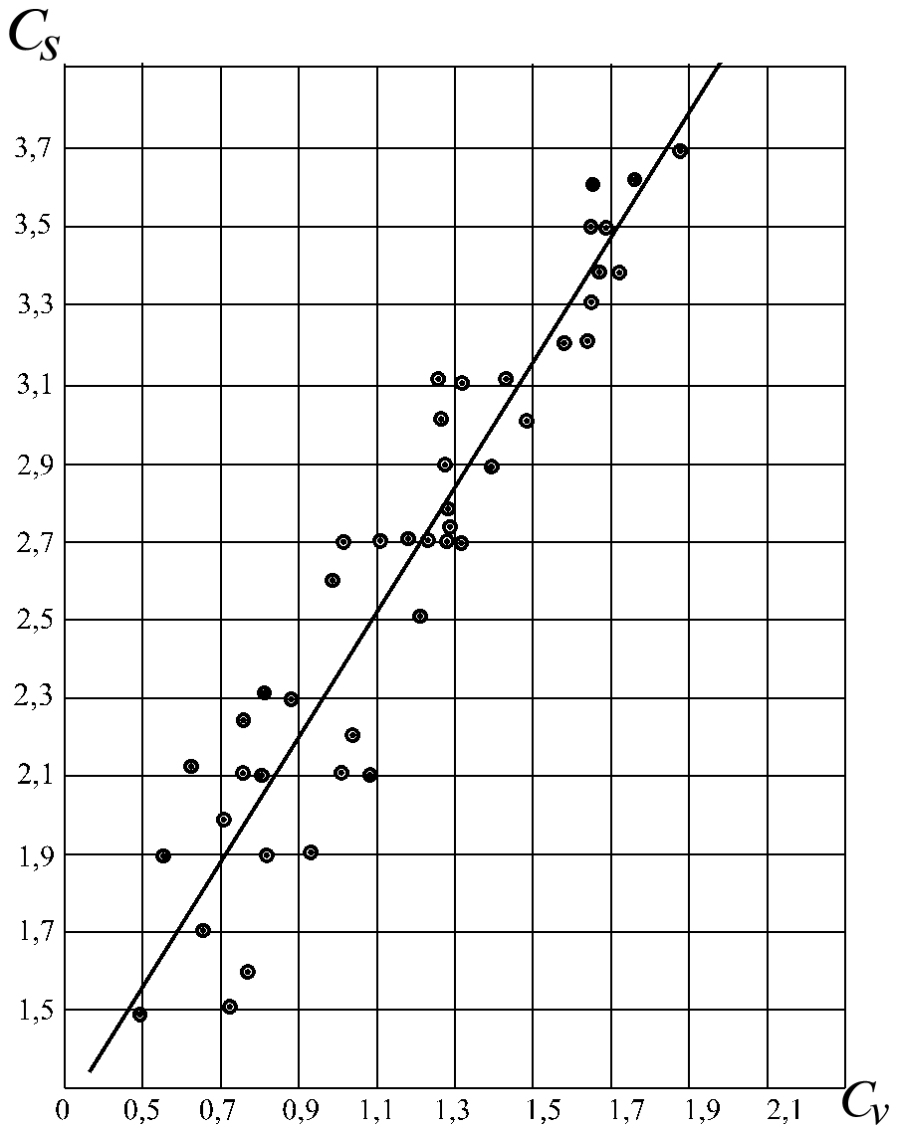


Рис. 29. Зависимость $C_s = f(C_v)$

Коэффициент корреляции $r = 0{,}95 \pm 0{,}01$, критерий Стьюдента при числе степеней свободы, равном ∞, и 5% уровне значимости равен 19,2, что больше теоретической величины. Все это свидетельствует о том, что коэффициент корреляции значим, а связь между переменными C_v и C_s реальна.

В практической деятельности расходы воды, определенные по результатам морфометрических изысканий, необходимо контролировать по предлагаемым региональным зависимостям и формулам, приведенным в работе «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» [2003].

Анализ результатов, полученных различными методами, дает возможность повысить достоверность расчетных данных, принимаемых за основу в дальнейших технических решениях.

Глава 4
МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК

4.1. Факторы формирования и норма минимального стока

Минимальный сток на реках Мордовии наблюдается в период летне-осенней и зимней межени, когда поверхностный сток прекращается и реки питаются только за счет грунтовых вод. Наименьший сток обычно бывает в зимний период.

Летне-осенняя межень начинается в конце мая – середине июня и заканчивается в конце сентября, октябре и очень редко в ноябре. Отмечаются годы с затяжным половодьем, когда на спаде его проходят дожди и межень устанавливается в конце июня. При позднем, дружном половодье период низкого стока выпадает на середину мая. На малых реках межень наступает значительно раньше. Ее продолжительность в разные годы различна и изменяется в широких пределах – от 60 до 180 дней. Наиболее маловодные периоды длятся от 20 до 30 дней.

Модуль среднего многолетнего минимального месячного стока за летний период колеблется от 0,3 до 0,9 л/с·км² в бассейне р. Мокши и от 0,5 до 1,52 л/с·км² в бассейне р. Суры. Минимальный модуль стока в отдельные годы уменьшается до 0,04 (р. Меня, 1972 г.) – 0,06 л/с·км² (р. Сивинь, 1955 г.). Наиболее маловодными по летнему меженному стоку были 1938, 1939, 1951, 1955, 1972 гг.

Зимняя межень устанавливается в конце ноября – начале декабря и заканчивается в конце марта – начале апреля. Средняя ее продолжительность 90 – 100 дней. Наиболее маловодный период фиксируются в феврале, продолжительность его 20 – 30 дней. Модуль среднего многолетнего минимального месячного стока в зимний период изменяются от 0,26 до 0,75 л/с·км² в бассейне р. Мокши и от 0,29 до 0,83 л/с·км² – в бассейне р. Суры.

Повышенные минимальные летние и зимние модули стока наблюдаются в бассейнах рек Вад и Инсар, что объясняется лучшими условиями грунтового питания [Шутов, 1977]. На малых реках этот показатель самый низкий и варьирует в значительных пределах (от 0,02 до 0,083 л/с·км²) в зависимости от площади водосбора и условий подземного питания. Многие из них перемерзают и пересыхают, когда сочетание гидрогеологических и морфометрических факторов не обеспечивает стабильного питания.

Как отмечалось ранее, минимальный расход воды наблюдается в периоды, когда питание рек осуществляется за счет их связи с подземными водами, т. е. гидрогеологические условия являются одним из основных факторов, формирующих минимальный сток. Немаловажную роль играют физико-

географические факторы: климат, рельеф, механический состав почв и грунтов, лесистость, заболоченность и озерность бассейнов рек.

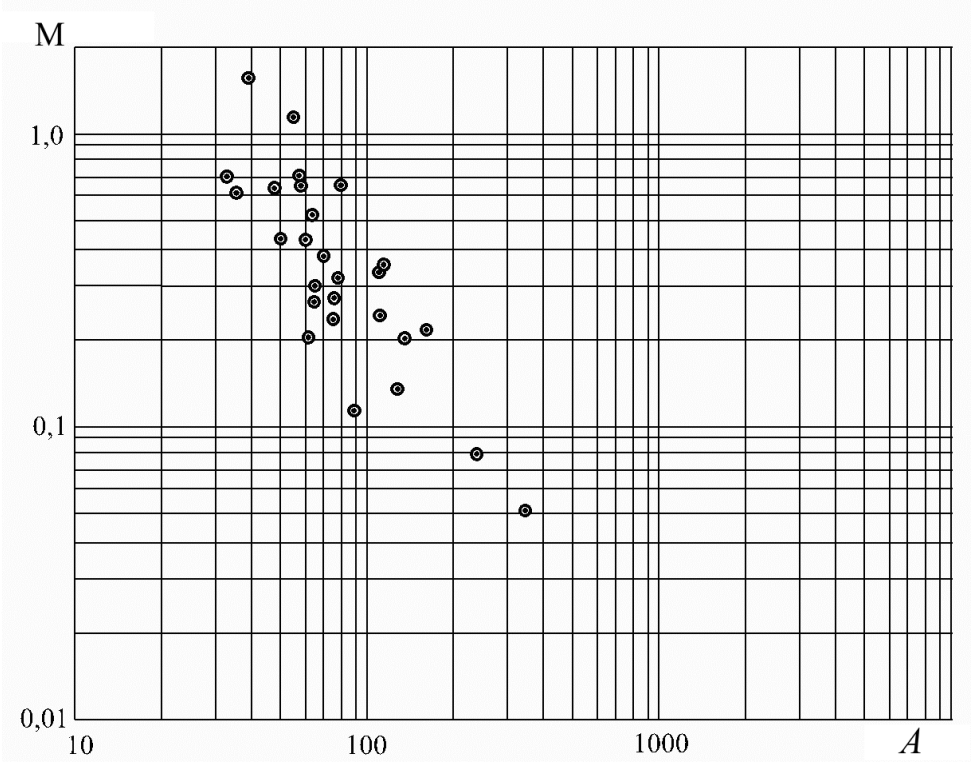
Воздействие климата на рассматриваемой территории проявляется через другие факторы, формирующие сток. В частности, так как на трансформацию атмосферных осадков в подземный сток большое влияние оказывает механический состав почв и грунтов, слагающих бассейны, модули многолетних величин минимального месячного стока больше там, где наблюдаются более высокие осадки и песчаные и супесчаные почвы. Примером этого могут быть бассейн р. Вад, где данный показатель достигает 0,67 л/с·км² при норме годовых осадков 650 мм, и бассейн р. Рудня, где при тех же осадках, но почвогрунтах более тяжелого механического состава он равен 0,54 л/с·км².

При недостатке материалов наблюдений затруднительно сделать убедительный вывод о влиянии рельефа на минимальный сток. Но необходимо отметить, что на возвышенностях в связи с углублением эрозионного вреза наблюдается его увеличение (р. Сура у д. Николаевка – 0,93 л/с·км², у с. Кадышево – 1,52 л/с·км²), тогда как в пределах низменных равнин при слабой расчлененности величина минимального стока уменьшается (Мокша – модуль стока от 0,7 до 0,84 л/с·км², Исса, Сивинь – соответственно 0,3 и 0,39 л/с·км²).

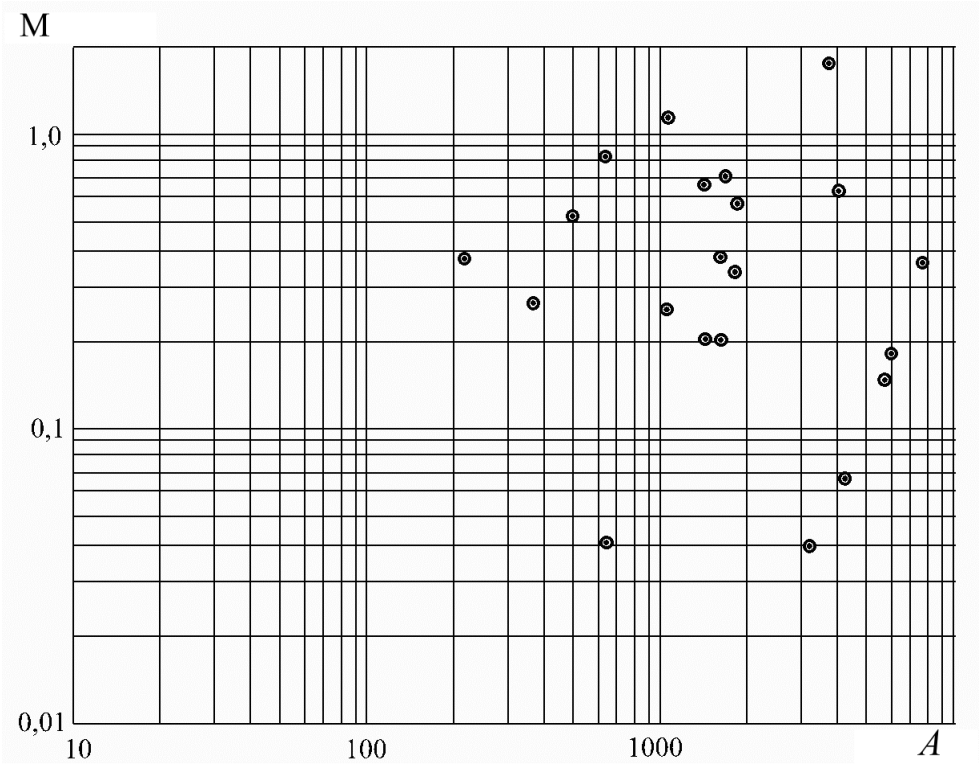
Сравнение минимального стока сильно залесенных и менее залесенных бассейнов рек свидетельствует, что первые имеют повышенные модули стока (реки Уркат, Сатис, Калыша – соответственно 0,67, 0,9 и 0,6 л/с·км²), хотя определить роль леса в формировании минимального стока в количественном выражении из-за трудности выделения влияния одного фактора из комплекса условий не представляется возможным. Аномальные величины минимального стока в результате наличия карста кроме рек Сатис и Уркат наблюдаются в верховьях Алатыря.

