

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

И.Н. Гордеев, О.И. Иванова

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ В ПРИРОДООБУСТРОЙСТВЕ

Методические указания

Электронное издание

Красноярск 2023

Рецензенты:

*В.Н. Белобородов, кандидат технических наук,
директор ООО НПФ «Изотор»*

*Л.А. Путинцев, кандидат географических наук, начальник отдела
гидрологических прогнозов Гидрометеоцентра
ФГБУ «Среднесибирское УГМС»*

Гордеев, И.Н.

Гидрологические расчеты в природообустройстве [Электронный ресурс]: методические указания / И.Н. Гордеев, О.И. Иванова; Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2023. – 51 с.

Содержит теоретический материал для практических занятий и самостоятельной работы студента.

Предназначено для бакалавров Института землеустройства, кадастров и природообустройства, обучающихся по направлению подготовки 20.03.02 – Природообустройство и водопользование, профиль «Водные ресурсы и водопользование» очной и заочной форм обучения.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного аграрного университета

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Модуль 1. Гидрологические характеристики	5
Модульная единица 1.1	5
Занятие № 1. Гидрологические характеристики, единицы их измерения. Статистические характеристики и параметры, используемые при анализе гидрологических данных	5
Модульная единица 1.2	6
Занятие № 2. Оценить однородность годового стока реки	6
Модульная единица 1.3	8
Занятие № 3. Связь расходов и уровней воды	8
Модуль 2. Статистические методы гидрологических расчетов	12
Модульная единица 2.1	12
Занятие № 4. Гидрограф стока. Расчленение гидрографа стока	12
Модульная единица 2.2	16
Занятие №5. Оценка репрезентативности ряда наблюдений. Построение разностной интегральной кривой стока	16
Модульная единица 2.3	20
Занятие № 6. Определение расчетных гидрологических характеристик при наличии данных длительных гидрометрических наблюдений	20
Модуль 3. Гидрологические расчеты	23
Модульная единица 3.1	23
Занятие № 7. Определение нормы годового стока при недостаточности данных гидрометрических наблюдений	23
Модульная единица 3.2	27
Занятие № 8. Определение нормы годового стока при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений	27
Модульная единица 3.3	32
Занятие № 9. Определение максимальных расходов воды рек при отсутствии наблюдений за стоком	32
Перечень вопросов для самостоятельного изучения и самоподготовки к текущему контролю знаний	38
Перечень вопросов для осуществления промежуточного контроля	39
Термины и определения	41
Заключение	43
Библиографический список	44
Приложения	45
Приложение А	45
Приложение Б	46
Приложение В	47
Приложение Г	48
Приложение Д	49
Приложение Е	50

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания «Гидрологические расчеты в природообустройстве» разработаны в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Гидрологические расчеты в природообустройстве» для направления подготовки 20.03.02 – Природообустройство и водопользование, профиль «Водные ресурсы и водопользование», квалификация бакалавр, очной и заочной форм обучения.

Освоение дисциплины направлено на приобретение будущими специалистами фундаментальных знаний в области природообустройства и водопользования с углубленным знанием водных ресурсов и методов расчета основных гидрологических характеристик. Бакалавр получает знания и овладеет методами, способами и технологиями изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации объектов природообустройства и водопользования.

Цель преподавания дисциплины – дать студентам знания по гидрологическому обоснованию проектирования в природообустройстве для успешного решения задач при дальнейшей профессиональной деятельности и для усвоения последующих дисциплин профессиональной подготовки.

Задачи дисциплины: изучение закономерностей формирования речного стока и его колебаний в пространстве и времени, методов исследования этих закономерностей; усвоение комплекса методик расчета гидрологических характеристик и параметров водного режима рек, необходимых в практике водохозяйственного и гидротехнического проектирования; приобретение практических навыков гидрологических расчетов, использования нормативной документации и справочных изданий, применения номограмм, картосхем и таблиц гидрологических параметров.

Для каждой темы дается теоретический материал согласно рабочей программе по дисциплине «Гидрологические расчеты в природообустройстве», практические, контрольные вопросы к каждой теме, вопросы для промежуточного контроля, основные термины и определения. Теоретический материал поможет при подготовке к практическим и семинарским занятиям, а также для самостоятельного изучения дисциплины.

Модуль 1. Гидрологические характеристики

Модульная единица 1.1

Занятие № 1. Гидрологические характеристики, единицы их измерения. Статистические характеристики и параметры, используемые при анализе гидрологических данных

Цель работы: научиться использовать гидрологические и статистические характеристики при анализе стока рек.

Задание:

1. Переписать из гидрологического ежегодника среднегодовые расходы воды.
2. Рассчитать средний многолетний расход воды, выразить его через объем, слой и модуль стока.
3. Для каждого года рассчитать модульный коэффициент стока.
4. Для ряда среднегодовых расходов воды рассчитать среднюю квадратичную ошибку, коэффициенты вариации и асимметрии. Найти соотношение C_s/C_v .

Контрольные вопросы:

1. Какие характеристики стока вы знаете?
2. Каково соотношение между основными характеристиками стока?
3. Что показывают величины коэффициента корреляции, вариации и асимметрии? Могут ли они быть отрицательными?

Основными характеристиками годового стока за любой период времени являются:

Средний годовой расход воды ($\text{м}^3/\text{с}$).

$$Q_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (1)$$

где Q_i – средние суточные расходы воды;
 n – число дней в году.

Напомним, что расход воды – это объем воды, протекающий через поперечное сечение потока в единицу времени.

Полученный средний годовой расход можно выразить через другие характеристики стока – модуль, слой, объем и коэффициент стока.

Модуль стока $\left(\frac{\text{л}}{\text{с} \times \text{км}^2}\right)$ – количество воды, стекающей в секунду с одного квадратного километра площади бассейна. Вычисляется по формуле

$$M = \frac{Q_{\text{ср}} \times 10^3}{F}, \quad (2)$$

где F – площадь водосбора, км^2 .

Объем стока (м^3 , км^3) – количество воды, стекающее в год (сутки, декаду, месяц) с бассейна через рассматриваемое поперечное сечение реки. Вычисляется по формулам

$$W = Q_{\text{ср}} \times T, \quad (3)$$

$$W = \frac{MF}{10^3} T, \quad (4)$$

где T – количество секунд в интервале времени (в сутках – 86400 секунд).

Слой стока (мм) – объем стока, который равномерно распределен по всей площади бассейна выше гидроствора.

$$h = \frac{W}{F \times 10^3} = \frac{Q \times T}{F \times 10^3} = \frac{M \times T}{10^6}. \quad (5)$$

Коэффициент стока – отношение слоя стока к слою осадков, обусловивших возникновение стока, за расчетный период.

$$\alpha = \frac{h}{P}, \quad (6)$$

где P – количество осадков за расчетный интервал времени, мм.

Модульная единица 1.2

Занятие № 2. Оценить однородность годового стока реки

Цель работы: научиться оценивать однородность годового стока реки.

Задание:

1. Для каждого года рассчитать модульный коэффициент стока.
2. Для ряда среднегодовых расходов воды рассчитать среднюю квадратичную ошибку, коэффициенты вариации и асимметрии. Найти соотношение C_s/C_v .

Контрольные вопросы:

1. Что показывают величины коэффициента корреляции, вариации и асимметрии? Могут ли они быть отрицательными?

Модульный коэффициент годового стока – относительное число, полученное как отношение характеристики годового стока к средней многолетней ее величине

$$K_i = \frac{Q_i}{Q_o} = \frac{M_i}{M_o} = \frac{W_i}{W_o} = \frac{h_i}{h_o}, \quad (7)$$

где Q_i, M_i, W_i, h_i – величина стока за год;

Q_o, M_o, W_o, h_o – сток за многолетний период.

Гидрологические данные в многолетнем разрезе относятся к категории случайных величин, поскольку они формируются в результате очень большого числа разного рода факторов, сочетание которых дает неоднозначные случайные результаты. Поэтому гидрологические явления рассматриваются как случайный (вероятностный, стохастический) процесс. Вероятностно-статистические методы являются основными методами анализа при гидрологических расчетах и дают достаточно хорошие результаты в большинстве случаев.

При оценке надежности линейных зависимостей (тесноты связи) применяется *коэффициент корреляции*:

$$r = \frac{\sum (y_i - y_o)(x_i - x_o)}{\sqrt{\sum (y_i - y_o)^2 \sum (x_i - x_o)^2}}, \quad (8)$$

где y_i и x_i – соответствующие значения стока рассматриваемых рядов;
 y_o и x_o – средние значения стока каждого ряда.

Отклонение имеющих характеристиках от их среднего значения оценивается *средней квадратичной ошибкой* σ (стандартное отклонение), т.е. отклонением переменных от их арифметического среднего. Определяется по формуле

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - x_o)^2}{n}}, \text{ при } n \geq 30, \quad (9)$$

или

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - x_o)^2}{n-1}}, \text{ при } n \geq 30. \quad (10)$$

Среднее квадратическое отклонение характеризует изменчивость членов ряда в абсолютных величинах. Для сравнения различных рядов используют относительную характеристику в виде *коэффициента вариации* C_v , значение которого определяется по формуле

$$C_v = \frac{\sigma_x}{x_o} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (K_i - 1)^2}{n}}, \text{ при } n \geq 30, \quad (11)$$

или

$$C_v = \frac{\sigma_x}{x_o} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (K_i - 1)^2}{n-1}}, \text{ при } n < 30. \quad (12)$$

Коэффициент асимметрии C_s характеризует несимметричность ряда исследуемых величин относительно их среднего значения. Если сумма положительных и отрицательных отклонений $(x_i - x_o)$ одинакова, то ряд симметричен, если нет – асимметричен. Значение коэффициента асимметрии определяется по формуле

$$C_s = \frac{n \sum_1^n (K_i - 1)^3}{C_v^3 (n-1)(n-2)}. \quad (13)$$

В связи с ограниченностью периодов наблюдений вычисленное по формуле значение C_s имеет большие погрешности и зачастую его определяют, принимая рекомендуемые для тех или иных гидрологических характеристик соотношения C_s/C_v .

Модульная единица 1.3

Занятие № 3. Связь расходов и уровней воды

Цель работы: изучить связь расходов и уровней воды, построить таблицу ординат кривой расходов.

Задание:

1. Переписать из гидрологического ежегодника измеренные расходы воды.

2. Нанести точки измеренных расходов, площадей, средних скоростей живого сечения на график, где по вертикальной оси откладываются значения уровней воды, а по горизонтальной – Q, ω, v .

3. Построить кривые $Q = f(H), \omega = f(H), v = f(H)$. Проверить правильность построения кривой путем подставления снятых с кривой значений Q, ω, v в формулу (14).

4. Составить расчетную таблицу для определения расходов воды по уровню воды с шагом в 1 см для возможного диапазона значений уровней.

Контрольные вопросы:

1. Что такое расход воды? Способы и периодичность его измерения.

2. Что такое уровень воды? Способы и периодичность его измерения.

3. Написать формулу для вычисления скоростей течения потока и объяснить значение ее составляющих.