Условия формирования минимального стока на малых реках Мордовии в основном определяются гидрогеологическими факторами и глубиной эрозионного вреза. Анализ подземного стока, проведенный по материалам технического отчета Верхне-Волжского территориального управления по гидрометеорологии и контролю природной среды [Гидрометрическая оценка..., 1986], показал, что при большей расчлененности и глубине вреза малые реки бассейна р. Суры имеют лучшие условия подземного питания и его величина зависит от площади водосбора (рис. 30). Для малых рек западной Мордовии, расположенных в ландшафтах водно-ледниковых и вторичных моренных равнин (бассейн р. Мокши), эта зависимость не выявляется ввиду малой эрозионной расчлененности (рис. 31).

Вопросы формирования и количественной оценки минимальных средних месячных расходов воды на территории республики освещались в работах ГГИ [Ресурсы..., 1973] и «Мосгипроводхоза» [Исследования и расчеты..., 1980] при исследовании более крупных регионов. По их результатам выполнены карты среднего многолетнего месячного минимального стока за летний и зимний периоды для водосборов более 2 000 км² (ГГИ) и за летний период (75% обеспеченности) [Исследования и расчеты..., 1980].



Р и с . 30. Зависимость модуля подземного питания (50% обеспеченности) от площади водосбора для рек бассейна Суры



Р и с . 31. Зависимость модуля подземного питания (50% обеспеченности) от площади водосбора для рек бассейна Мокши

Сравнительный анализ представленных материалов показал, что модули среднего многолетнего месячного минимального стока за летний период почти равнозначны и дают реальную количественную оценку рассматриваемого параметра (табл. 13).

Таблица 13

Минимальный летний среднемесячный расход воды и модули стока различной обеспеченности

Река (пункт)	Площадь водосбора, км²	Период наблюдений	Средний расход за период наблюдений, м³/с / л/с·км²	Расход воды, м³/с / модуль стока, л/с•км² обеспеченностью *P, %*							Наименьший наблюденный модуль, м³/с / л/с•км²	Время наблюдения
				50	75	80	85	90	95	97		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Мокша (Темников)*	5 800	1934 – 1975	11,1 / 0,70	10,4 / 0,66	7,93 / 0,50	7,42 / 0,47	6,76 / 0,43	6,09 / 0,39	5,21 / 0,33	4,62 / 0,29	4,94 / 0,31	08.39
Мокша (Шевелевский Майдан)	8 600	1933 – 1975	23,9 / 0,84	24,4 / 0,85	19,2 / 0,67	17,3 / 0,60	15,6 / 0,55	14,0 / 0,49	11,8 / 0,41	10,9 / 0,38	10,5 / 0,37	09.39
Исса (Паево)*	1 790	1949 – 1975	0,53 / 0,30	0,48 / 0,27	0,31 / 0,17	0,27 / 0,15	0,22 / 0,12	0,18 / 0,10	0,12 / 0,07	0,09 / 0,05	0,10 / 0,06	10.55
Сивинь (Сивинь)	1 060	1949 – 1975	0,41 / 0,39	0,40 / 0,38	0,27 / 0,25	0,24 / 0,23	0,21 / 0,20	0,17 / 0,16	0,11 / 0,10	0,07 / 0,07	0,08 / 0,08	08.72
Уркат (Урей 1–й)*	402	1969 – 1975	0,27 / 0,67	–	–	–	–	–	–	–	0,20 / 0,50	08.72
Сатис (Росстанье)*	1 230	1967 – 1975	1,11 / 0,90	–	–	–	–	–	–	–	0,94 / 0,76	06.71
Вад (Авдалово)*	1 930	1936 – 1941, 1946 – 1975	1,30 / 0,67	1,20 / 0,62	0,82 / 0,42	0,74 / 0,38	0,60 / 0,31	0,51 / 0,26	0,35 / 0,18	0,25 / 0,13	0,28 / 0,15	08.72
Виндрей (Леплеевское)*	1 010	1950 – 1975	0,49 / 0,49	0,45 / 0,45	0,36 / 0,36	0,34 / 0,34	0,31 / 0,31	0,26 / 0,26	0,17 / 0,17	0,12 / 0,12	0,12 / 0,12	08.72
Сура (Кадышево)	27 900	1933 – 1975	42,4 / 1,52	41,4 / 1,48	34,5 / 1,24	33,0 / 1,18	31,0 / 1,11	29,1 / 1,04	26,2 / 0,94	24,3 / 0,87	23,2 / 0,83	09.38
Алатырь (Мадаево)*	1 410	1958 – 1975	0,70 / 0,50	0,70 / 0,50	0,52 / 0,37	0,48 / 0,34	0,42 / 0,30	0,37 / 0,26	0,30 / 0,21	0,25 / 0,18	0,27 / 0,19	07.72
Алатырь (Тургенево)	11 000	1934 – 1937, 1939, 1949 – 1975	7,60 / 0,69	6,98 / 0,63	5,10 / 0,46	4,72 / 0,43	4,10 / 0,37	3,68 / 0,33	3,08 / 0,28	2,62 / 0,24	2,63 / 0,24	10.51
Рудня (Дивеев Усад)	1 140	1963 – 1975	0,62 / 0,54	0,60 / 0,53	0,52 / 0,46	0,52 / 0,46	0,50 / 0,44	0,42 / 0,37	0,23 / 0,20	0,20 / 0,18	0,21 / 0,18	09.72

Инсар (Саранск)	1 610	1955 – 1975	1,73 / 1,07	1,60 / 0,99	1,16 / 0,72	1,06 / 0,66	0,94 / 0,58	0,82 / 0,51	0,64 / 0,40	0,54 / 0,34	0,69 / 0,43	09.55
Калыша (Васильевка)	166	1969 – 1975	0,10 / 0,60	–	–	–	–	–	–	–	0,004 / 0,02	08.72
Меня (Олевка)	329	1969 – 1975	0,03 / 0,27	–	–	–	–	–	–	–	0,01 / 0,04	08.72
Пьяна (Гагино)**	2 880	1948 – 1975	1,05 / 0,36	0,90 / 0,31	0,57 / 0,20	0,51 / 0,18	0,40 / 0,14	0,36 / 0,12	0,25 / 0,09	0,19 / 0,07	0,21 / 0,07	09.72

* Сток зарегулирован плотинами.
** Наличие карста в бассейне.

Минимальный средний месячный расход воды в зимний период определяется только величиной подземного питания. По данным ГГИ [Ресурсы…, 1973], на территории Мордовии модули стока увеличиваются с северо-запада на юго-восток от 0,5 до 1,5 л/с·км^2. Эта закономерность характерна для рек с площадью водосбора более 2 000 км^2. Характерные минимальные летние и зимние среднемесячные модули стока [Ресурсы…, 1973] представлены в табл. 14.

Таблица 14

Минимальные зимние среднемесячные модули стока различной обеспеченности

Река (пункт)	Площадь водосбора, км²	Период наблюдений	Средний многолетний модуль, л/с·км²	Модуль стока, л/с•км², обеспеченности *P*, %							Наименьший модуль стока, л/с·км²
				50	75	80	85	90	95	97	
Мокша (Темников)	15 800	1934 – 1966	0,66	0,63	0,52	0,5	0,48	0,46	0,42	0,41	0,33
Мокша (Шевелевский Майдан)	28 600	1933 – 1966	0,69	0,66	0,56	0,54	0,5	0,49	0,45	0,42	0,35
Исса (Паево)	1 790	1949 – 1965	0,26	0,22	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,095
Сивинь (Сивинь)	1 060	1949 – 1965	0,33	0,32	0,25	0,24	0,22	0,2	0,16	0,14	0,15
Вад (Авдалово)	1 930	1936 – 1941, 1946, 1949 – 1966	0,75	0,70	0,50	0,47	0,41	0,36	0,3	0,25	0,13
Виндрей (Леплеевское)	1 010	1950 – 1966	0,51	0,48	0,36	0,33	0,29	0,26	0,22	0,19	0,18
Сура (Кадышево)	27 900	1933 – 1964	1,16	1,16	0,92	0,87	0,82	0,73	0,62	0,54	0,51
Алатырь (Мадаево)	1 410	1958 – 1969	0,41	0,38	0,3	0,28	0,25	0,23	0,2	0,19	0,23

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Алатырь (Тургене-во)	11 000	1934 – 1937, 1939, 1949 – 1966	0,56	0,52	0,38	0,35	0,32	0,28	0,24	0,22	0,23
Рудня (Дивеев Усад)	1 140	1963 – 1969	0,29	–	–	–	–	–	–	–	0,15
Инсар (Саранск)	1 610	1955 – 1966	0,70	0,70	0,52	0,47	0,41	0,35	0,25	0,19	0,25
Пьяна (Гагино)	2 880	1948 – 1966	0,24	0,24	0,18	0,17	0,16	0,14	0,11	0,09	0,097

4.2. Практические приемы расчета характеристик минимального стока при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений

Изменение по территории подземного и поверхностного стока, а также отсутствие связи модуля минимального среднего месячного стока с площадью водосбора позволили построить карту среднего многолетнего месячного минимального стока за летний период для водосборов с площадью более 2 000 км² по данным «Мосгипроводхоза» [Исследования и расчеты..., 1980] (рис. 32).

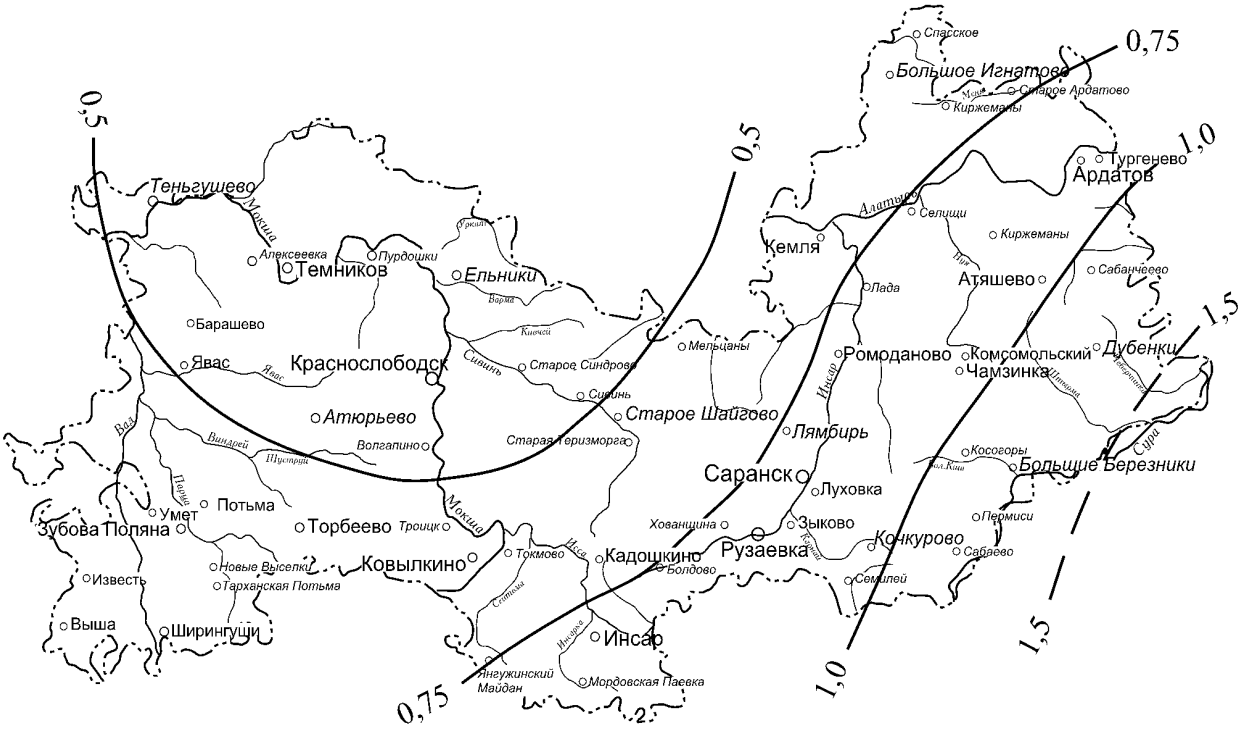


Рис. 32. Средний многолетний месячный минимальный сток за летний период для водосборов с $A > 2000$ км², л/с·км²