4. Какое значение имеет построение кривых зависимостей расходов воды, площадей живого сечения и скорости?

5. Что такое паводочная петля? Каковы причины ее образования?

6. По длине реки вниз по течению происходит увеличение или уменьшение значений расходов воды?

Расход воды в потоке определяется по формуле

$$Q = v_{cp} \times \omega, \quad (14)$$

где Q – расход воды, м³/с;

v_{cp} – средняя скорость в поперечном сечении потока, м/с;

ω – площадь поперечного сечения потока без учета площади «мертвого пространства», в пределах которого скорость течения практически равна нулю, м².

Изменение расходов во времени вследствие неравномерного поступления воды в реку вызывает изменение уровней, скоростей течения, размывающей и аккумулярующей деятельности реки, морфометрических характеристик живого сечения.

Если для какого-либо створа на реке измерены расходы воды при разных уровнях, то можно установить зависимость между расходами и уровнями. Такую зависимость обычно выражают графически в виде кривой расходов. На графике в принятом масштабе по горизонтальной оси откладывают расходы воды (Q), а по вертикальной оси – значения уровней (H). Точки на таком графике располагаются

по кривой с выпуклостью, обращенной к оси уровней. Построенная таким образом кривая характеризует однозначную зависимость расходов от уровней воды реки, при которой определенному значению расхода соответствует только одно значение уровня. В природных условиях такая однозначная зависимость нередко нарушается, т.е. при одном и том же значении уровня могут проходить разные расходы воды. Такие случаи возможны при резком изменении уклонов воды на подъеме и спаде уровней, при неустойчивом русле (размыв дна), при переменном подпоре от искусственных сооружений, водной растительности и льда.

Для каждого расхода, однако, справедливо равенство (14). Поэтому проверку кривой расходов производят путем совместного исследования зависимости от высоты уровня воды отдельно для расходов, площадей живого сечения и скоростей. С этой целью на одном графике с кривой расходов строятся кривые площадей живого сечения и скоростей (рис. 1).

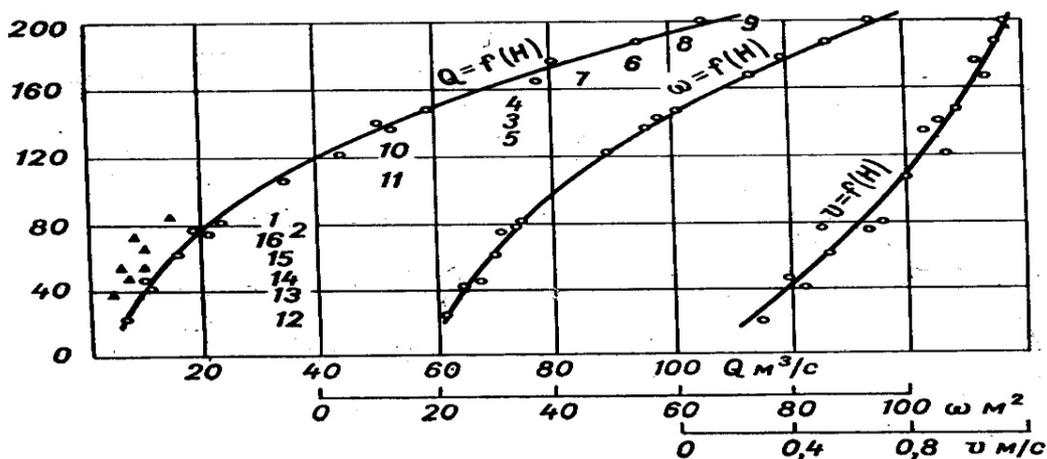


Рисунок 1 – Кривые зависимости расходов воды, живых сечений и скоростей течения от уровня воды

При плавном очертании профиля сечения реки кривая живых сечений получается плавной, в местах резкого изменения площадей живого сечения меняется и направление кривой, что особенно заметно при уровнях выхода воды на пойму.

Зависимость скоростей от уровней воды имеет вид кривой с выпуклостью, обращенной к горизонтальной оси только для правильных русел.

На некоторых участках больших равнинных рек, особенно в низовьях, а также на средних и малых реках, если эти реки имеют малые уклоны, наблюдается образование паводочных петель (рис. 2).

При проходе по реке паводков уклоны водной поверхности на подъеме обычно больше, чем на спаде. Если при прохождении паводка измерить расход при одном и том же уровне на подъеме и на спаде, то окажется, что измеренный расход больше на подъеме. Площади живого сечения оказываются одинаковыми при отсутствии изменений формы русла.

Если плавной кривой последовательно соединить точки расходов и скоростей на графике, то получится петля с ветвями подъема и спада.

Для облегчения анализа на стандартном листе миллиметровой бумаги наносят все точки расходов воды, соответствующие им площади водного сечения и средних скоростей за период открытого русла (без ледовых явлений в створе). По общей оси ординат для всех характеристик откладываются уровни воды, а по оси абсцисс – расходы, площади и скорости потока.

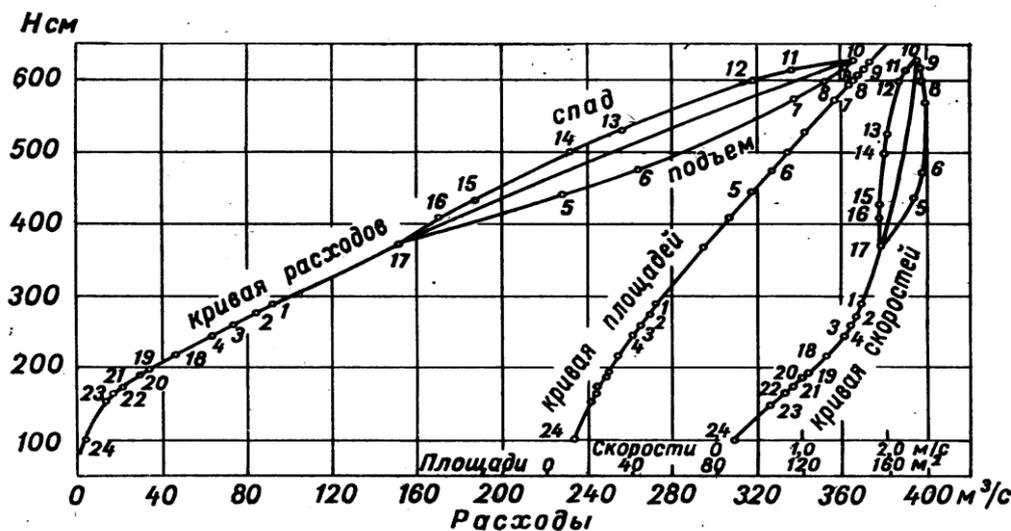


Рисунок – 2 Кривые зависимости расходов воды, живых сечений и скоростей течения при подъеме и спаде уровней

По нанесенным точкам или центрам тяжести определенных групп точек карандашом проводятся кривые всех трех характеристик и увязываются между собой. Для этого через определенные интервалы уровней с кривых снимают значения расходов воды и площадей водного сечения. При этом средние скорости потока вычисляют по соотношению

$$v_{cp} = \frac{Q}{\omega} \quad (15)$$

Рассчитанные средние скорости наносят на поле точек наблюдаемых средних скоростей, соединяют их плавной кривой.

Модуль 2. Статистические методы гидрологических расчетов

Модульная единица 2.1

Занятие № 4. Гидрограф стока. Расчленение гидрографа стока

Цель работы: определить тип питания исследуемой реки.

Задание:

1. Построить гидрограф стока реки за выбранный год.
2. Нанести на этот график ход осадков и температуры воздуха по ближайшей к бассейну реки метеостанции за соответствующий год.
3. Выделить подземную составляющую речного стока, пользуясь методом О. В. Попова.
4. Выделить дождевую и снеговую составляющие поверхностного стока.
5. Определить общий объем стока и долю разных составляющих в годовом стоке реки.

Контрольные вопросы:

1. Что такое гидрограф стока? Что он характеризует?
2. Какие существуют схемы расчета подземной составляющей гидрографа стока?
3. Типы связи грунтовых вод с речными?
4. Что такое комплексный график?
5. Как зависит соотношение источников питания реки от водности года?

Гидрографом стока называется график хронологического хода уровней воды (рис. 3). По вертикальной оси откладывается время (месяцы и дни), по горизонтальной – расходы воды. На таком графике наносят ежедневные значения расходов воды и соединяют их линиями.

Площадь, ограниченная линией гидрографа и осями координат, – объем воды, проходящей для определенного пункта за год. В практике гидрологических расчетов строят гидрографы за годы: многоводный, средний, маловодный.

При наличии данных многолетних наблюдений строят типовой гидрограф стока, который отражает характер колебаний расходов воды в данном пункте.

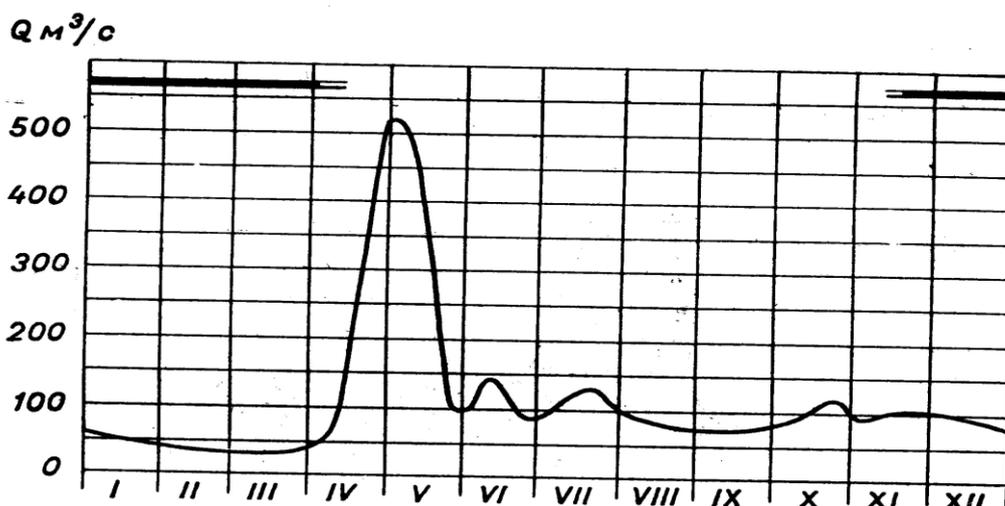


Рисунок 3 – Колебание расходов воды р. Северной – с. Тишки за 1952 г.

Расчленение гидрографа стока позволяет определить количество воды, получаемое рекой от разных источников питания. Для рек с выраженным весенним половодьем существует несколько способов расчленения гидрографа:

1. Б.П. Поляков предложил считать, что подземное питание по мере подъема весеннего половодья постепенно снижается, прекращаясь при прохождении наибольшего расхода воды, и возрастает на спаде половодья, когда происходит отдача воды поймой реки (рис. 4).

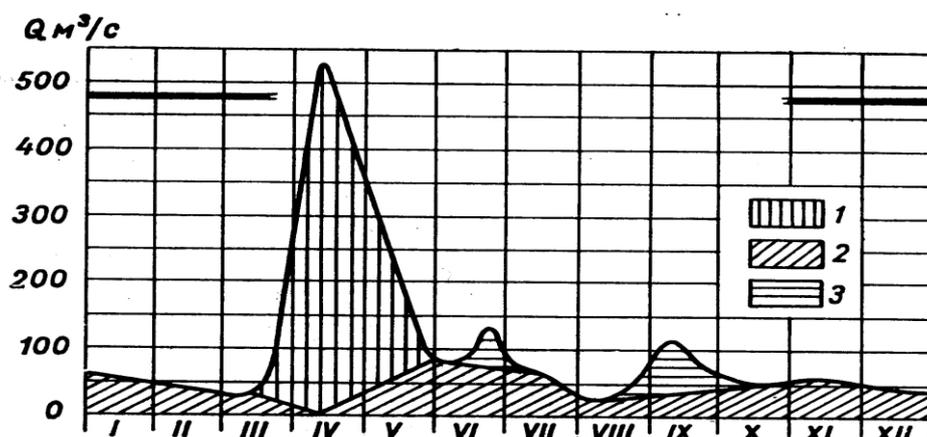


Рисунок 4 – Гидрограф р. Слюдянка – г. Кручи за 1958 г.:
1 – снеговой сток; 2 – подземный сток; 3 – дождевой сток

2. Б.И. Куделин разработал типовые схемы расчленения гидрографа стока в зависимости от гидрогеологических условий и режима подземного стока. Динамика подземного стока из водоносных горизонтов зависит от степени гидравлической связи этих горизонтов с рекой (рис. 5).

Режим стока грунтовых вод, гидравлически не связанных с рекой, близок к режиму поверхностного стока с некоторым смещением фаз хода уровня вправо (запаздывание).

Режим стока водоносных горизонтов, гидравлически связанных с рекой, имеет противоположную направленность фаз по сравнению с поверхностными водами. Максимуму поверхностного стока соответствует минимум подземного стока.

Режим стока подземных вод, имеющих периодическую связь с рекой, носит более сложный характер: при низких горизонтах реки наблюдается схема (а); при высоких – схема (б).

Смешанное грунтовое и артезианское питание представлено сочетанием режимов (а), (б) и (в=а+б).

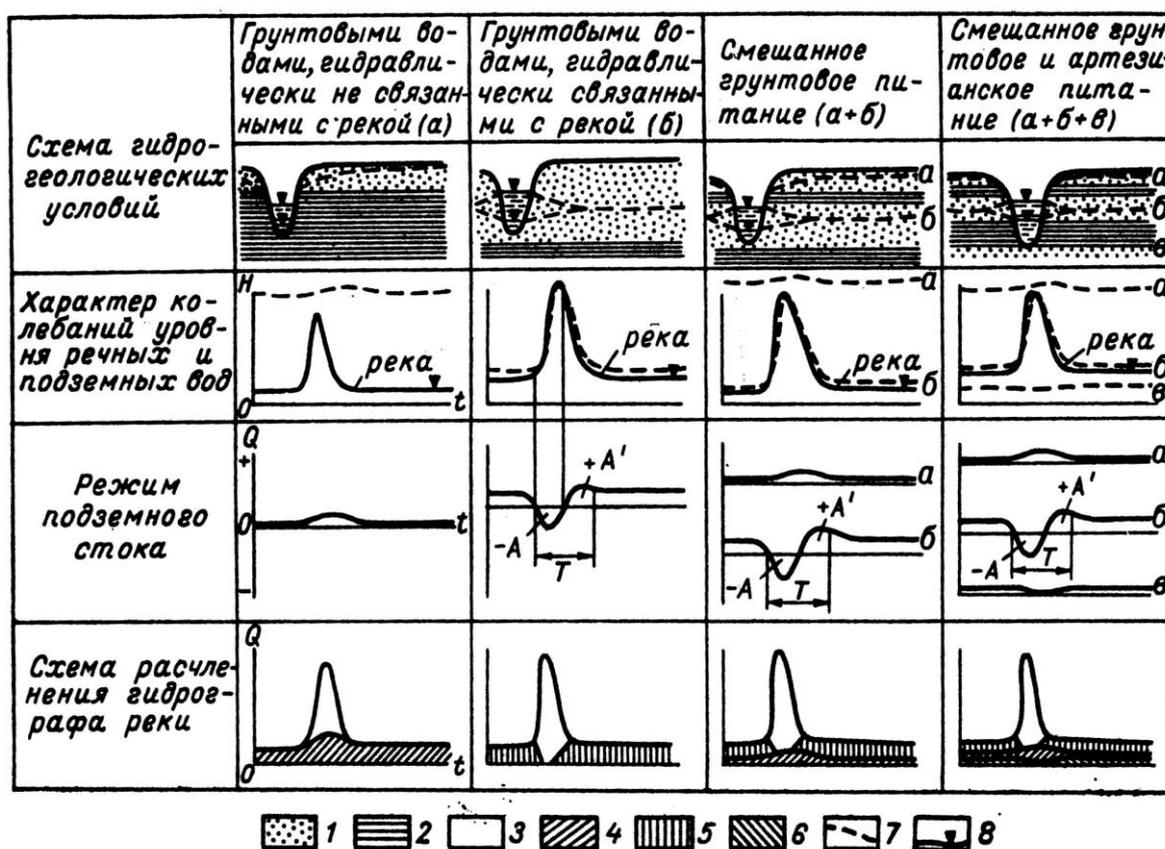


Рисунок 5 – Типовые схемы расчленения гидрографа реки по Б.И. Куделину:
 1 – водоносные породы; 2 – водоупорные породы; 3 – поверхностный сток;
 4 – подземный сток из водоносных горизонтов, гидравлически несвязанных с рекой;
 5 – подземный сток из водоносных горизонтов, гидравлически связанных с рекой;
 6 – сток из напорных горизонтов; 7 – уровень подземных вод; 8 – время берегового регулирования поверхностного стока; -A и +A – отрицательная и положительная фазы подземного стока в реки в период половодья

По этой схеме на гидрографе может быть выделено подземное питание. Для определения поверхностного питания, поступающего в реку от снега или дождей, необходимо рассмотреть и дать анализ комплексных графиков элементов гидрологического режима (температура и осадки).

3. О.В. Поповым при оценке сложного взаимодействия между рекой и подземными водами в различных условиях гидравлической взаимосвязи рассматривается характерное соотношение подземных расходов в начале половодья, в период и в конце половодья Q_n , Q_p , Q_k (рис. 6).

При нисходящем режиме подземного стока в реки и при отсутствии гидравлической связи с водоносного пласта и при гидравлической связи при слабом влиянии подпора на режим подземных вод прибрежной зона наблюдается закономерность, приведенная на рис. 7. Соотношение расходов при этом:

- а) $Q_n < Q_p$, $Q_p > Q_k$:
- б) $Q_n < Q_p$, $Q_p < Q_k$.

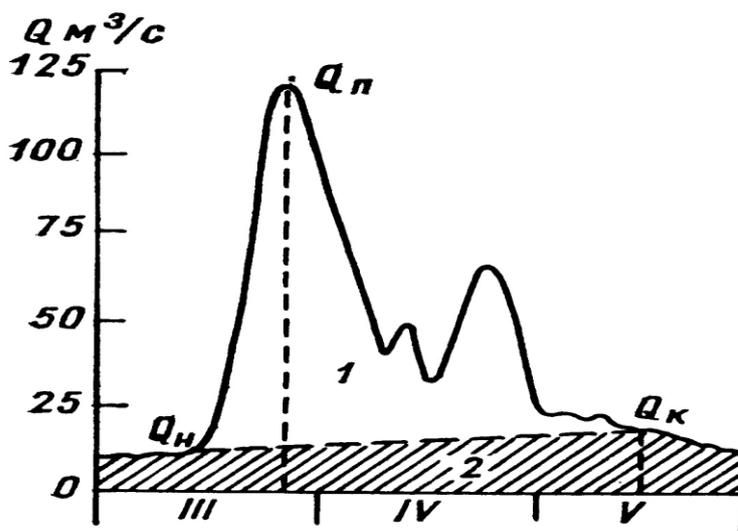


Рисунок 6 – Гидрограф р. Неман – г. Столбцы, 1968 г.:
1 – поверхностный сток; 2 – подземный сток

При подпорном режиме подземного стока в реки в условиях гидравлической связи водоносного пласта подъем уровня речных вод во время половодья приводит к образованию уклонов, вследствие подпора обратных, и наблюдаются закономерности в) и г).

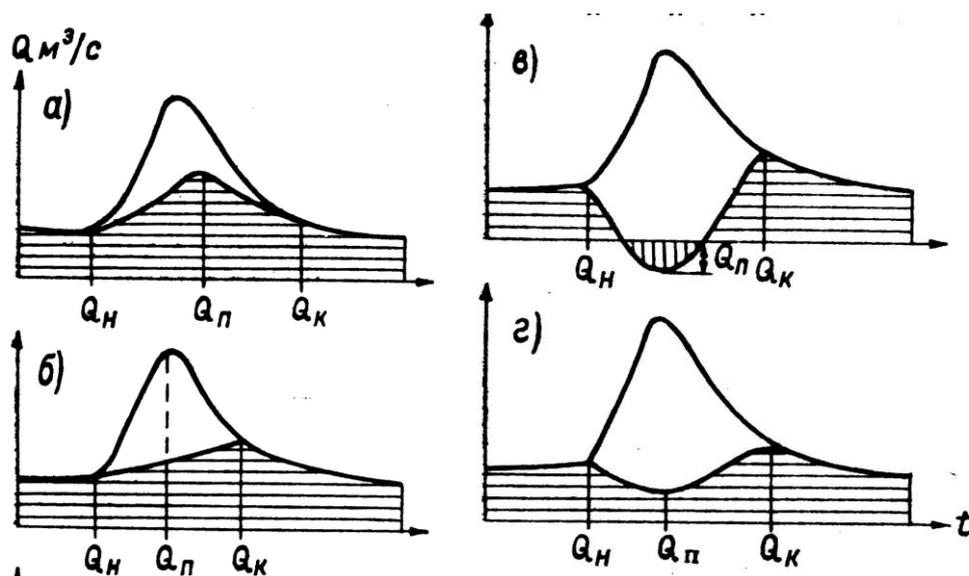


Рисунок 7 – Основные типы режима подземного стока в реки по О.В. Попову:
а, б – тип нисходящего режима; в, г – тип подпорного режима

Модульная единица 2.2

Задание № 5. Оценка репрезентативности ряда наблюдений. Построение разностной интегральной кривой стока

Цель работы: научиться проводить анализ колебаний годового стока.

Задание:

1. По имеющемуся ряду наблюдений за стоком построить хронологический ход среднегодовых расходов воды.
2. Нанести на график кривые скользящего среднего по 5- и 11-летиям.
3. Рассчитать и построить разностную интегральную кривую.
4. Выявить циклы водности, их продолжительность.
5. Выделить из имеющегося ряда репрезентативный период для расчета нормы годового стока.