Коэффициент вариации C_v летнего месячного минимума изменяется от 0,30 до 0,66; на его величину влияет не только изменение подземного питания, но и режим поверхностного стока. Для определения величин C_v летнего минимального стока на изученных реках с площадью водосбора более 1 000 км² можно предложить зональные эмпирические зависимости:

– для бассейна р. Суры в пределах рассматриваемого региона (не включая бассейн р. Инсар по азональным признакам)

$$C_v M_0 = 0{,}021 A^{0{,}3};$$

– для бассейна р. Мокши (не включая районы распространения карста и зоны повышенного грунтового питания бассейна р. Вад)

$$C_v M_0 = 0{,}03 A^{0{,}23};$$

– для бассейнов рек Вад и Инсар, где наблюдаются повышенные модули подземного стока,

$$C_v M_0 = 0{,}0007\, A^{0{,}8}.$$

Для рек с площадью водосбора менее 1 000 км² (ввиду невозможности определить C_v по региональным формулам) при расчетах минимального стока следует пользоваться методиками ГГИ [Определение..., 2003].

Оценка коэффициента асимметрии не дает устойчивого соотношения C_s/C_v. Значения коэффициентов C_v и C_s по данным ГГИ представлены в табл. 15.

Таблица 15

Значения коэффициентов вариации и асимметрии минимального летнего среднемесячного расхода воды

Река (пункт)	C_v	C_s
Мокша (Темников)	0,40	0,6
Мокша (Шевелевский Майдан)	0,33	0,6
Исса (Паево)	0,47	0,3
Сивинь (Сивинь)	0,43	1,1
Вад (Авдалово)	0,48	0,8
Виндрей (Леплеевское)	0,38	1,5
Алатырь (Мадаево)	0,46	2,2
Алатырь (Тургенево)	0,53	1,7
Инсар (Саранск)	0,30	0,0
Сура (Кадышево)	0,31	0,8
Пьяна (Гагино)	0,66	2,2

Количественную оценку летнего минимального стока рек с водосборами менее 2 000 км² ввиду отсутствия наблюдений на них можно получить на основе использования косвенных приемов. Одним из них является метод определения среднего месячного минимального расхода по внутригодовому распределению стока с применением аналога. В частности, можно использовать предлагаемый нами метод [Шутов, 1977], который предусматривает привлечение эмпирических региональных зависимостей сезонного стока от площади водосбора, которая отражает регулирующее влияние бассейна и степень его дренирования. Для рек с водосборами менее 500 км^2 для количественной оценки минимального стока следует использовать известный в практике гидрологии метод гидрометрической съемки.

Наиболее обширные съемки проводились на территории республики в 1983 – 1984 гг. Верхне-Волжским территориальным управлением по гидрометеорологии и контролю природной среды [Гидрометрическая оценка…, 1986]. Полученные результаты по минимальным летним расходам воды представлены в прил. 1.

При расчетах минимального среднемесячного стока зимнего периода для рек с водосборами более 2 000 км^2 возможно использование карты модуля стока, созданной ГГИ [Ресурсы…, 1973] (рис. 33).

Р и с . 33. Средний многолетний месячный минимальный сток за зимний период для водосборов с $F > 2000$ км², л/с·км²

Коэффициенты вариации зимнего минимального месячного расхода изменяются от 0,27 до 0,55. По закономерностям их распределения на изучаемой территории выявлены следующие эмпирические зависимости (при площади водосбора более 1 000 км²):

– для бассейна р. Суры в пределах рассматриваемого региона (не включая бассейн р. Инсар по азональным признакам)

$$C_v M_0 = 0{,}03\, A^{0{,}23};$$

– для бассейна р. Мокши (исключая закарстованные бассейны и зоны повышенного грунтового питания бассейна р. Вад)

$$C_v M_0 = 0{,}042\, A^{0{,}15};$$

– для бассейнов рек Вад и Инсар, где проявляются азональные признаки повышенного грунтового питания,

$$C_v M_0 = 0{,}0015\, A^{0{,}7}.$$

Коэффициент асимметрии зимнего минимального расхода изменяется, по данным ГГИ [Ресурсы..., 1973], в широких пределах – от 0 до 4 C_v. Значения коэффициентов C_v и C_s по данным ГГИ представлены в табл. 16.

Для рек с площадью водосбора менее 2 000 км^2 при расчетах минимального зимнего стока фактических материалов явно недостаточно и данный вопрос требует дополнительных гидрометрических наблюдений. Существенную помощь при производстве инженерно-гидрологических расчетов минимального зимнего стока могут оказать данные гидрометрических съемок (прил. 2)

Таблица 16

Значения коэффициентов вариации и асимметрии минимального зимнего среднемесячного расхода воды

Река (пункт)	Площадь водосбора, км²	C_v	C_s
Мокша (Темников)	15 800	0,27	1,1
Мокша (Шевелевский Майдан)	28 600	0,27	0,9
Исса (Паево)	1 790	0,55	1,6
Сивинь (Сивинь)	1 060	0,34	0,5
Вад (Авдалово)	1 930	0,45	0,9
Виндрей (Леплеевское)	1 010	0,42	0,8
Алатырь (Мадаево)	1 410	0,39	1,0
Алатырь (Тургенево)	11 000	0,43	1,0
Инсар (Саранск)	1 610	0,39	0,0
Сура (Кадышево)	27 900	0,28	0,0
Пьяна (Гагино)	2 880	0,33	0,0

Глава 5
УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ РЕК

5.1. Режим уровней воды рек

Режим уровня рек Республики Мордовия характеризуется наличием высокого весеннего половодья, низкой летне-осенней межени, нарушаемой в дождливые годы двумя–тремя паводками, и устойчивой зимней межени.

Весенний подъем уровня воды начинается еще в период ледостава в третьей декаде марта – начале апреля. Спад сравнительно медленный. Заканчивается половодье в середине мая – начале июня. Его продолжительность составляет в среднем 1,5 – 2,0 месяца, в отдельные годы больше, а на малых реках – менее месяца. Максимум весеннего половодья наступает обычно в первой половине апреля, на реках с более крупными водосборами несколько позднее – во второй половине месяца. Для больших и средних рек характерно одновершинное половодье, но в отдельные годы при ранней весне и возврате холодов в период снеготаяния наблюдается несколько пиков подъема уровня (например, весной 1962 г. на реках Инсар, Мокша, Сивинь). На малых реках это обычное явление. Наивысшие уровни на реках республики наблюдались в 1942, 1945, 1947, 1950, 1963, 1969, 1970 гг. (табл. 17).

Таблица 17

Высшие уровни воды на реках республики, см

Река (пункт)	Весенний ледоход		Летне-осенний период		Ледостав	
	уровень	дата	уровень	дата	уровень	дата
Мокша (Темников)	788	21.04.63	322	11.05.47	431	02.04.55
Исса (Паево)	606	06.04.45	444	23.07.41	585	14.04.57
Сивинь (Сивинь)	468	01.04.47	211	30.04.38	336	26.03.55
Вад (Авдалово)	510	21.04.42	324	25.05.41	462	30.03.39
Виндрей (Леплеевское)	465	07.04.70	294	19.07.63	437	27.03.55
Сура (Кадышево)	1 206	13.04.70	704	06.04.43	1 080	13.04.45
Алатырь (Тургенево)	1 080	16.04.69	702	11.08.57	948	02.04.47
Инсар (Языковка)	589	08.04.50	273	27.07.62	531	15.04.57
Пьяна (Гагино)	957	02.04.47	468	20.07.41	710	27.03.55

Высота половодья колеблется в больших пределах и зависит от площади бассейна. Наглядное представление об этом дает полученная эмпирическая зависимость нормы превышения весеннего половодья над зимней меженью (ΔH_0) от площади водосбора (А) (рис. 41, разд. 5.3).

При площади водосбора до 2 000 км² и ширине поймы 1,0 – 3,5 км основная часть объема стока половодья проходит в руслах рек, что приводит к высоким значениям нормы превышения. При увеличении площади водосбора

от 2 000 до 30 000 км² и ширины поймы до 9 км основная часть весеннего стока проходит вне русла, т. е. по пойме. В этих условиях часть стока заполняет ее многочисленные естественные емкости, приводя к распластыванию волны половодья и уменьшению величины ΔH_0.

Абсолютные величины высоты половодья на реках республики колеблются в больших пределах: от 2 – 3 м на малых до 4 – 7, реже 10 м на средних и крупных.

Летне-осенняя межень устанавливается обычно к середине мая – первой половине июня и при отсутствии дождей колеблется в небольших пределах – порядка 20 – 40 см. Низшие уровни чаще всего наблюдаются в августе. Особенно низкой была межень 1972 года, когда с середины июля до августа установилась жаркая и сухая погода.

Высота подъема уровня во время дождевых паводков составляет 1,5 – 3,0 м. Они, как правило, ниже весенних, их продолжительность зависит от характера выпадения дождей и колеблется в среднем от 3 до 24 суток. Зимний уровень воды на 10 – 20 см (иногда до 40) выше летнего. Средняя многолетняя амплитуда колебания уровня воды на большинстве рек составляет 3,8 – 7,9 м.

Зимняя межень обычно устойчивая, характеризуется незначительными колебаниями уровня с некоторой тенденцией его повышения к началу половодья. Низкие уровни наблюдаются в период ледообразования в третьей декаде ноября – первой декаде декабря, а также и в конце февраля – начале марта. Замерзание рек сопровождается небольшим повышением уровня, вызванным уменьшением живого сечения русел льдом.

5.2. Практические приемы расчета наивысших уровней воды при отсутствии гидрометрических наблюдений

При отсутствии материалов наблюдений за уровенным режимом расчетные наивысшие уровни рек для свободного русла определяются путем построения кривой $Q = f(H)$ и расчетным максимальным расходом воды вероятностью превышения $P,\%$. Кривая строится с учетом гидравлических и морфометрических характеристик русла и поймы реки в рассматриваемом створе. Для определения морфометрических характеристик проводятся морфометрические изыскания, в программу которых включают следующие полевые работы: выбор участка реки для разбивки створа с привязкой его к геодезическому обоснованию, описание морфологической характеристики створа, установка временных реперов по створу и нивелирование створа с привязкой к исходному реперу, промеры глубин, наблюдения над уровнями и уклонами поверхности воды, определение ее расхода.

На исследуемом участке разбиваются три створа, называемых морфостворами (основной и два контрольных). Створы разбиваются перпендикулярно течению и по возможности совмещаются с осью проектируемого со-

оружения; контрольные створы разбиваются на участке, имеющем гидравлические характеристики протекания воды, отличные от основного створа.

Во время проведения исследований ведутся наблюдения за уровнем воды по временному водомерному посту. Установление уровня высоких вод производится по опросу старожилов по меткам высоких вод на одном берегу не менее чем в трех точках, распределенных по исследуемому участку реки. Делается подробное описание поймы, русла как по створам, так и выше и ниже их, что необходимо для правильного определения коэффициентов шероховатости русла и пойм.

Вычисление расчетных уровней воды ежегодной вероятностью превышения $P,\%$, построение кривой расходов воды производятся по программе «Морфоствор», составленной для персонального компьютера. Автором программы является А. А. Шутов [2002], ее держателем – Федеральное государственное унитарное предприятие «Дорпроект».