Контрольные вопросы:

1. Что такое цикл водности? Из чего он состоит?
2. Какие существуют приемы выявления цикличности годового стока?
3. Что показывает РИК?
4. Почему среднемноголетний расход воды еще не норма стока?

В практике гидрологических расчетов объем исходной информации может быть разным: гидрометрических данных может быть достаточно или недостаточно для определения искомых характеристик. Ряд гидрологических наблюдений в конкретном створе водотока или в пункте наблюдений на водоеме является лишь частью (выборкой) генеральной совокупности данных (в современную климатическую эпоху), поскольку длительность периода инструментальных наблюдений исчисляется всего лишь десятилетиями.

Для обеспечения требуемой точности определения нормы годового стока (одной из основных гидрологических характеристик) необходимо исследовать цикличность его колебаний и выбрать репрезентативный расчетный период.

Продолжительность периода наблюдений считают достаточной, если рассматриваемый период репрезентативен (представителен), а относительная средняя квадратичная погрешность расчетного значения исследуемой гидрологической характеристики не превышает 10 % для годового и сезонного стоков и 20 % – для максимального и минимального стоков.

Относительная средняя квадратичная ошибка средней многолетней величины (нормы) годового стока определяется по формуле:

$$\varepsilon_{Q_{cp}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\% , \quad (16)$$

где C_v – коэффициент вариации (изменчивости) годового стока;

n – период наблюдений.

Если относительная средняя квадратичная погрешность превышает указанные пределы и период наблюдений нерепрезентативен, необходимо осуществить приведение рассматриваемой гидрологической характеристики к многолетнему периоду.

Расчетный репрезентативный период устанавливается во всех случаях, когда продолжительность наблюдений не превышает 50–60 лет. Он должен включать наибольшее количество целых *циклов водности*, состоящих из групп маловодных и многоводных лет. Циклы могут отличаться друг от друга как по отклонению от среднего значения стока за весь рассматриваемый период, так и по продолжительности той или иной группы лет. Период времени, в течение которого наблюдается увеличение водности, называется *многоводной фазой цикла* (многоводным периодом), а при постоянном уменьшении – *маловодной фазой* (маловодный период).

Если относительная средняя квадратичная погрешность превышает указанные пределы и период наблюдений нерепрезентативен, необходимо осуществить приведение рассматриваемой гидрологической характеристики к многолетнему периоду. В случае более продолжительных рядов наблюдений (более 60–70 лет), расчет нормы стока ведется без анализа репрезентативности.

Исследование цикличности колебаний годового стока той или иной реки можно вести несколькими методами.

Первый метод – по совмещенным хронологическим графикам стока. Строится хронологический график хода годового стока и по нему определяются периоды водности. Однако наличие малых циклов (2, 4, 6 лет) на фоне многолетних колебаний могут затушевывать последние.

Второй метод – используются графики скользящих средних значений стока за рассматриваемый период. Проводят замену исходных данных осредненными по группам (n-летиям, где $n = 2, 3, 4, \dots$ лет). Метод позволяет избавиться от флуктуаций (резких всплесков) водности конкретных лет, но при увеличении периода осреднения наряду со сглаживанием происходит размывание границ циклов, и тем труднее их выявить.

Третий метод – циклы выявляются по разностным интегральным кривым (РИК). РИК – это суммарная кривая отклонений годовых значений стока от среднего его значения за весь период наблюдений. Метод является более наглядным и более распространенным в гидрологических расчетах.

РИК строятся обычно в модульных коэффициентах годового стока, расчет ведется в табличном виде. Для вычисления ординат этой кривой составляется таблица, форма которой приведена ниже (табл. 1).

По данным графы 3 таблицы 1 вычисляется средняя величина годового стока, данные графы 7 определяются пошаговым суммированием значений из графы 6, по данным графы 8 строится РИК, на которой выделяются характерные периоды (многоводные и маловодные) и полные циклы водности. Пример РИК приведен на рисунке 8. Из рисунка видно, что расчетный период включает три полных цикла водности, маловодную фазу в начале и многоводную в конце выборочного ряда. Период наблюдений за стоком с 1941 года является репрезентативным для расчета нормы годового стока.

Таблица 1 – Вычисление ординат разностной интегральной кривой годовых модульных коэффициентов для р. Маны у п. Манский за период 1936–1991 гг.

Номер п/п	Год	Годовой расход воды Q_i , м ³ /с	$K_i = \frac{Q_i}{Q_{cp}}$	$K_i - 1$	$\sum_1^n (K_i - 1)$	$\frac{\sum_1^n (K_i - 1)}{C_v}$
1	2	3	5	6	7	8
0	1936	–	–	–	0	0
1	1937	127	1,27	0,27	0,27	1,05
2	1938	125	1,25	0,25	0,52	2,03
3	1939	97,5	0,98	-0,02	0,50	1,94
...
54	1990	97,5	0,98	-0,02	-0,28	-1,06
55	1991	128	1,28	0,28	0,00	0,00
Сумма		5484	55,0	0,0		
		$Q_{cp} = 99,7 \text{ м}^3/\text{с}$		$C_v = 0,26$		

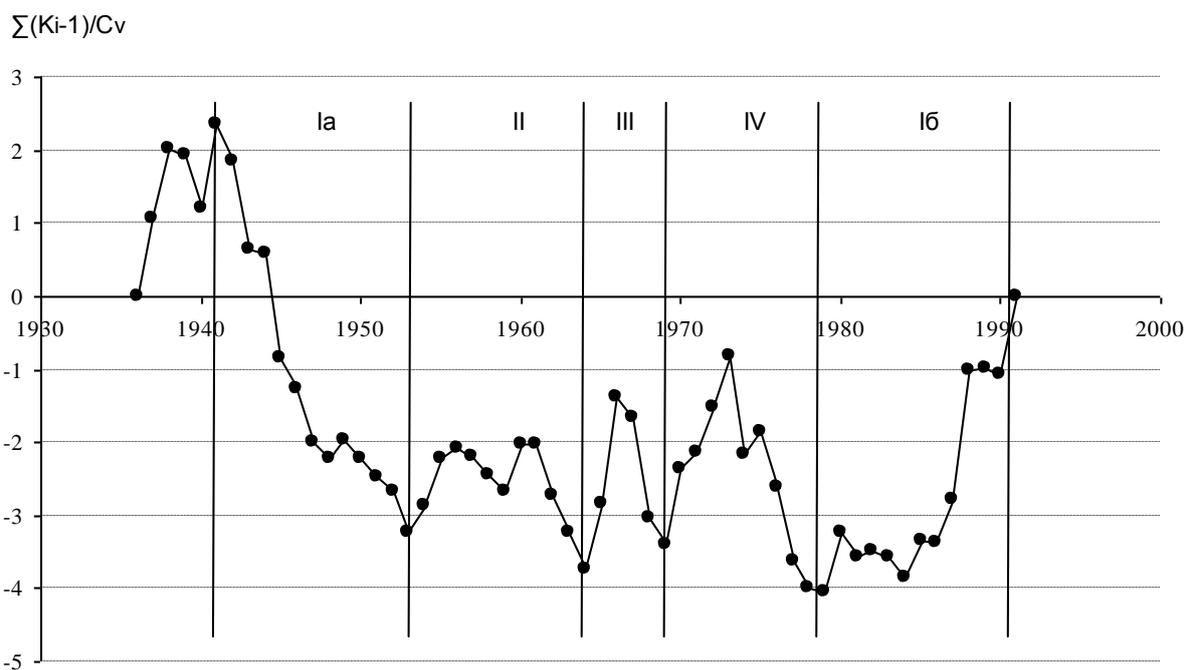


Рисунок 8 – Разностная интегральная кривая модульных коэффициентов годового стока р. Маны у п. Манский:
 II, III, IV – полные циклы водности; Ia и Ib – маловодная и многоводная фаза водности. Всего на представленной РИК 4 полных цикла

Модульная единица 2.3

Занятие № 6. Определение расчетных гидрологических характеристик при наличии данных длительных гидрометрических наблюдений

Цель работы: изучить методы расчета нормы годового, максимального и минимального стока при наличии данных длительных гидрометрических наблюдений.

Задание:

1. Определить норму годового стока исследуемой реки при достаточно продолжительном ряде наблюдений, рассчитать годовой сток вероятностью превышения $P = 1, 25, 50, 75, 90, 95, 97\%$ с определением параметров кривой обеспеченности методом наибольшего правдоподобия.

2. Рассчитать максимальный сток исследуемой реки при достаточно продолжительном ряде наблюдений вероятностью превышения $P = 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25\%$.

3. Рассчитать минимальный сток исследуемой реки при достаточно продолжительном ряде наблюдений вероятностью превышения $P = 75, 90, 95, 99\%$.

Контрольные вопросы:

1. Понятие обеспеченности величины. Формула для расчета вероятности превышения.

2. Клетчатка вероятности, для чего она применяется.

3. Аналитические методы построения кривых обеспеченности: метод наибольшего правдоподобия, метод моментов, графоаналитический метод.

4. Что такое коэффициент вариации? Способы его определения.

5. Что такое коэффициент асимметрии? Способы его определения.

6. Оценка точности расчета параметров кривой обеспеченности.

Ход выполнения работы:

Для определения годового, максимального и минимального стока требуется провести три независимых расчета на основе соответствующих исходных данных.

1) Ранжируются (располагаются в убывающем порядке) эмпирические данные о расходах воды (модульных коэффициентов стока).

2) Определяется обеспеченность ($P\%$) каждого ранжированного значения по формуле эмпирической кривой обеспеченности.

3) На клетчатке вероятности строится эмпирическая кривая обеспеченности.

4) По данным наблюдений вычисляются среднемноголетние значения годового, максимального, минимального стока с оценкой их точности.

5) Определяются коэффициенты вариации и асимметрии.

6) Подбирается соотношение C_s/C_v .

7) Ординаты аналитической кривой обеспеченности определяются по таблице ординат трехпараметрического гамма-распределения для заданных значений обеспеченности.

8) На клетчатку вероятности наносится аналитическая кривая обеспеченности и проверяется ее совпадение с эмпирической кривой.

9) По ординатам аналитической кривой обеспеченности вычисляются значения стока воды заданной вероятности превышения, которые заносятся в таблицу.

Основными гидрологическими характеристиками стока принято считать норму годового стока, максимальный и минимальный сток заданной вероятности превышения. При наличии длительных наблюдений за стоком, инженер без особых затруднений сможет рассчитать данные параметры. Причем расчеты при наличии данных однотипны, отличаются некоторыми характерными особенностями.

В настоящее время в инженерном гидрологическом проектировании статистические методы являются основными. Это обусловлено наличием данных наблюдений за стоком, которые подвергаются статистической обработке.

Определение расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности осуществляют путем применения аналитических функций распределения ежегодных вероятностей превышения – кривых обеспеченностей.

Продолжительность периода наблюдений считают достаточной, если рассматриваемый период репрезентативен (представителен), а относительная средняя квадратичная погрешность расчетного значения исследуемой гидрологической характеристики не превышает 10 % для годового и сезонного стоков и 20 % – для максимального и минимального стоков.

Если относительные средние квадратичные погрешности превышают указанные пределы и период наблюдений нерепрезентати-

вен, необходимо осуществить приведение рассматриваемой гидрологической характеристики к многолетнему периоду.

Эмпирическую ежегодную вероятность превышения $P_{m,\%}$ (обеспеченность) гидрологических характеристик определяют по формуле

$$P_{m,\%} = \frac{m}{n+1} 100, \quad (17)$$

где m – порядковый номер членов ряда гидрологической характеристики, расположенных в убывающем порядке;

n – общее число членов ряда.

По этим данным строится эмпирическая кривая обеспеченности, к которой подбирается аналитическая кривая (кривая, описываемая определенным уравнением). Аналитическая кривая подбирается для повышения надежности расчетов, особенно в зоне малой и большой обеспеченности, как правило, слабо освещенной данными наблюдений.

Эмпирические кривые распределения ежегодных вероятностей превышения строят на клетчатках вероятностей. Клетчатки вероятностей – специальные клетчатки в прямоугольной системе координат, построенные таким образом, что на них спрямляются (полностью или частично) различные аналитические кривые обеспеченности. Тип клетчатки вероятностей выбирают в соответствии с принятой аналитической функцией распределения вероятностей и полученного отношения коэффициента асимметрии C_s к коэффициенту вариации C_v .

Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения, как правило, применяют трехпараметрические распределения: Крицкого-Менкеля при любом отношении C_s/C_v , распределение Пирсона III типа (биномиальная кривая) при $C_s/C_v \geq 2$, логнормальное распределение при $C_s \geq (3C_v + C_v^3)$ и другие распределения, имеющие предел простираения случайной переменной от нуля или положительного значения до бесконечности. При надлежащем обосновании допускается применять двухпараметрические распределения, если эмпирическое отношение C_s/C_v и аналитическое отношение C_s/C_v , свойственные данной функции распределения, приблизительно равны. При неоднородности ряда гидрометрических наблюдений (различные условия формирования стока) применяют усеченные и составные кривые распределения вероятностей.

Оценки параметров аналитических кривых распределения: среднее многолетнее значение \bar{Q} , коэффициент вариации C_v и отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v устанавливаются по рядам наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой методом приближенно наибольшего правдоподобия, методом моментов или графоаналитическим методом (на начальных стадиях проектирования).

Средняя квадратичная погрешность нормы стока в процентах определяется по формуле

$$\sigma_0 = \pm \frac{100C_v}{\sqrt{n}}. \quad (18)$$

Средняя квадратичная ошибка коэффициента изменчивости C_v в процентах определяется по формуле

$$\sigma_{C_v} = \frac{\sqrt{1+C_v^2}}{\sqrt{2n}} 100. \quad (19)$$

Модуль 3. Гидрологические расчеты

Модульная единица 3.1

Занятие № 7. Определение нормы годового стока при недостаточности данных гидрометрических наблюдений

Цель работы: изучить методы расчета годового, максимального и минимального стока при недостаточности данных гидрометрических наблюдений.

Задание:

1. Определить норму годового стока исследуемой реки при недостаточности данных гидрометрических наблюдений, рассчитать годовой сток вероятностью превышения $P = 1, 25, 50, 75, 90, 95, 97 \%$ с определением параметров кривой обеспеченности методом наибольшего правдоподобия.

2. Рассчитать максимальный сток исследуемой реки при недостаточности данных гидрометрических наблюдений вероятностью превышения $P = 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 25 \%$.

3. Рассчитать минимальный сток исследуемой реки при недостаточности данных гидрометрических наблюдений вероятностью превышения $P = 75, 90, 95, 99 \%$.

4. Сравнить результаты расчетов с расчетами при длительных гидрометрических наблюдениях. Объяснить расхождения.

Контрольные вопросы:

1. Можно ли вести расчеты при коротких рядах данных? Каким образом?

2. Что такое река-аналог? Для чего она нужна?

3. Каким образом находятся параметры аналитической кривой обеспеченности при недостаточности наблюдений за стоком?

4. Какие условия должны соблюдаться при выборе реки-аналога?

Ход выполнения работы:

Работа выполняется на тех же исходных данных, искусственно укороченных вдвое. Тем самым результаты расчетов работы можно сравнивать с данными практической работы №5.

1) Находится река-аналог с соблюдением всех условий, ряд наблюдений которой позволит привести ряд исследуемой реки к многолетнему периоду.

2) Ряд приводится к многолетнему периоду. Строятся графические и аналитические (чаще регрессионные) зависимости характеристик стока исследуемой реки и реки-аналога. По данным зависимостям исследуемый ряд приводят к многолетнему периоду.

3) После приведения ряда к многолетнему расчеты производят согласно алгоритму практической работы № 5.

Для определения годового, максимального и минимального стока требуется провести три независимых расчета на основе соответствующих исходных данных.

Ранжируются (располагаются в убывающем порядке) эмпирические данные о расходах воды (модульных коэффициентов стока).

1) Определяется обеспеченность ($P\%$) каждого ранжированного значения по формуле эмпирической кривой обеспеченности.

2) На клетчатке вероятности строится эмпирическая кривая обеспеченности.

3) По данным наблюдений вычисляются среднеемноголетние значения годового, максимального, минимального стока с оценкой их точности.

4) Определяются коэффициенты вариации и асимметрии с оценкой их точности.

5) Подбирается соотношение C_s/C_v .

6) Ординаты аналитической кривой обеспеченности определяются по таблице ординат трехпараметрического гамма-распределения для заданных значений обеспеченности.

7) На клетчатку вероятности наносится аналитическая кривая обеспеченности и проверяется ее совпадение с эмпирической кривой.

8) По ординатам кривой обеспеченности вычисляются значения стока воды заданной вероятности превышения, которые заносятся в таблицу.

В практике гидрологических расчетов часто приходится иметь дело с короткими рядами наблюдений, продолжительность которых не обеспечивает получение результата требуемой точности (5–10 %). В этих случаях ряды стока приводятся к расчетному многолетнему периоду по рекам-аналогам, которые имеют длинный ряд наблюдений, обеспечивающий требуемую точность, и колебания стока, соответствующие колебаниям его в расчетном створе.

В качестве аналогов для расчетной реки или створа выбирают расположенные вблизи водосборы, зонально-однородные по географическому и высотному положению и сходные в отношении факторов подстилающей поверхности, рельефа, подстилающих почвогрунтов, климатических характеристик и др. Учитываются также размеры водосборов и антропогенное влияние

При выборе рек-аналогов обязательно следует учитывать следующие условия:

- однотипность стока реки-аналога и исследуемой реки;
- географическую близость расположения водосборов;
- однородность условий формирования стока, сходство климатических условий, однотипность почвогрунтов и гидрогеологических условий, близкую степень озерности, залесенности, заболоченности и распаханности водосборов;

- средние высоты водосборов не должны существенно отличаться, для горных и полугорных районов следует учитывать экспозицию склона и гипсометрию;

- отсутствие факторов, существенно искажающих естественный речной сток (регулирование стока, сбросы воды, изъятие стока на орошение и другие нужды).

При выборе аналогов следует учитывать как возможно большую продолжительность наблюдений в этих пунктах, так и более тесные связи между стоком в приводимом к многолетнему периоду пункте и стоком в пунктах-аналогах.

Главными и наиболее объективными критериями правильности выбора аналога являются синхронность колебаний модулей стока и достаточно тесная коррелятивная связь за годы одновременных наблюдений. Соответствие или синхронность колебаний стока проверяется по совмещенным хронологическим графикам или интегральным кривым.

При выборе пунктов-аналогов необходимо учитывать пространственную связанность рассматриваемой гидрологической характеристики, которую количественно выражают через матрицу парных коэффициентов корреляции или пространственную корреляционную функцию, представляющую собой зависимость коэффициентов парной корреляции стока рек от расстояния между центрами тяжести водосборов.

Связь считается удовлетворительной и приемлемой для практических расчетов, если отклонения большей части точек не превышают 15% и коэффициент корреляции их $r \geq 0.8$.

При приведении допускается использование гидрометрической информации, а также метеорологической и другой информации, период наблюдений за которой превышает период наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой.

При привлечении метеорологической и другой информации могут быть использованы региональные зависимости рассматриваемой гидрологической характеристики от факторов, ее определяющих.

Приведение к многолетнему периоду может быть выполнено по установленной графической или аналитической зависимости короткого ряда с длительным. Наиболее распространенным способом является построение графической зависимости связи значений модулей стока в двух разных створах. Поле рассеяния эмпирических точек аппроксимируется аналитической зависимостью, благодаря которой рассчитываются недостающие данные в коротком ряду.

Приведение гидрологических рядов и их параметров распределения к многолетнему периоду в настоящее время, как правило, осуществляют аналитическими методами. Для предварительного приведения допускается использование графических и графоаналитических методов.

При расчете параметров распределения и значений стока за отдельные годы Q_i с использованием аналитических методов, основанных на регрессионном анализе, должны соблюдаться следующие условия:

$$n' \geq (6-10); R \geq R_{кр}; R/\sigma_R \geq A_{кр}; k/\sigma_k \geq B_{кр}, \quad (20)$$

где n' – число совместных лет наблюдений в приводимом пункте и пунктах-аналогах ($n' \geq 6$ при одном аналоге, $n' \geq 10$ при двух и более аналогах) или число пунктов-аналогов при восстановлении с привлечением кратковременных наблюдений ($n' \geq 6$);

R – коэффициент парной или множественной корреляции между значениями стока исследуемой реки и значениями стока в пунктах-аналогах;

k – коэффициент уравнения регрессии;

σ_k – средняя квадратичная погрешность коэффициента регрессии;

$R_{кр}$ – критическое значение коэффициента парной или множественной корреляции (обычно задается $\geq 0,7$);

$A_{кр}, B_{кр}$ – критические значения отношений R/σ_R и k/σ_k соответственно (обычно задаются $\geq 2,0$).

Если хотя бы один из коэффициентов уравнения регрессии не удовлетворяет условию, то это уравнение не используют для приведения к многолетнему периоду.

В слабо изученном в гидрологическом отношении районе $R_{кр}$, $A_{кр}$ и $B_{кр}$ могут быть уменьшены, а в хорошо изученном – увеличены. При увеличении значений $R_{кр}$, $A_{кр}$ и $B_{кр}$ возрастает точность, но уменьшается объем восстановленных данных.

Модульная единица 3.2

Занятие № 8. Определение нормы годового стока при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений

Цель работы: изучить методы расчета нормы годового стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

Задание:

1. Определить значение годового стока при отсутствии наблюдений на исследуемой реке, рассчитать годовой сток вероятностью превышения $P=1, 25, 50, 75, 90, 95, 97\%$:

а) по карте нормы годового стока;

б) по региональной формуле Петенкова.

2. Сравнить полученные результаты с данными наблюдений.
3. Определить коэффициент вариации годового стока:
 - а) по районным зависимостям от высоты водосбора;
 - б) по зависимости от коэффициента вариации годовых осадков.