Основа программы представлена формулой Шези:

$$Q = wc\sqrt{RI},$$

где w – площадь водного сечения по створу изысканий; R – гидравлический радиус, м; I – уклон поверхности воды на участке изысканий, доли единицы; c – скоростной коэффициент, определяемый по формуле Н. Н. Павловского [Быков, 1965],

$$c = \frac{1}{n} R^{y},$$

где n – коэффициент шероховатости, определяемый по таблице М. Ф. Скрибнова [Васильев, 1970] в зависимости от характеристики русла и поймы; y – показатель степени, определяемый по формуле Н. Н. Павловского [Быков, 1965],

$$y = 2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13 - 0{,}75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0{,}10).$$

Гидравлический радиус можно заменить средней глубиной при условии, что отношение

$$\frac{H_{ср}}{B} < 0{,}1,$$

где B – ширина водного сечения, м; $H_{ср}$ – средняя глубина водного сечения, м.

Конечным результатом программы «Морфоствор» является построение кривой $Q = f(H)$, по которой, имея значения максимального расхода воды расчетной ежегодной вероятностью превышения $P,\%$ можно определить расчетный уровень вероятностью превышения $P,\%$.

Расчетные наивысшие уровни воды рек в период ледохода определяются по кривой $Q = f(H)$ и расходам воды $Q'_{P,\%}$, вычисляемым по формуле

$$Q'_{P,\%} = \frac{Q_{P,\%}}{K_{зим}},$$

где $Q_{P,\%}$ – расход воды расчетной ежегодной вероятности превышения, м^3/с; $K_{зим}$ – коэффициент, учитывающий изменение гидравлики потока во время ледохода.

Значения $K_{зим}$ определяются по рекам-аналогам, а при их отсутствии принимаются равными 0,8 – 0,9 для малых и средних рек и 0,91 – 0,95 – для больших. На заторных участках вводится поправка ΔH_3, приближенно принимаемая при катастрофически мощных заторах более 5 м, при сильных – от 3 до 5 м и средних – 3 м и менее. При слабых заторах поправка не вводится.

В связи с необходимостью снижения затрат на проектирование автодорожных мостов на строящихся автодорогах республики и внедрением в строительство низководных мостов (весенний ледоход проходит над сооружением) нами разработаны региональные методы расчета уровня весеннего ледохода как одной из основных характеристик для проектирования и дальнейшей эксплуатации этих сооружений.

Вариант I. Для определения расчетного уровня весеннего ледохода $H_{P,\%}$ ежегодной вероятностью превышения $P,\%$ в неизученных створах рек возможен следующий алгоритм.

По проверенной для физико-географических условий рассматриваемой территории методике расчета максимального расхода воды весеннего половодья, предлагаемой Государственным гидрологическим институтом [Определение..., 2003], устанавливается максимальный расход воды $Q_{50\%}$ вероятности превышения. Далее с использованием выявленной в результате проведенного анализа зависимости вида $Q_0 = f(Q_{50\%})$ (рис. 34) вычисляется норма максимального расхода воды весеннего половодья Q_0 по уравнению

$$Q_0 = 1{,}12\,Q_{50\%} - 0{,}65,$$

где $Q_{50\%}$ – максимальный расход воды весеннего половодья 50% вероятности превышения, м^3/с.

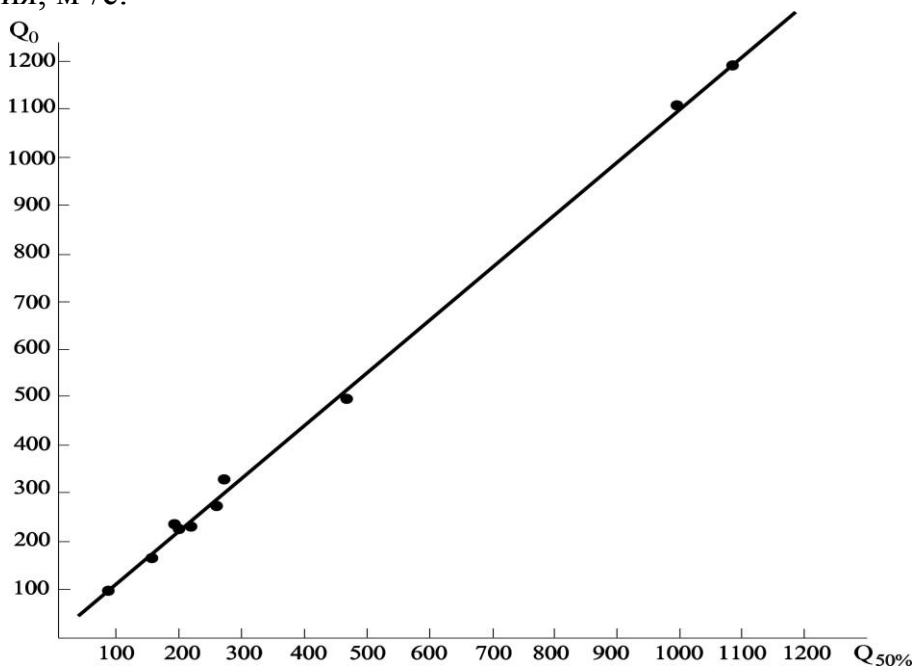


Рис. 34. Зависимость нормы максимального расхода воды весеннего половодья от максимального расхода воды весеннего половодья 50% вероятности превышения

Дальнейший ход решения сводится к определению параметров аналитической кривой распределения расхода воды весеннего ледохода Q_0', коэффициента вариации C_V, коэффициента асимметрии C_S.

Для определения нормы расхода воды весеннего ледохода по имеющимся материалам наблюдений по рекам Мокша, Алатырь, Вад, Сивинь, Исса, Виндрей, Инсар выявлена эмпирическая зависимость вида $Q_0' = f(Q_0)$ (рис. 35).

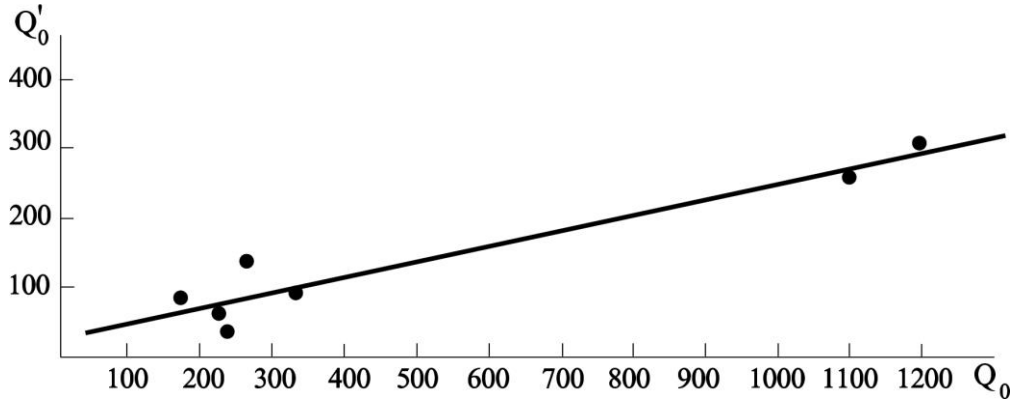


Рис. 35. Зависимость нормы расхода воды весеннего ледохода от нормы максимального расхода воды весеннего половодья

Формула зависимости имеет вид:

$$Q_0' = 0{,}23Q_0 + 27{,}4.$$

На основе фактического материала по вышеперечисленным рекам выявлена зависимость для определения коэффициента вариации C_v (рис. 36).

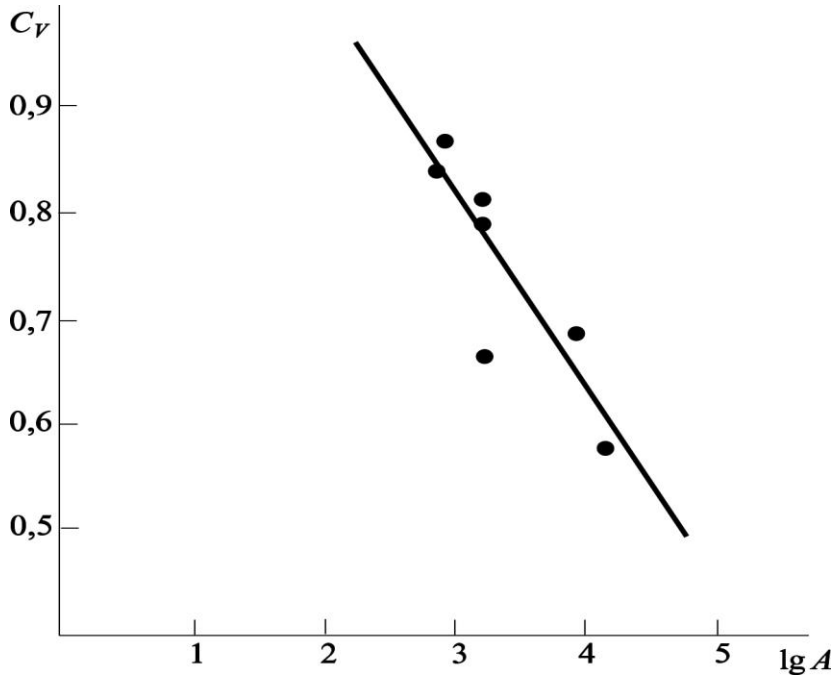


Рис. 36. Зависимость коэффициента вариации расхода воды весеннего ледохода от площади водосбора

Уравнение имеет вид:

$$C_v = 1{,}4 - 0{,}19 \lg A$$

Обе выявленные зависимости имеют высокие коэффициенты корреляции – соответственно $r = 0{,}95 \pm 0{,}02 и$ $r = 0{,}85 \pm 0{,}07$.

Отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации необходимо принимать по методу гидрологической аналогии с использованием эмпирических данных (табл. 18).

Таблица 18

Значения отношений C_s/C_v расходов воды весеннего ледохода для рек Республики Мордовия

Река (пункт)	C_s/C_v
Мокша (Темников)	2,15
Алатырь (Тургенево)	2,00
Вад (Авдалово)	2,00
Сивинь (Сивинь)	1,64
Исса (Паево)	2,50
Виндрей (Леплеевское)	2,36
Инсар (Саранск)	1,40

После вычисления значений параметров Q'_0, C_s и C_v определяется значение расхода воды весеннего ледохода $Q'_{P,\%}$ расчетной вероятностью превышения $P,\%$. Расчетная вероятность превышения устанавливается на основании норм проектирования гидротехнических сооружений. Считая, что ежегодная вероятность превышения величин $Q'_{P,\%}$ и $H_{P,\%}$ однозначна, на заключительной стадии расчета можно определить расчетный уровень весеннего ледохода $H_{P,\%}$ по ранее построенной гидравлическим способом кривой $Q = f(H)$ с использованием программы «Морфоствор».

Вариант II. В предлагаемом варианте в отличие от предыдущего рассматривается решение поставленной задачи путем непосредственной обработки данных фактически наблюденных уровней воды весеннего ледохода и уровней воды низкой зимней межени по рекам республики (Мокша, Алатырь, Инсар, Исса, Сивинь, Вад, Виндрей, Уркат).

Статистической обработке подлежала величина, определяемая как разница между уровнем воды весеннего ледохода и уровнем воды низкой зимней межени, т. е.

$$\Delta H = H_1 - H_2,$$

где ΔH – величина превышения уровня воды весеннего ледохода над уровнем воды низкой зимней межени, см; H_1 – уровень воды весеннего ледохода, см; H_2 – уровень воды низкой зимней межени, см.

По каждой из вышеуказанных рек путем статистической обработки рядов наблюдений величины превышения уровня воды весеннего ледохода над

уровнем воды низкой зимней межени (в дальнейшем величина превышения) вычислены параметры кривых распределения величин превышения: ΔH_0 – норма величины превышения, см; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии.