Контрольные вопросы:

1. Перечислить основные способы определения гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений.
2. Основные факторы, влияющие на величину годового стока.
3. В каких характеристиках может быть выражена норма стока?
4. Какие методы расчетов гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений вы знаете?
5. Для какой точки водосбора исследуемой реки по карте определяются гидрологические характеристики?

Очень часто период непосредственных наблюдений за режимом реки составляет всего лишь 10–15 лет и недостаточен для гидрологических расчетов. В таких случаях стараются использовать данные о расходах воды географически близких водосборов, но где ведутся более длительные наблюдения.

Реки-аналоги подбираются исходя из сходства физико-географических условий водосборов (площади водосбора, лесистость, заболоченность, средняя высота водосбора, уклон реки и т.д.). Используются дополнительно метеорологические наблюдения, по которым реконструируют сток.

В тех случаях, когда сведения о режиме реки представлены всего двумя-тремя годами наблюдений или вообще отсутствуют, в основу расчетов стока ложатся косвенные приемы. При отсутствии данных гидрометрических наблюдений в расчетном створе применяют региональные методы расчета гидрологических характеристик, основанные на результатах обобщения данных гидрометеорологических наблюдений в районе проектирования. Параметры распределения и расчетные значения определяют с помощью следующих основных методов:

- водный баланс;
- гидрологическая аналогия;
- осреднение в однородном районе;
- построение карт изолиний;
- построение региональных зависимостей стоковых характеристик от основных физико-географических факторов водосборов;

- построение зависимостей между погодичными стоковыми характеристиками и стокоформирующими факторами.

При определении среднего многолетнего стока (нормы) по карте в его значения, определенные по карте (Приложение А), следует вводить поправки на влияние местных азональных факторов, которые учитывают неполное дренирование реками подземных вод, наличие карста, выходов подземных вод, особенности геологического строения бассейна, характер почв (грунтов), промерзание и пересыхание рек, различие средних высот водосборов и другие особенности. Поправки определяют путем построения зависимостей среднего многолетнего стока от азональных факторов.

Среднее многолетнее значение стока (в модулях или слоях стока) для расчетного пункта (центра тяжести водосбора) на равнинной территории или при незначительно меняющемся рельефе определяют линейной интерполяцией между изолиниями стока.

В случае пересечения водосбора несколькими изолиниями средневзвешенное значение стока вычисляют по формуле

$$q_{cp} = (q_1 A_1 + q_2 A_2 + \dots + q_n A_n) / A, \quad (21)$$

где q_1, q_2, \dots, q_n – средние значения стока между соседними изолиниями, пересекающими водосбор;

A_1, A_2, \dots, A_n – соответствующие площади между изолиниями;

A – общая площадь водосбора до расчетного створа.

Основными гидрографическими и физико-географическими факторами для построения региональных зависимостей являются следующие:

- 1) площадь водосбора F , км²;
- 2) гидрографическая длина водотока L , км;
- 3) средневзвешенный уклон водотока i , представляющий собой условный выровненный уклон ломаного профиля, эквивалентный сумме частных средних уклонов профиля водотока.

Средневзвешенный уклон определяют только для незарегулированных водотоков, а также для участков рек, расположенных в нижних бьефах водохранилищ;

- 4) средняя высота водосбора $\bar{H}_в$, м, над уровнем моря; определяют по гипсографической кривой водосбора или по формуле

$$\bar{H}_B = \left[\sum_{j=1}^n (H_{B,i} + H_{B,i+1}) \Delta A_i \right] / 2A, \quad (22)$$

где $H_{B,i}$ – высота поверхности горизонтального сечения (горизонтали), м;

ΔA_i – площадь между двумя соседними горизонталями, км²;

A – общая площадь водосбора, км²;

5) относительная лесистость водосбора $f_{л}$, % общей площади водосбора (лес и кустарники на проходимых болотах в лесные угодья не включают);

6) относительная заболоченность водосбора $f_{б}$, % общей площади водосбора; вычисляют с разделением болот на верховые и низинные;

7) относительная озерность водосбора $f_{оз}$, %, представляющая собой отношение суммы площадей всех озер, расположенных на водосборе, к общей площади водосбора;

9) закарстованность водосбора $f_{к}$, % общей площади водосбора; определяют отношением закарстованной площади водосбора ко всей его площади;

10) относительная распаханность водосбора $f_{р}$, % общей площади водосбора; определяют отношением площади распаханых земель под сельскохозяйственные культуры на водосборе ко всей его площади;

11) характеристика типа почвогрунтов, слагающих поверхность водосбора; определяют по почвенным картам, а также выделяют пять групп почвогрунтов по механическому составу: глинистые, суглинистые, песчаные, супесчаные и каменистые;

12) средняя глубина залегания уровня грунтовых вод (первого водоносного горизонта); определяют по гидрогеологическим картам;

13) характеристики зарегулированности речной системы искусственными водоемами (количество, расположение и регулирующие емкости);

14) характеристика рельефа (равнинный – относительное колебание высот в пределах водосбора менее 200 м, горный – относительное колебание высот на водосборе более 200 м).

Гидрографические характеристики реки и ее водосбора определяют по новейшим топографическим картам, масштабы которых выбирают в зависимости от размера реки и рельефа водосбора.

Среднее многолетнее значение стока неисследованных горных рек следует определять по районным зависимостям стока от средней высоты водосбора, установленной для изученных рек в районе исследования.

В целях уточнения среднего многолетнего значения стока отдельных горных рек по зависимостям $\bar{q} = f(\bar{H}_\%)$, составленным для достаточно крупных районов, используют дополнительные факторы (экспозицию склонов и др.).

В бассейне Енисея обнаруживается хорошо выраженная тенденция изменения стока в зависимости от высотного положения речных водосборов и ориентации их относительно направления движения влагоносных воздушных масс. По этим признакам по территории выявлены локальные зависимости нормы среднегодового модуля стока от высоты местности.

Примером региональной формулы для расчета годового стока является формула, разработанная лабораторией водных ресурсов Сибирского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации под руководством д.г.н. А.В. Петенкова для расчета нормы модуля годового стока малых неизученных рек Красноярского края. В основу положена связь среднемноголетних значений модуля стока и годовых осадков, приведенных к средней высоте бассейна. Среднемноголетний модуль годового стока рассчитывается по эмпирическому уравнению:

$$M_z = [0.027 \lg (X_{\text{ос}} - 250) - 0.053] (X_{\text{ос}} - 250), \quad (23)$$

где $X_{\text{ос}}$ – среднемноголетняя сумма осадков за год в бассейне реки.

Зная средний многолетний модуль стока, можно определить средний многолетний расход воды, объем стока.

Лабораторией была разработана формула для расчета годовой суммы осадков в речных бассейнах.

$$X_{\text{ос}} = X_{\text{ос}} \left(+ \gamma \Delta H \right), \quad (24)$$

где $X_{\text{ос}}$ – среднее за многолетний период годовое количество осадков на гидрометеорологической станции, мм;

γ – градиент увеличения количества осадков по высоте, 0.1/100 м;

$\Delta H = H_{\text{б}} - H_{\text{с}}$ – разность высотного положения бассейна и гидрометеорологической станции.

Значения коэффициента вариации C_v неисследованных рек определяют либо по C_v рек-аналогов, либо по картам коэффициента вариации годового стока (Приложения Б, В), либо по районным эмпирическим формулам, в которые вводят поправки на азональные факторы, либо по зависимости от коэффициента вариации годовых осадков (Приложения Г, Д).

В последнем случае значение коэффициента вариации годовых осадков снимается с карты коэффициента вариации годовых осадков, разработанной СибНИИГИМ для условий Красноярского края, по ближайшей метеостанции. Значение коэффициента вариации годового стока определяется по графикам связи C_v стока и C_v осадков (Приложения Д, Е).

Модульная единица 3.3

Занятие № 9. Определение максимальных расходов воды рек при отсутствии наблюдений за стоком

Цель работы: изучить методы расчета максимальных расходов воды рек по региональным зависимостям.

Задание:

1. Рассчитать максимальные расходы воды снегового половодья и дождевых паводков 1% обеспеченности по формулам СибНИИГИМС.

Контрольные вопросы:

1. Какие гидрологические характеристики можно картировать, а какие нет? Почему?
2. Что такое районные зависимости? Их применение в расчетах.

Максимальные расходы воды формируются в период обильного питания рек, т.е. во время половодий и паводков. Величина максимального расхода воды весеннего половодья, обусловленного таянием снега, зависит от запасов воды в снежном покрове к началу весны и интенсивности снеготаяния. Значение максимума дождевого паводка – от продолжительности, интенсивности и площади распространения дождя. Также зависят максимальные расходы от рельефа, грунтов, почв бассейна, наличия в бассейне озер, водохранилищ, болот.

При наличии наблюдений максимальные расходы воды заданной обеспеченности снимаются с кривой обеспеченности, которая

строится тем же способом, что и для средних годовых расходов воды. Используются данные о максимальных срочных расходах воды.

При отсутствии результатов наблюдений методы определения расчетных характеристик максимального стока весеннего половодья и дождевых паводков подразделяют на следующие:

- а) при наличии одной или нескольких рек-аналогов;
- б) при отсутствии рек-аналогов.

Весеннее половодье. Расчетный максимальный расход воды весеннего половодья $Q_{p\%}$, м³/с, заданной вероятности превышения $P_{\%}$ при наличии рек-аналогов определяют по редуционной формуле

$$Q_{p\%} = K_0 h_{p\%} \mu \delta \delta_1 \delta_2 A / (A + A_1)^n, \quad (25)$$

где K_0 – параметр, характеризующий дружность весеннего половодья; рассчитывают как среднее из значений, определенных по данным нескольких рек-аналогов обратным путем из формулы. Для определения параметра K_0 для рек Красноярского края были получены связи этого коэффициента со средней высотой водосбора;

$h_{p\%}$ – расчетный слой суммарного весеннего стока (без срезки грунтового питания), мм, ежегодной вероятности превышения $P_{\%}$; определяют в зависимости от коэффициента вариации C_v и отношения C_s / C_v , а также среднего многолетнего слоя стока h_0 ;

μ – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды (для расхода 1% обеспеченности коэффициент равен 1);

δ , δ_1 , δ_2 – коэффициенты, учитывающие влияние водохранилищ, прудов и проточных озер (δ), залесенности (δ_1) и заболоченности речных водосборов (δ_2) на максимальные расходы воды;

A – площадь водосбора исследуемой реки до расчетного створа, км²;

A_1 – дополнительная площадь, учитывающая снижение интенсивности редукиции модуля максимального стока с уменьшением площади водосбора, км²;

n – показатель степени редукиции.

Показатель степени редукиции n и параметр A_1 в формуле определяют на основе зависимости $q_{\max p\%} = f(A)$ по данным наблюдений на изученных реках исследуемого района, где $q_{\max p\%}$ – модуль максимального стока. Для рек Красноярского края принят $n = 0.17$ и $A_1 = 1$.

При обосновании в формулу допускается введение дополнительных параметров, учитывающих влияние естественных и искусственных факторов на формирование максимального стока воды рек весеннего половодья.

Средний многолетний слой стока весеннего половодья k_0 следует определять по данным рек-аналогов, интерполяцией по картам, построенным для исследуемого района с учетом последних лет наблюдений или эмпирическим районным зависимостям величин годового стока от величины среднего годового стока.

Коэффициент δ , учитывающий снижение максимального расхода воды весеннего половодья на реках, зарегулированных проточными озерами, следует определять по формуле

$$\delta = \frac{1}{(1 + CA_{оз})^n}, \quad (26)$$

где C – коэффициент, принимаемый равным 0,2 для лесной и лесостепной зон и 0,4 – для степной зоны.

При наличии в бассейне озер, расположенных вне главного русла и основных притоков, значение коэффициента δ следует принимать для $A_{оз} < 2\%$ – 1; $A_{оз} > 2\%$ – 0,8.

Влияние прудов, регулирующих меженный сток, при расчете максимальных расходов воды вероятностью превышения менее 5% не учитывают, а при $P \geq 5\%$ допускается уменьшение расчетного значения до 10%.

Коэффициент δ_1 , учитывающий снижение максимальных расходов воды в залесенных бассейнах, определяют по формуле

$$\delta_1 = \frac{\alpha}{(A_{л} + 1)^{n'}}, \quad (27)$$

где n' – коэффициент редукции; устанавливают по зависимости $q_{\max} = f(A_{л})$ с учетом преобладающих на водосборе почвогрунтов;

α – коэффициент, учитывающий расположение леса на водосборе (в верхней или нижней части водосбора), а также природную зону (лесная или лесостепная).

Коэффициент δ_2 , учитывающий снижение максимальных расходов воды с заболоченных водосборов, определяют по формуле

$$\delta_2 = 1 - \beta \lg (1,1A_6 + 1), \quad (28)$$

где β – коэффициент, определяемый в зависимости от типа болот и механического состава почвогрунтов вокруг болот и заболоченных земель (со слоем торфа не менее 30 см);

A_b – относительная площадь болот, заболоченных лесов и лугов в бассейне реки, %.

Внутриболотные озера, рассредоточенные по водосбору и расположенные вне главного русла и основных притоков, следует включать в значение относительной площади болот.

При заболоченности менее 3 % или проточной средневзвешенной озерности более 6 % коэффициент δ_2 принимают равным единице.

Для рек Красноярского края для учета влияния леса и болот используется формула

$$\delta_1 \delta_2 = 1 - 0,71 \lg(0,05 A_n - 0,1 A_b + 1). \quad (29)$$

Для горных рек коэффициенты δ_1 и δ_2 равны единице.

Для сельскохозяйственной зоны Красноярского края для малых рек применяется для расчета максимального стока формула, разработанная в Сибирском научно-исследовательском институте гидротехники и мелиорации

$$Q_{\max, 1\%} = \frac{M_{\text{Э}, 1\%}}{(F + 1)^n} F, \quad (30)$$

где $M_{\text{Э}, 1\%}$ – элементарный модуль максимального расхода или максимальная водоотдача, л/с км²;

F – площадь водосбора, км²;

n – коэффициент, равный 0,21.

Элементарный модуль максимального расхода половодья определяется по формуле

$$M_{\text{Э}, 1\%} = 0,0127 (hc + X_{1\%})^{17}, \quad (31)$$

где $hc + X_{1\%}$ – наибольший суточный слой водообразования (мм) от снеготаяния и дождя (Приложение Е). Для сельскохозяйственной зоны Красноярского края составлены карты суточного слоя водообразования. Коэффициент n (показатель степени редукции) определяется в зависимости от разности высот в бассейне по таблице.

Значения максимальных расходов воды половодья других вероятностей превышения оцениваются с помощью переходных коэффициентов.

Дождевые паводки. Расчетная формула для определения $Q_{p\%}$ при отсутствии рек-аналогов имеет вид

$$Q_{p\%} = q_{200} \left(\frac{200}{A} \right)^n \delta \delta_2 \delta_3 \lambda_{p\%} A, \quad (32)$$

где q_{200} – модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения $P=1\%$, приведенный к условной площади водосбора, равной 200 км^2 при $\delta = \delta_2 = \delta_3 = 1,0$; определяют для исследуемой реки при наличии региональной карты параметра q_{200} интерполяцией, а при отсутствии – на основе использования многолетних данных гидрологически изученных рек;

A – площадь водосбора, км^2 ;

δ и δ_2 – допускается определять соответственно по формулам, которые приведены выше;

δ_3 – поправочный коэффициент, учитывающий изменение параметра q'_{200} с увеличением средней высоты водосбора \bar{H} , м, в полугорных и горных районах;

$\lambda_{p\%}$ – переходный коэффициент от максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятности превышения $P=1\%$ к значениям другой вероятности превышения $P < 25\%$; назначают на основе установления соотношения по данным гидрологически изученных рек в исследуемом районе, рассчитывается по формуле

$$\lambda_{p\%} = \frac{Q_{p\%}}{Q_{1\%}}. \quad (33)$$

При отсутствии современной региональной карты параметр q_{200} для исследуемой реки определяют интерполяцией по значениям этой характеристики, определенным для выбранных близко расположенных с исследуемым водотоком гидрологически изученных рек. Для рек полугорных и горных районов – на основе анализа графика связи $q_{200} = f(\bar{H}, \text{м})$.

Для сельскохозяйственной зоны Красноярского края для малых рек применяется формула, разработанная в Сибирском научно-исследовательском институте гидротехники и мелиорации. Эlemen-

тарный модуль максимального расхода дождевого паводка определяется по формуле

$$M_{\text{Э},1\%} = 10^{-6} X_{\text{Э}61\%}^{3,46}, \quad (34)$$

где $X_{\text{Э}61\%}$ – суточное количество осадков в бассейне реки, мм.

$$X_{\text{Э}61\%} = X_{\text{Э}1\%} \left(1 + \gamma \left(\frac{\Delta H}{100}\right)\right), \quad (35)$$

где $X_{\text{Э}1\%}$ – суточное количество осадков 1% обеспеченности, определяемое по данным ближайшей метеостанции по таблице;

ΔH – разница между средней высотой бассейна реки и высотой метеостанции;

γ – градиент увеличения количества осадков по высоте, равный 0.1.

Значения максимальных расходов воды дождевых паводков других вероятностей превышения рассчитываются при помощи переходных коэффициентов.

Перечень вопросов для самостоятельного изучения и самоподготовки к текущему контролю знаний

Модуль 1. Гидрологические характеристики

1. Факторы формирования максимальных расходов весеннего половодья.
2. Факторы формирования и географические закономерности минимального летне-осеннего и зимнего стока.
3. Учет цикличности многолетних колебаний в расчетах речного стока.
4. Анализ хозяйственной деятельности на водосборе.
5. Лимитирующие сезоны и периоды.
6. Географические закономерности генезиса дождевых паводков.

Модуль 2. Статистические методы гидрологических расчетов

1. Требования к длине исходного ряда наблюдений при расчете нормы годового стока.
2. Основные законы распределения вероятностей, применяемые в гидрологии.
3. Методы математической статистики в гидрологических расчетах.
4. Учет выдающихся значений речного стока.

Модуль 3. Гидрологические расчеты

1. Построение и оценка точности гидрологических карт.
2. Гидрологическая аналогия.
3. Использование метода наименьших квадратов и множественной регрессии в гидрологических расчетах.

Перечень вопросов для осуществления промежуточного контроля

1. Основные задачи гидрологических расчетов для проектирования.
2. Характеристики речного стока (расход воды, модуль стока, объем стока, модуль стока).
3. Гидрологические характеристики проекта (максимальный, годовой, минимальный сток и уровни воды, взвешенные наносы, ледовые процессы, качество воды).
4. Статистические методы гидрологических расчетов при наличии материалов наблюдений.
5. Почему гидрологические и метеорологические характеристики подчиняются законам теории вероятности?
6. Основные статистики временных рядов: математическое ожидание (норма), стандартное отклонение, коэффициенты вариации и асимметрии.
7. Кривые обеспеченности (распределения) и их аппроксимация вероятностными законами: гамма-распределение (Пирсона, тип 3), Крицкого-Менкеля и др.
8. Стандартные параметры вероятностных законов распределения.
9. Построение эмпирической кривой обеспеченности и ее экстраполяция с применением вероятностных законов распределения.
10. Расчет внутригодового распределения стока.
11. Оценка гидрологических характеристик различной обеспеченности по данным наблюдений.
12. Гидрологические расчеты при недостаточности материалов наблюдений.
13. Графический метод гидрологической аналогии.
14. Учет цикличности колебаний гидрологических характеристик при выборе расчетного периода наблюдений по данным реки-аналога.
15. Регрессионный метод гидрологической аналогии.
16. Расчет параметров регрессионных уравнений и характеристика их точности.
17. Оценка нормы и изменчивости гидрологических характеристик, применение кривых обеспеченности.

18. Гидрологические расчеты при отсутствии материалов гидрологических наблюдений.
19. Зональность гидрологических характеристик.
20. Методы картирования и зонирования характеристик стока и его внутригодового распределения (нормы годового, сезонного и месячного стока, коэффициента вариации и др.).
21. Формулы для расчетов максимального стока. Закон редукции максимального стока по площади водосбора.
22. Формулы для расчета минимального стока.
23. Метод картирования квазиконстант.
24. Типовые схемы внутригодового распределения стока.