Анализ величин превышения ΔH_0 позволил выявить зависимость вида $\Delta H_0 = f(A)$ (рис. 37). Полученная зависимость неоднозначна. С ростом площади водосбора от 300 до 2 000 км^2 она выражается уравнением параболы:

$$\Delta H_0 = 0{,}0035 A^{1{,}56}.$$

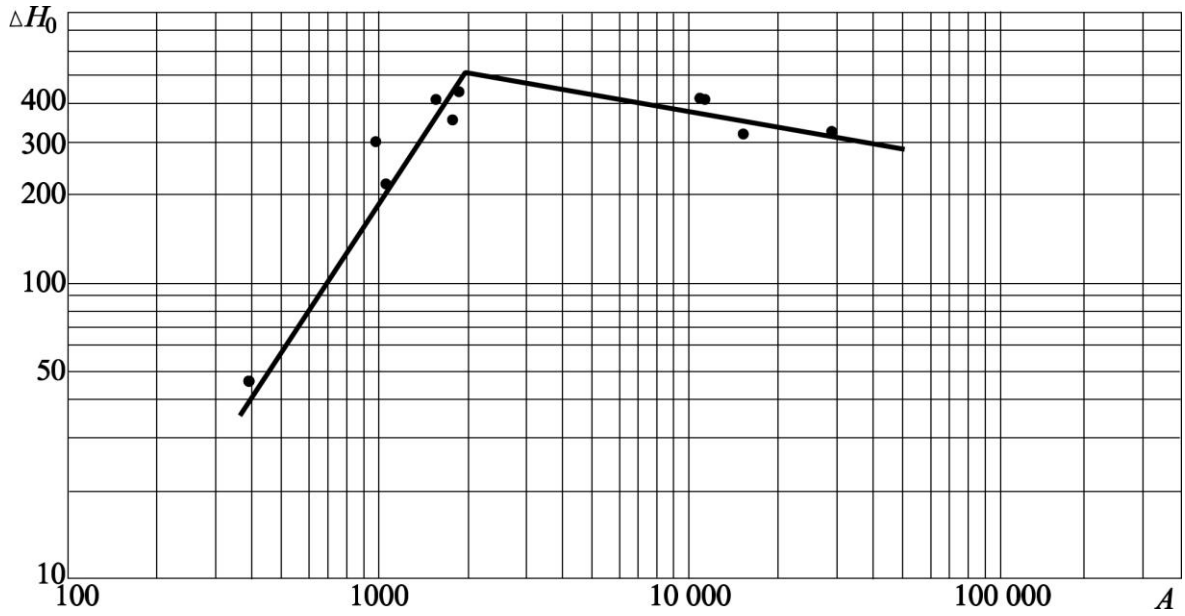


Рис. 37. Зависимость нормы величины превышения от площади водосбора (весенний ледоход)

С ростом площади водосбора от 2 000 до 30 000 км^2 зависимость выражается уравнением гиперболы:

$$\Delta H_0 = \frac{2017}{A^{0{,}186}}.$$

На реках с площадями водосбора до 300 км^2 весенний ледоход обычно не наблюдается, лед тает на месте.

По второму параметру аналитической кривой распределения – коэффициенту вариации получена зависимость вида $C_v = f(\lg \Delta H_0)$ рис.38). Коэффициент корреляции этой связи $r = 0{,}86 \pm 0{,}06$. Уравнение зависимости имеет вид:

$$C_v = 2{,}38 - 0{,}82 \lg \Delta H_0.$$

Отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации при расчетах принимаются с использованием метода гидрологической аналогии (табл. 19).

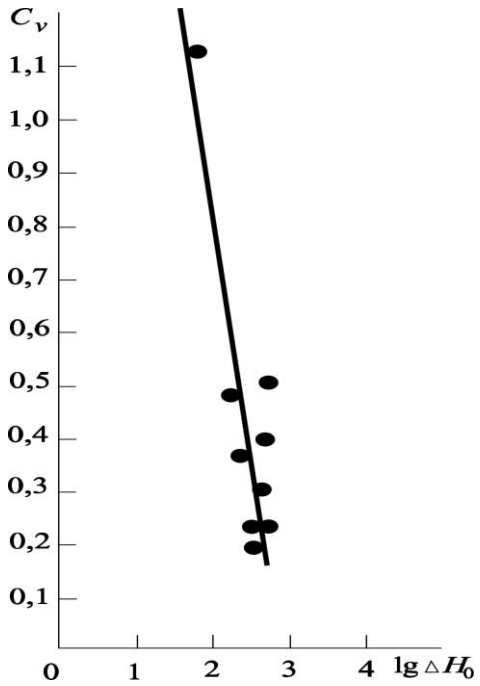


Рис. 38. Зависимость коэффициента вариации от нормы величины превышения весеннего ледохода

Таблица 19

Значения отношений C_s/C_v величин превышения весеннего ледохода для рек Республики Мордовия

Река (пункт)	C_s/C_v
Мокша (Темников)	–1,7
Алатырь (Тургенево)	0,0
Вад (Авдалово)	0,7
Сивинь (Сивинь)	0,3
Исса (Паево)	–4,6
Виндрей (Леплеевское)	–5,0
Инсар (Саранск)	–1,0
Уркат (Уркат)	0,6

Имея эмпирические зависимости основных параметров аналитической кривой распределения величин превышения, можно предложить следующий алгоритм решения поставленной задачи.

1. Вычислив для неисследованного створа по формуле (1) или (2) норму величины превышения ΔH_0, определив по формуле (3) коэффициент вариации C_v, приняв, используя метод гидрологической аналогии, соотношение C_s/C_v, определяем величину превышения $\Delta H_{P,\%}$ расчетной вероятностью $P,\%$, которая устанавливается аналогично варианту I.

2. Уровень воды низкой зимней межени $H_{3.P,\%}$ расчетной вероятностью $p,\%$ определяется следующим образом. По методике, предлагаемой

Государственным гидрологическим институтом [Определение…, 2003], рассчитываем среднегодовой расход воды вероятностью превышения $P,\%$. Имея районное расчетное распределение стока для *V*а и *V*б районов, определяем расход межени за маловодный месяц зимы $Q_{з.P,\%}$. По расчетному расходу воды $Q_{з.P,\%}$ построенной гидравлическим методом кривой $Q = f(H)$ для зимних условий рассматриваемого створа определяем уровень воды низкой межени $H_{з.P,\%}$. В итоге расчетный уровень весеннего ледохода вероятностью превышения – $P,\%$, будет равен:

$$H_{P,\%} = H_{з.P,\%} + \Delta H_{P,\%}.$$

В практике проектирования мостовых переходов при решении рассматриваемой задачи необходимо использовать оба варианта для проведения их сравнительного анализа и принятия наиболее приемлемого результата с учетом материалов полевых изысканий.

5.3. Практические приемы расчета вероятного уровня воды весеннего половодья при проведении предварительных полевых изысканий

Определение вероятного уровня воды весеннего половодья как одного из основных элементов водного режима рек требует разработки методики его расчета, которая отражает гидрологические условия рассматриваемой территории и имеет большое практическое значение: позволяет определять оптимальные режимы эксплуатации водохранилищ и привязанных к ним массивов орошения; планировать режимы водоснабжения; предотвращать наводнения.

Разработка методики связана с характером и объемом имеющейся гидрометеорологической информации, с теоретическим и физическим анализом формирования предсказуемого гидрологического явления. Все факторы, влияющие на характер весеннего половодья, можно разделить на метеорологические, определяющие интенсивность снеготаяния и образования талых вод, и прочие факторы подстилающей поверхности, обусловливающие величину аккумуляции талых вод на поверхности бассейнов и инфильтрации в грунт, характер распределения снега на поверхности бассейнов и стекания талых вод на склонах и в руслах рек [Соколовский, 1968].

Основными факторами формирования весеннего стока на территории республики следует считать: снегозапасы; весенние осадки; глубину промерзания почвы; запас влаги в ней.

Весеннее половодье на рассматриваемой территории является такой фазой водного режима рек, на которую приходится основное количество годового стока. По многолетним наблюдениям, в бассейне р. Мокши и левобережных притоков р. Суры весенний сток составляет 75 – 80 % годового [Ресурсы…, 1973]. Начало фазы половодья зависит от конкретной синоптической обстановки и, как следствие, имеет различные сроки наступления (см. табл. 5).

Методика определения ожидаемого уровня весеннего половодья предусматривает проведение двух этапов исследований: первый этап включает в себя производство полевых работ, второй – камеральных. Как указывалось выше, для расчета уровня весеннего половодья наибольшее значение имеют данные о снеге на водосборе:

– снегозапасы;

– максимальные снегозапасы;

– распределение снега по площади бассейна.

Для определения снегозапасов используют данные ландшафтно-маршрутных снегомерных съемок, проводимых по водосборам исследуемых рек. При их осуществлении наиболее целесообразно иметь маршруты следующей длины: в поле – 3 км, в лесу – 1 км, в овражно-балочной сети – от 0,5 до 1,0 км с измерением высоты снега через 20 м в поле, через 10 м – в лесу и через 5 м – в оврагах и балках [Водогрецкий, 1975]. Плотность снега устанавливается с однократной повторностью в каждой десятой точке измерения высоты снега, включая овраги и балки. В некоторых случаях общая длина ландшафтных маршрутов может достигать 10 – 30 км. Число маршрутов назначается с учетом формы водосбора: от трех для округлого и до шести для вытянутого.

По данным снегосъемок на открытой местности строят карты изолиний максимальных снегозапасов. Для расчета средних снегозапасов в бассейне – $W_б$ к значениям запасов в поле $W_п$, определенным по карте, вводится поправка на повышенное накопление снега в лесу:

$$W_б = W_п(1-\gamma) + W_п K_л \gamma,$$

где γ – лесистость в долях от площади бассейна; $K_л$ – соотношение снегозапасов в лесу и в поле. Значение коэффициента $K_л$ устанавливается по результатам одноразовых измерений снега в поле и в лесу. При отсутствии данных часто принимают $K_л = 1{,}1$. При малой лесистости принимают $W_б = W_п$.

При подсчете запасов воды на водосборе необходимо учитывать и запас воды в ледяной корке:

$$W_{л.к.} = \rho_{л.к.} h\, f_{л.к.},$$

где $\rho_{л.к.}$ – плотность ледяной корки, равная в среднем 900 кг/м^3; h – средняя толщина ледяной корки, м; $f_{л.к.}$ – площадь покрытия ледяной коркой в долях от общей площади.

Формула для вычисления общего запаса воды на водосборе:

$$W_б = f_п W_п + f_л W_л + f_{об} W_{об} + W_{л.к.},$$

где $W_п, W_л, W_{об}, W_{л.к.}$ – соответственно запасы воды в снеге на полевых участках, в лесу, овражно-балочной сети и в ледяной корке; $f_п$, $f_л$, $f_{об}$ – соответственно доли площадей водосбора.

Не менее важными факторами формирования весеннего стока являются запасы влаги в почве на начало таяния и глубина промерзания почвы. Запасы

влаги в почве (обычно в слое 0 – 100 см) рассчитываются по уравнению водного баланса этого слоя почвы, для чего требуются данные о начальных запасах влаги, осадках, испарении, температуре воздуха, его относительной влажности, типе почв и растительности в рассматриваемых бассейнах. Последнее усложняет задачу ввиду разряженной сети метеостанций на рассматриваемой территории, поэтому единственным решением становится проведение съемок влажности в предзимний период (октябрь – первая декада ноября). Основным вопросом организации этих исследований является определение местоположения и количества точек наблюдений за влажностью почвы с необходимой точностью.

Число скважин на водосборах устанавливается по признаку сложности ландшафта водосбора. Обычно в качестве критерия сложности ландшафта принимается среднее квадратическое отклонение σ запаса влаги в почвогрунте: чем разнообразнее условия, тем больше σ, и наоборот [Водогрецкий, 1975]. Среднее квадратическое отклонение равно:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(W_i - \overline{W})^2}{n}},$$

где W_i – влагозапасы в слое почвы 0 – 100 см в каждом пункте на водосборе; $\overline{W}$ – среднее арифметическое значение влагозапасов на всех пунктах на водосборе; n – количество пунктов.

Среднее квадратическое отклонение является показателем степени неравномерности распределения влагозапасов по площади водосбора. В. Е. Водогрецкий [1975] предлагает следующие ориентировочные значения σ запасов влаги для метрового слоя почвы на водосборах различной сложности:

а) водосбор простой – рельеф, почва и растительность однообразны, $\sigma = 10 - 15$ мм;

б) водосбор сложный – отдельные его участки различаются по рельефу, почве и растительности, $\sigma = 30 - 50$ мм;

в) водосбор очень сложный – в разных его частях неодинаковы рельеф, почва и растительность, $\sigma = 60 - 90$ мм.

Число скважин (пунктов), необходимых для получения данных о среднем влагозапасе в метровом слое почвы, составляет 5 – 7 для простого водосбора, 10 – 20 – для сложного и 30 – 60 – для очень сложного.

Распределение скважин на водосборе производится по принципу механического отбора, который заключается в равномерном их размещении.

Влажность почвогрунта вычисляется в процентах от его абсолютно сухой массы. Для ее расчета в миллиметрах используется формула

$$W_n = \frac{E\rho h}{10},$$

где W_n – общее содержание влаги в почвогрунте, выраженное в виде слоя, мм; E – влажность, %; ρ – объемная масса, г/см^3; h – мощность слоя почвогрунта, см. 10 – коэффициент для перевода запаса влаги из сантиметров в миллиметры.

Средние запасы влаги на водосборах рассчитываются как среднее арифметическое из всех пунктов.

Глубина промерзания почвы является важным фактором инфильтрации талых вод во время снеготаяния, а следовательно, и стока половодья. В лесостепной зоне водопроницаемость мерзлой почвы колеблется в широком диапазоне. Величину промерзания теоретически можно рассчитать, но для этого необходимы данные о коэффициентах теплопроводности снега, мерзлой и талой почвы, о температуре поверхности снега, влажности почвы по слоям и др. Поскольку таких данных нет предусматривается нахождение этой величины в полевых условиях. Так как необходимо знать не только среднюю глубину промерзания, но и ее распределение по площади, то эти работы выполняют одновременно со снегомерной съемкой. Глубина промерзания в каждом из пунктов устанавливается с помощью почвенного бура АМ-26, мотобура ДМ-10 или путем отрывки шурфа. Количество пунктов наблюдений n за промерзанием на водосборе зависит от глубины промерзания L:

L, см	10	20	30	40	50	70	90
n, шт.	135	62	44	24	19	14	10

Данная зависимость правомерна для полевых и лесных участков водосборов и основана на связи средних глубин промерзания почвы с коэффициентом вариации, характеризующим пространственную неравномерность глубин промерзания [Капотов, 1969].

Заключительным этапом полевых исследований являются работы по определению уровня низкой зимней межени в рассматриваемых створах обследованных водосборов. В изучаемом регионе зимняя межень обычно наступает в ноябре и заканчивается в марте. Полевые работы необходимо проводить в феврале, так как в этот период по многолетним наблюдениям низкий уровень межени на всех реках.

Задачами второго этапа являются определение ожидаемой величины слоя стока половодья $h_{P,\%}$ ежегодной вероятностью превышения $P,\%$ и ожидаемого уровня воды в рассматриваемых створах. Имея данные по максимальным снегозапасам и учитывая осадки, которые принимаются по их норме за рассматриваемый период, вычисляются запасы влаги по обследованному бассейну $W_б$ (мм). Запасы влаги в почве $W_п$ (мм) в слое 0 – 100 см к началу снеготаяния принимаются равными предзимнему увлажнению (третья декада октября – первая декада ноября). Глубина промерзания зоны аэрации почвы L (см) принимается по результатам полевых изысканий.

По данным о запасах влаги на водосборе, в почве и о глубине ее промерзания, используя эмпирические зависимости В. А. Романенко [Бефани, 1983] для лесостепной зоны (рис. 39, 40), определяем слой возможных потерь $h_п$ (мм) и ожидаемый слой стока половодья $h_п$ (мм).

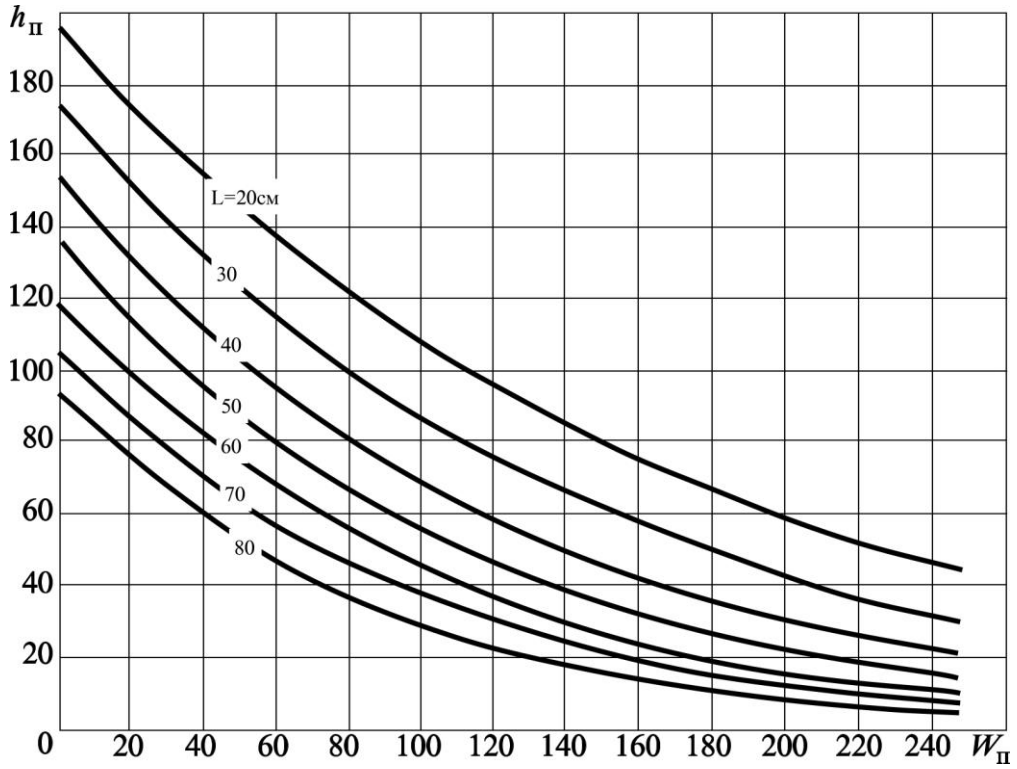


Рис. 39. Зависимость слоя потерь талого стока $h_п$ от осенних запасов влаги в почве $W_п$ и максимальной глубины промерзания L

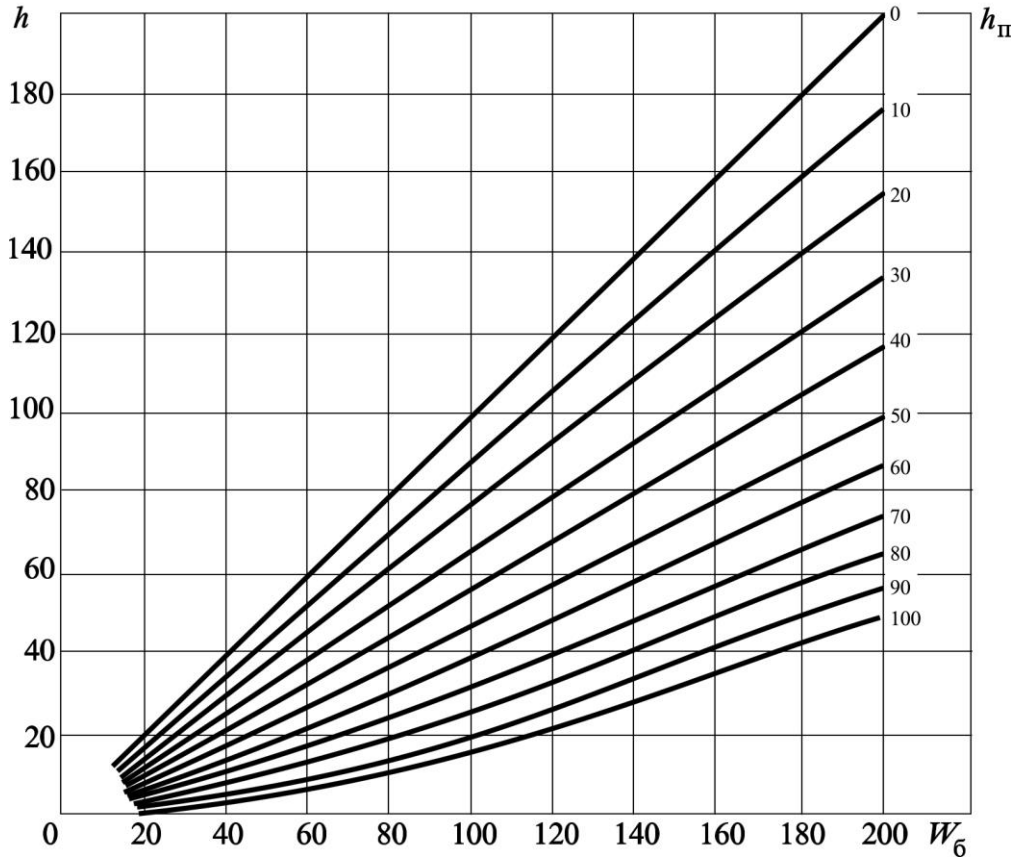


Рис. 40. Зависимость слоя весеннего половодья h от запасов воды в бассейне $W_б$ и потерь $h_п$

Определение вероятности превышения слоя стока весеннего половодья осуществляется методом гидрологической аналогии путем сравнения полученной величины со значениями этого показателя за многолетний период для рассматриваемого региона [Исследования и расчеты..., 1980] (табл. 20).

Таблица 20

Слой стока весеннего половодья рек Мордовии

Реки, створ	Площадь водосбора, км^2	Слой стока, мм, ежегодной вероятностью превышения P,%											
		1	3	5	10	25	50	75	80	85	90	95	97
Мокша (Темников)	15 800	159	142	134	121	102	80	61	57	50	44	35	29
Мокша (Шавелевский Майдан)	28 600	170	147	136	119	93	72	54	50	46	41	35	31
Исса (Паево)	1 790	179	160	151	137	114	90	68	63	56	50	40	32
Сивинь (Сивинь)	1 060	193	175	162	150	126	93	75	69	61	53	39	30
Сатис (Расстанье)	1 230	124	109	101	90	73	57	44	41	38	34	29	26
Сарма (Сарминский Майдан)	741	141	117	105	89	66	47	33	31	28	25	21	20
Вад (Авдалово)	1 930	182	162	151	135	110	84	61	56	49	42	31	25
Виндрей (Леплеевское)	1 010	250	136	129	118	100	80	60	55	48	42	31	24
Алатырь (Мадаево)	1 410	182	160	150	134	111	89	70	66	60	55	48	43
Алатырь (Тургенево)	11 000	192	169	156	138	109	82	58	53	46	40	30	24
Рудня (Дивеев Усад)	1 140	200	180	170	154	130	102	75	69	62	52	38	29
Инсар (Саранск)	1 610	209	182	170	152	125	101	82	77	68	62	57	52
Пьяна (Гагино)	2 800	220	193	180	161	130	100	72	66	58	50	39	31

Определив ожидаемую величину слоя весеннего половодья h и ее вероятность превышения для каждого из рассматриваемых неизученных створов рек, рассчитываем максимальный уровень при условии равнообеспеченности значений вероятности превышения слоя стока весеннего половодья и его наивысших уровней.

Для решения этой задачи произведена статистическая обработка наблюдаемых наивысших уровней весеннего половодья и уровней предше-

ствующей зимней межени по рекам Мокша, Алатырь, Инсар, Вад, Виндрей, Сивинь, Исса, Уркат. Обработке подлежала величина, определяемая как разность вышеупомянутых параметров, т. е.

$$\Delta H = H_1 - H_2,$$

По каждой из рек путем статистической обработки рядов наблюдений величин ΔH вычислены параметры кривых распределения: ΔH_0 – норма величины превышения, см; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии. Анализ данных величин позволил выявить следующие эмпирические зависимости.

1. Для нормы величины превышения $\Delta H = f(A)$ (рис. 41),

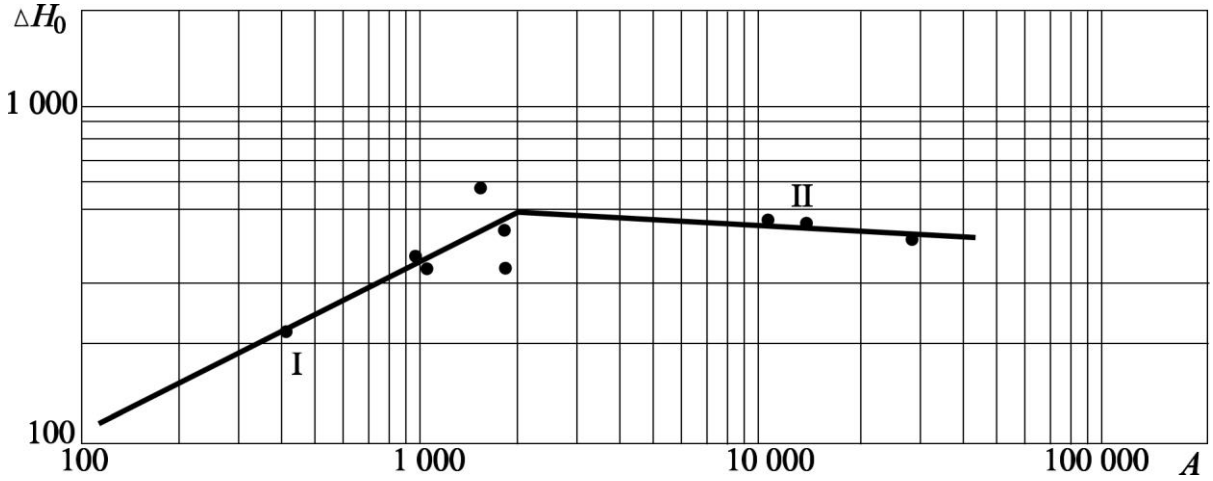


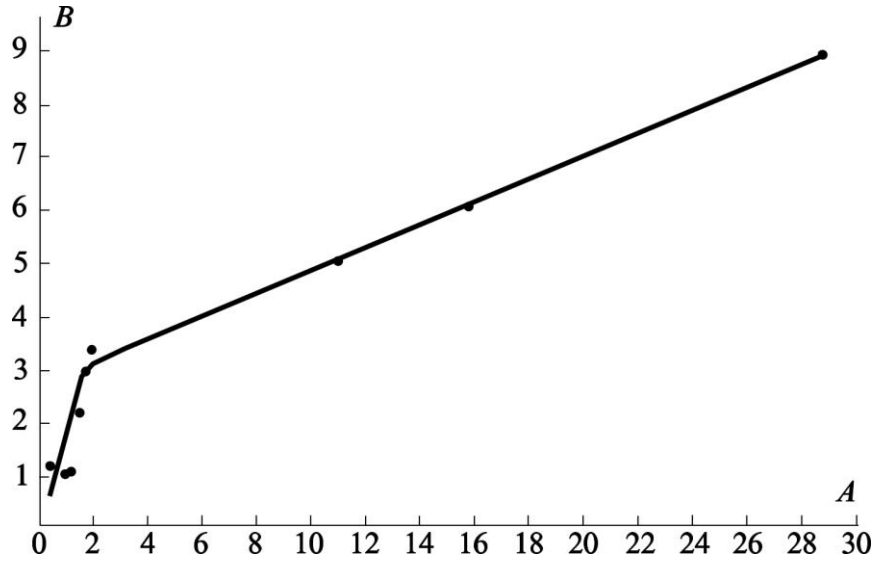
Рис. 41. Зависимость нормы величины превышения
от площади водосбора (весеннее половодье)

Полученная зависимость неоднозначна и аппроксимирована формулами

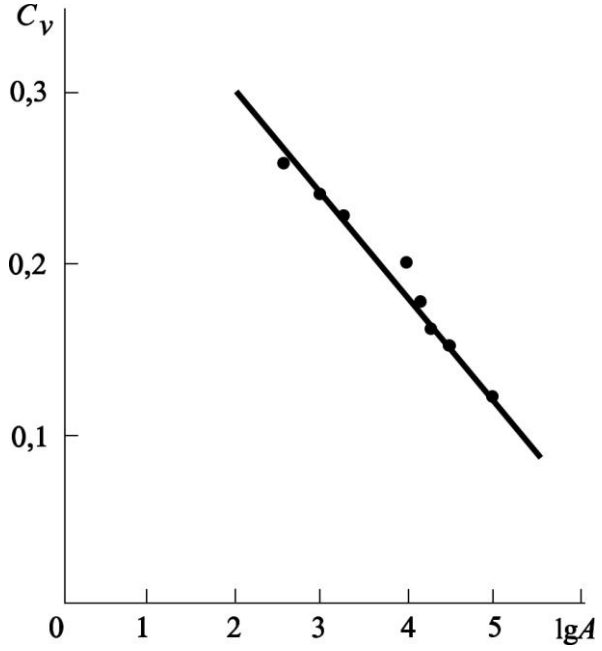
$$\Delta H_0 = 8{,}4\,A^{0{,}54} \quad \text{при} \quad A = 0 - 2000\,\text{км}^2$$

$$\Delta H_0 = \frac{791}{A^{0{,}057}} \quad \text{при} \quad A = 2000 - 30000\ \text{км}^2.$$

Неоднозначность объясняется тем, что до $A = 2000$ км^2 ширина пойм рек B (км) рассматриваемого региона равна 1,0 – 3,5 км^2 (рис. 42) и основная часть объема стока половодья проходит в руслах рек, что обусловливает повышение нормы превышения. При A от 2 000 до 30 000 км^2 ширина пойм увеличивается до 9 км (см. рис.42) и основная часть весеннего стока проходит вне русла, т. е. по пойме, причем часть стока заполняет ее многочисленные естественные емкости, что приводит к распластыванию волны половодья. Следовательно, по мере увеличения ширины поймы величина нормы превышения уменьшается.



Р и с . 42. Зависимость ширины поймы от площади водосбора



Р и с . 43. Зависимость коэффициента вариации от площади водосбора

2. Для коэффициента вариации полученная зависимость аппроксимируется формулой (рис. 43)

$$C_v = 0{,}42 - 0{,}06 \lg A.$$

Коэффициент корреляции этой связи $r = 0{,}98 \pm 0{,}01$.

3. Для коэффициента асимметрии зависимость аппроксимирована формулой (рис. 44)

$$C_s = 1{,}88 - 13{,}75 C_v$$

Коэффициент корреляции этой связи $r = -0{,}80 \pm 0{,}01$.

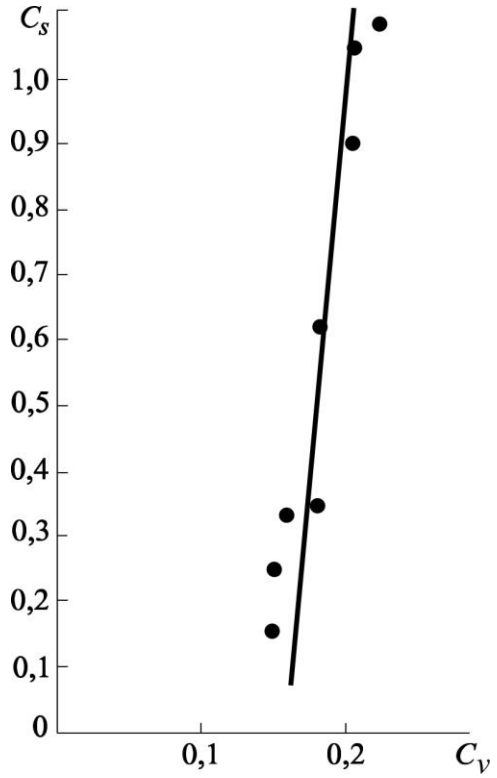


Рис. 44. Зависимость коэффициента асимметрии от коэффициента вариации

Полученные эмпирические зависимости (I) – (IV) позволяют определить вероятную величину $\Delta H_{P,\%}$ для любого рассматриваемого створа рек исследуемой территории при условии, что вероятность превышения величины ΔH_0 равнозначна вероятности превышения слоя стока весеннего половодья h.

Конечный результат поставленной задачи – ожидаемая величина уровня весеннего половодья для неизученных створов рек рассматриваемой территории – определяется по формуле

$$H_{P,\%} = \Delta H_{P,\%} + H_2,$$

где $H_{P,\%}$– ожидаемый уровень воды весеннего половодья ежегодной вероятностью превышения $P,\%$, м; $\Delta H_{P,\%}$– величина превышения уровня весеннего половодья над уровнем зимней межени ежегодной вероятностью превышения %, м; H_2– величина уровня низкой зимней межени, м.

Величина H_2 для исследуемых створов определяется расчетным путем, описанным в варианте II раздела 5.2, или непосредственным измерением при производстве снегомерной съемки.

Полученные эмпирические зависимости могут успешно применяться для определения вероятных уровней весеннего половодья рассматриваемого региона. Используя теоретические предпосылки и подвергая анализу данные наблюдений на опорной сети, при современном состоянии гидрологических исследований оказалось возможным получение достаточно точных региональных зависимостей с учетом потерь весеннего стока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными задачами в области инженерно-гидрологических расчетов являются их совершенствование – разработка новых методов определения основных характеристик гидрологического режима рек при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. Это особенно актуально в последние годы в связи с сокращением сети режимных наблюдений на реках, в том числе и в Республике Мордовия. Сложилось положение, при котором темпы строительства автодорог и связанных с ними гидротехнических сооружений, газификации территории, реконструкции мелиоративных систем и водозаборов в республике превзошли возможности имеющегося банка данных по гидрологическому режиму рек.

Объективные обстоятельства потребовали использовать все имеющиеся данные по гидрометрическим наблюдениям закрытых и ныне действующих гидрометрических станций и постов, создать интерполяционные карты параметров стока и разработать новые региональные эмпирические зависимости его характеристик от физико-географических условий рассматриваемого региона. Полученные при помощи географо-статистических методов эмпирические зависимости, отображающие физический смысл процессов речного стока, делают инженерно-гидрологические расчеты более достоверными с той степенью точности решения, которая возможна в настоящее время на территории республики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Быков В. Д.* Гидрометрия / В. Д. Быков, А. В. Васильев. – Л. : Гидрометеоиздат, 1965. – 425 с.

2. *Бефани Н. Ф.* Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам / Н. Ф. Бефани, Г. П. Калинин. – Л. : Гидрометеоиздат, 1983. – 390 с.

3. *Васильев А. В.* Вводно-технические изыскания / А. В. Васильев, С. В. Шмидт. – Л. : Гидрометеоиздат, 1970. – 342 с.

4. *Водогрецкий В. Е.* Водно-балансовые экспедиционные исследования / В. Е. Водогрецкий, О. Е. Крестовский. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – 143 с.

5. Гидрометрическая оценка подземного питания рек междуречья Мокши, Суры и Алатыря: технический отчет Верх.-Волж. управления по гидрометеорологии и контролю природной среды. – Горький : Б. и. 1986. – 78 с.

6. *Евстигнеев В. М.* Речной сток и гидрологические расчеты. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1990. – 304 с.

7. *Иванов К. Е.* Основы гидрологии болот лесной зоны и расчет водного режима болотных массивов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1957. – 104 с.

8. Исследования и расчеты стока рек для проектирования мелиоративных систем в Нечерноземной зоне РСФСР. Кн. 1. / Ин-т «Мосгипроводхоз». – М., 1980. – 122 с.

9. Капотов А. А. Исследование водного режима почво-грунтов зоны аэрации, их промерзания, водно-физических и инфильтрационных свойств // Тр. ГГИ. Вып. 176. – Л., 1969. – 480 с.

10. *Ковзель А. Г.* Упрощенная схема расчета водоотдачи из снега // Тр. ГГИ. Вып. 99. Л., 1962. – С. 141 – 176.

11. Определение основных расчетных гидрологических характеристик СП 33–101–2003 / Гос. гидролог. ин-т. – СПб., 2003. – 74 с.

12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1. – Л. : Гидрометеоиздат, 1973. – 475 с.

13. *Соколов А. А.* Гидрография СССР. – Л. : Гидрометеоиздат, 1964. – 468 с.

14. *Соколовский Д. А.* Речной сток. – Л. : Гидрометеоиздат, 1968. – 538 с.

15. Схема мелиорации и использования местного стока Мордовской АССР. Кн. 3. / Ин-т «Приволжгипроводхоз». – Пенза, 1972. – 131 с.

16. Шутов А. А. Отчет по разработке методики расчета уровней воды весеннего половодья, ледохода, межени и внедрение данной методики в процесс проектирования автодорог и мостовых переходов / ФГУП «Дорпроект». – Саранск, 2002. – 7 с.

17. *Шутов А. М.* Региональные зависимости для расчета максимального дождевого стока рек и малых водотоков Республики Мордовия // Вестн. Морд. ун-та». – 1998. – № 12. – С. 94 – 100.

18. *Шутов А. М.* Расчет меженного стока рек Мордовии // Гидротехника и мелиорация. – 1977. – № 2. – С. 103 – 105.

19. *Ямашкин А. А.* Физико-географические условия и ландшафты Мордовии. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 1998. – 156 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Минимальные летние расходы воды на реках по результатам гидрометрических съемок

№ п/п	Река	Створ измерений	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Измеренный расход, м^3/с	Дата измерения	$K = \frac{Q_{P,\%}}{Q_{изм.}}$			Аналог
							50 %	75 %	95 %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Ирса	д. Печи	3,2	164	0,046	09.09.83	0,800	0,588	0,388	Алатырь (Мадаево)
2	Мадаевка	д. Курлей	10	47,5	прсх.	15.09.83	—	—	—	—
3	Ирсеть	д. Азрапино	19,5	206	0,15	16.09.83	0,701	0,515	0,340	—“—
4	Стирша	с. Шишадеево	5,5	51,2	0,037	17.09.83	0,379	0,282	0,190	Рудня (Дивеев Усад)
5	Вышковка	д. Крутолей	10,4	27,0	прсх.	08.09.83	—	—	—	—
6	Мокрая Чеварда	с. Новый Майдан	11,2	39,8	0,004	08.09.83	0,800	0,580	0,388	р. Алатырь д. Мадаево
7	Сухая Чеварда	а/д мост Александровка-Разино	7,2	17,5		01.09.83	—	—	—	—
8	Пандус	п. Ст. Разина	7,7	57,2	0,10	08.09.83	0,800	0,588	0,388	—“—
9	Панзелка	д. Панзелка	5,7	45,0	0,070	08.09.83	—“—	—“—	—“—	—“—
10	Арзенка	д. Гари	6,4	66,3	0,022	09.09.83	—“—	—“—	—“—	—“—
11	Меньшовка	с. Новое Урюнино	3,2	16,6	прсх	09.09.83	—	—	—	—
12	Ковач	п. Круглый	3,1	75,2	0,025	10.09.93	—“—	—“—	—“—	—“—
13	Ужовка	д. Осиновка	2,3	42,5	0,053	15.09.83	0,701	0,515	0,340	—“—
14	Варма	д. Александровка	37	152	0,150	31.05.84	0,581	0,424	0,288	Мокша (Темников)
15	Кивчей	д. Лысая Гора	11,0	16,1	0,182	01.06.84	1,593	1,148	0,889	Сивинь (Сивинь)
16	Уркат	д. Муравлянка	30,0	112	0,099	31.05.84	1,00	0,741	0,481	Уркат (Урей)
17	Нулей	д. Новоармеевка	19,2	31,0	прсх	31.05.84	—	—	—	—
18	Гуменка	д. Гумны	7,5	64,0	0,010	20.05.84	0,426	0,311	0,212	Мокша (Темников)

19	Жабка	г. Краснослободск	1,0	22,0	0,012	29.05.84	0,506	0,369	0,251	—“—
20	Шапа	д. Новый Усад	2,0	51,0	0,048	30.05.84	0,542	0,396	0,269	—“—
21	Урей	Д. Урей-3-й	19,0	191	0,015	30.05.84	0,542	0,396	0,269	—“—
22	Сивинь	д. Среднее Поле	62,0	795	0,19	01.06.84	1,593	1,148	0,889	Сивинь (Сивинь)
23	Ожга	с. Никольск, Саловка	1,5	200	0,073	01.06.84	1,593	1,148	0,889	—“—
24	б/н	с. Лада	3,0	60,3	0,029	25.09.83	0,775	0,550	0,333	Инсар (Саранск)
25	Большая Атьма	д. Юсуповка	6,8	348	0,32	24.09.83	0,715	0,508	0,308	—“—
26	Ладув	а/д мост	3,4	143	0,061	25.09.83	0,775	0,550	0,333	—“—
27	Исса	д. Каменный Брод	11,0	576	0,180	24.05.84	0,484	0,353	0,240	Мокша (Темников)
28	Язовка	д. Малые Ичалки	5,7	218	0,190	27.09.83	0,613	0,450	0,297	Алатырь (Мадаево)
29	Калыша	д. Васильевка	6,0	135	0,150	27.09.83	0,682	0,386	0,360	Калыша (Васильев-ка)
30	Барахманка	д. Тюрька	3,3	138	0,038	29.09.83	0,613	0,450	0,297	Алатырь (Мадаево)
31	Чанга	д. Козловка	2,7	34,5	0,032	29.09.83	0,613	0,450	0,297	—“—
32	Уксун	п. Бараки	2,9	39,9	0,098	30.09.83	0,694	0,510	0,337	—“—
33	Меня	д. Вихляевка	52,5	266	0,180	01.10.83	0,905	0,524	0,167	Меня (Олевка)
34	Пелька	д. Гуляево	3,5	122	0,063	26.09.83	0,624	0,459	0,303	Алатырь (Мадаево)
35	Кемлятка	п. Ичалки	1,4	80,7	0,092	26.09.83	0,624	0,459	0,303	—“—
36	Тат. Ве-ленькей	п. Ичалки	3,6	41,5	0,005	26.09.83	0,624	0,459	0,303	—“—
37	Андреевка	с. Суродеевка	1,5	65,9	0,030	30.09.83	0,613	0,450	0,297	—“—
38	Рябка	устье	0,2	183	0,108	30.05.84	0,542	0,396	0,269	Мокша (Темников)
39	Шелдаис	с. Наровчат	5,0	389	0,79	28.05.84	0,581	0,424	0,288	—“—
40	Лопуховка	—“—	0,5	67,4	0,035	29.05.84	0,581	0,424	0,288	—“—
41	Паньжа	д. Старая Дубровка	9,0	277	0,051	29.05.84	0,581	0,424	0,288	—“—
42	Сезелка	с. Троицк	1,0	158	0,055	29.05.84	0,581	0,424	0,288	—“—
43	Большой Азясь	д. Малый Азясь	5,5	158	0,130	29.05.84	0,506	0,369	0,251	—“—
44	Леплеев-ский	д. Лосевка	6,0	105	0,26	29.05.84	0,506	0,369	0,251	Мокша (Темников)

45	Исса	д. Супягино	142	38	0,021	24.05.84	0,484	0,353	0,240	—“—
46	Исса	с. Адашево	62	163	0,41	27.05.84	0,554	0,404	0,257	—“—
47	Шишов	устье	—	113	0,05	24.05.84	0,484	0,353	0,240	—“—
48	Инсарка	г. Инсар	1,0	327	0,023	26.05.84	0,530	0,387	0,263	—“—
49	Сеитьма	а/д мост Ямщина – Кочелае-во	6,5	420	0,48	27.05.84	0,554	0,404	0,257	Мокша (Темников)
50	Сивинь	с. Старая Теризморка	84	605	0,069	02.06.84	1,593	1,148	0,889	Сивинь (Сивинь)
51	Рудня	п. Красная Рудня	70,5	159	0,18	18.09.83	0,415	0,308	0,208	Рудня (Дивеев Усад)
52	Рудня	д. Масловка	74,5	56,9	0,15	19.09.83	0.415	0,308	0,208	—“—
53	Ростанка	п. Красная Рудня	1,8	71,8	0,043	18.09.83	0,415	0,308	0,208	—“—
54	б/н	д. Масловка	1,8	19,6	0,012	19.09.83	0,415	0,308	0,208	—“—
55	Иресть	д. Красновка	18	286	0,25	02.06.84	1,00	0,742	0,500	—“—
56	Тавла	д. Макаровка	5,4	248	0,31	19.09.83	0,640	0,452	0,274	Инсар (Саранск)
57	Аморда	д. Ивановка	2,5	605	0,89	24.09.83	0,358	0,254	0,154	—“—
58	Ришлейка	д. Аненково	0,5	70,7	0,046	23.09.83	0,660	0,468	0,284	—“—
59	Пензятка	д. Александровка	2,0	198	0,094	23.09.83	0,660	0,468	0,284	—“—
60	Лямбирка	д. Хаджи	1,5	60,1	0,019	23.09.83	0,660	0,468	0,284	—“—

Примечание: прсх — река пересохла

Приложение 2

Максимальные зимние расходы воды на реках по результатам гидрометрических съемок

№ п/п	Река	Створ измерений	Растение от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Измеренный расход м^3/сек	Дата измерения расхода	$K = \frac{Q_{P,\%}}{Q_{изм.}}$			Аналог
							50 %	75%	95%	
1	Инсар	г. Рузаевка	137	378	0,15	12.02.84	1,208	0,857	0,519	Инсар (Саранск)
2	Инсар	ст. Голицыно	126	584	0,16	11.02.84	1,208	0,857	0,519	—“—
3	Шебдас	д. Юрьевка	1,3	39,4	прмз	10.02.84	—	—	—	—“—
4	Ускляй	с. Арх. Голицыно	0,6	43,9	прмз	10.02.84	—	—	—	—“—
5	Карнай	д. Монастырское	0,2	375	0,026	10.02.84	1,500	1,064	0,645	—“—
6	Пишля	д. Тат. Пишля	4,2	127	0,026	13.02.84	1,722	1,222	0,741	—“—
7	Левжа	д. Ключарево	17,0	126	прмз	11.02.84	—	—	—	—“—
8	Левжа	Устье	0,3	189	прмз	12.02.84	—	—	—	—“—
9	Панзелка	д. Панзелка	—	57,5	0,070	06.02.76	1,280	0,943	0,620	Алатырь (Мадаево)
10	Ирса	с. Печи	—	162	0,007	07.02.76	1,280	0,943	0,620	—“—
11	Иресть	с. Малая Пуза	—	437	0,17	15.02.76	1,280	0,943	0,620	—“—
12	Уркат	д. Нуравлянка	—	274	0,003	20.02.76	—	—	—	—“—
13	Уркат	с. Чурино	—	498	0,39	25.02.76	0,870	0,645	0,490	Уркат (Урей)
14	Нулуй	д. Б. Бриловка	—	203	0,010	24.02.76	0,800	0,582	0,400	Мокша (Темников)

Примечание: прмз — река перемерзла

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

Глава 1. ГОДОВОЙ СТОК
1.1. Факторы формирования и норма годового стока 5
1.2. Изменчивость годового стока 9
1.3. Практические приемы расчета годового стока при отсутствии 11 материалов гидрометрических наблюдений 11
1.4. Внутригодовое распределение стока 13

Глава 2. МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ
2.1. Факторы формирования и норма слоя стока весеннего половодья 18
2.2. Изменчивость стока весеннего половодья 22
2.3. Максимальные расходы воды весеннего половодья 23
2.4. Практические приемы расчета слоя стока и максимальных расходов воды весеннего половодья при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений 23

Глава 3. МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ
3.1. Факторы формирования и норма стока дождевых паводков 36
3.2. Практические приемы расчета максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений 38

Глава 4. МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК
4.1. Факторы формирования и норма минимального стока 42
4.2. Практические приемы расчета характеристик минимального стока при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений 57

Глава 5. УРОВЕННЫЙ РЕЖИМ РЕК
5.1. Режим уровней воды рек 51
5.2. Практические приемы расчета наивысших уровней воды при отсутствии материалов гидрометрических наблюдений 52
5.3. Практические приемы расчета вероятного уровня воды весеннего половодья при проведении предварительных полевых изысканий 60

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 71
ПРИЛОЖЕНИЯ 73