Термины и определения

Водоотдача снежного покрова – процесс поступления на поверхность почвы избыточной (не удерживаемой снегом) гравитационной талой или дождевой воды

Водохозяйственный год – расчетный годичный период, начинающийся с самого многоводного сезона

Время добегания – время, в течение которого водная масса проходит заданное расстояние

Гидрограф – график изменения во времени расходов воды за год или часть года (сезон, половодье или паводок) в данном створе водотока

Гидрологические расчеты – раздел инженерной гидрологии, в задачи которого входит разработка методов, позволяющих рассчитать значения различных характеристик гидрологического режима

Гидрологические характеристики – количественные оценки элементов гидрологического режима

Запас воды в снежном покрове – общее количество воды в твердом и жидком состоянии, содержащееся в рассматриваемый момент времени в снежном покрове

Интенсивность дождя – слой осадков, выпадающих за единицу времени, мм

Интенсивность снеготаяния – количество воды, образующееся в процессе таяния снега в единицу времени, мм

Клетчатка вероятностей – специальные клетчатки с прямоугольной системой координат, построенные таким образом, что на них спрямляются (полностью или частично) различные кривые обеспеченности

Коэффициент редукции – коэффициент, характеризующий интенсивность изменения (убывания) какого-либо одного значения с изменением другого, связанного с ним значения

Лимитирующий период – часть водохозяйственного года, неблагоприятная для осуществления проектируемых мероприятий либо по водопотреблению и водопользованию, либо по борьбе с наводнениями и осушению болот

Методы гидрологических расчетов – технические приемы, позволяющие рассчитать значения различных характеристик гидрологического режима, обычно с оценкой вероятности их появления

Нелимитирующий период – часть водохозяйственного года за вычетом лимитирующего периода

Обеспеченность гидрологической характеристики – вероятность того, что рассматриваемое значение гидрологической характеристики может быть достигнуто или превышено среди совокупности всех возможных ее значений

Объем стока – количество воды, протекающее через рассматриваемый створ водотока за какой-либо период времени

Подпор воды – повышение уровня воды из-за наличия в русле препятствия для ее движения

Расчетная обеспеченность – обеспеченность гидрологической характеристики, принимаемая при строительном проектировании для установления значения параметров гидрологического режима, определяющих проектные решения

Расчетный расход воды – расход воды заданной вероятности превышения, принимаемый в качестве исходного значения для определения размеров проектируемых сооружений

Редукция интенсивности дождя – изменение (убывание) средней интенсивности дождя с увеличением его продолжительности

Редукция максимального модуля стока – изменение (убывание) максимального модуля стока с увеличением площади водосбора

Свободное состояние русла – состояние русла, характеризующееся отсутствием препятствий (ледяных образований, водной растительности, сплавного леса и т.д.), а также отсутствием подпора, влияющих на зависимость между расходами и уровнями воды

Соответственные уровни воды – уровни воды на двух гидрологических постах участка реки, относящиеся к одинаковым фазам водного режима, – гребням резко выраженных подъемов или самым низким точкам на графиках колебаний уровней воды

Уклон водной поверхности – отношение разности отметок уровня воды на рассматриваемом участке реки к длине этого участка

Заключение

Вода – величайшее благо, ничем не заменимый вид природных ресурсов; вода – неотъемлемый и важнейший элемент окружающей среды; вода – грозная, еще далеко непокоренная стихия, приносящая человечеству огромные бедствия.

В отличие от других природных ресурсов, водные ресурсы постоянно обновляются и поэтому представляют особую ценность для человечества. В нашей стране водные ресурсы широко используются для орошения и обводнения сельскохозяйственных угодий, промышленного и коммунального водоснабжения, наполнения прудов и водохранилищ. Расчеты характеристик речного стока при проектировании обеспечивают безопасное, максимально выгодное функционирование гидротехнических комплексов.

Методические указания помогут бакалаврам направления подготовки 20.03.02 – Природообустройство и водопользование, профиль «Водные ресурсы и водопользование» сформировать систему знаний, умений и навыков расчета основных гидрологических характеристик для целей проектирования, в условиях наличия данных гидрометрических наблюдений, а также при их недостаточности или отсутствии, оценивать точность их расчетов.

Знать: закон распределения воды на Земном шаре (круговорот воды в природе); основные источники питания водных объектов; основные морфометрические характеристики речного водосбора; основные характеристики речного стока; фазы водного режима.

Уметь: обрабатывать гидрометеорологическую информацию; анализировать качество исходной гидрологической информации; ориентироваться в методической, справочной и научной литературе и существующей на территории действующих федеральных и территориальных нормативных документов.

Библиографический список

1. Владимиров, А.М. Гидрологические расчеты / А.М. Владимиров. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1990. – 365 с.
2. Владимиров, А.М. Сборник задач по гидрологическим расчетам / А.М. Владимиров, В.С. Дружинин. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1992. – 208 с.
3. Гидрологические и воднобалансовые расчеты / под ред. Г.Г. Галущенко. – Киев: Высшая школа, 1987. – 248 с.
4. Горошков, И.Ф. Гидрологические расчеты / И.Ф. Горошков. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1979. – 432 с.
5. Мезенцев, В.С. Гидрологические расчеты в мелиоративных целях / В.С. Мезенцев. – Омск, 1982. – 80 с.
6. Орлов, В.Г. Основы инженерной гидрологии / В.Г. Орлов, А.В. Сикан. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2003. – 188 с.
7. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1984. – 447 с.
8. СНиП 2.01.14–83. Определение расчетных гидрологических характеристик. – Москва: Стройиздат, 1985. – 36 с.
9. СП 33-101-2003. Определение основных гидрологических характеристик. – Ленинград, 2003.

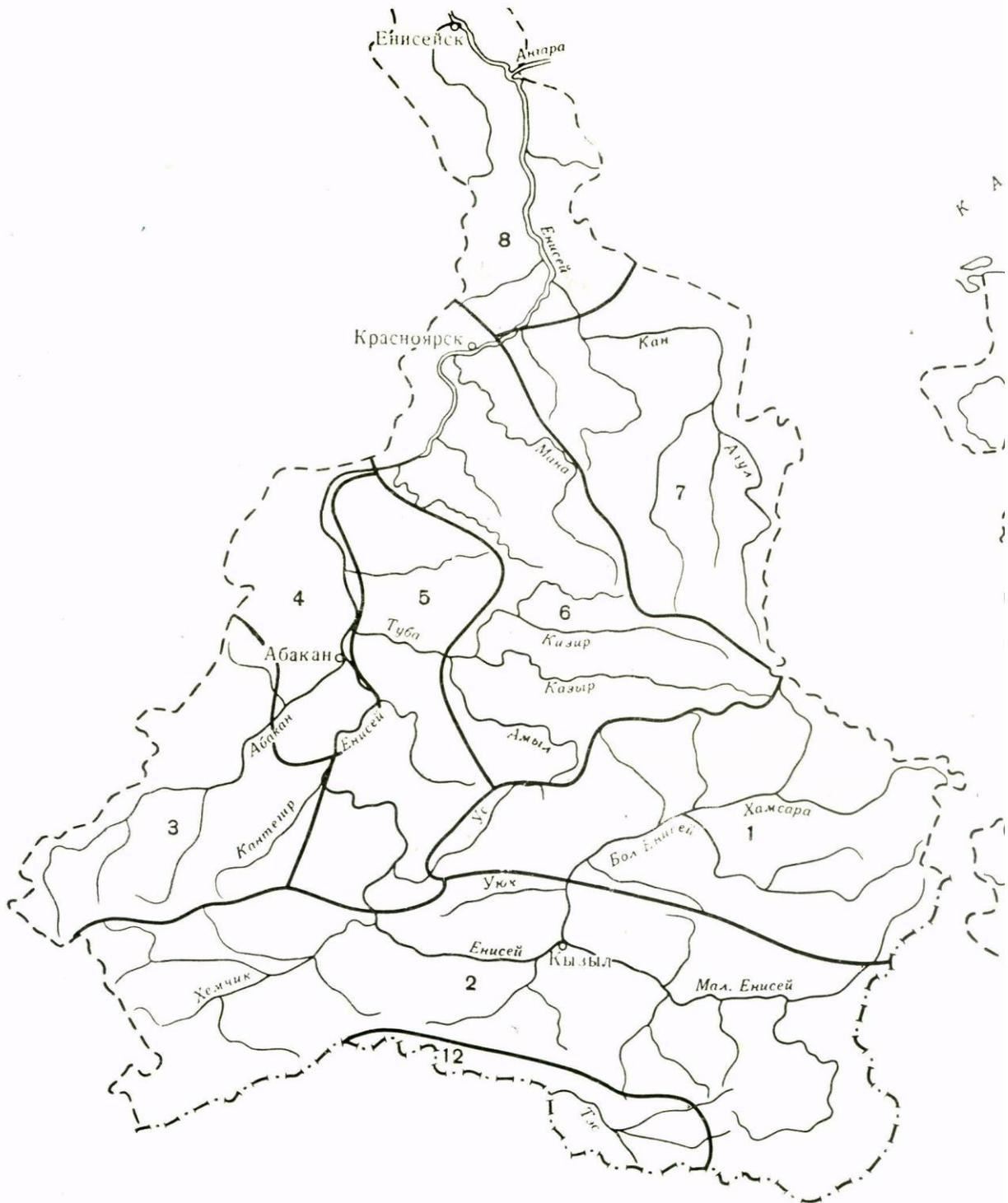
Приложения

Приложение А

Карта среднего многолетнего стока рек бассейна Верхнего Енисея
(л/с·км²)



Схема районирования территории по зависимости $Cv = f(H_{cp})$



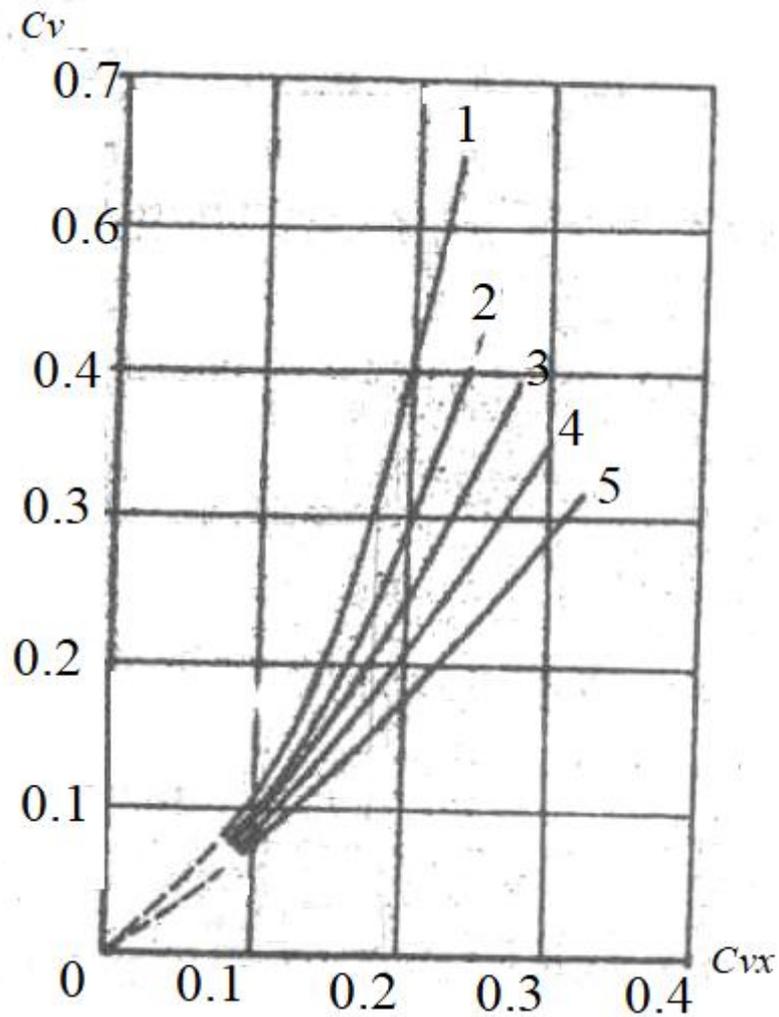
Приложение В

Коэффициенты вариации годового стока рек в зависимости от средней высоты водосбора

Номер района по схеме $C_v = f(H_{cp})$	Средняя высота водосбора, м										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1								0,33	0,30	0,27	0,24
2						0,50	0,47	0,44	0,40	0,37	0,35
3			0,40	0,38	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28	0,26	0,25
4			0,55	0,52	0,50	0,47	0,45	0,43	0,42	0,40	0,39
5		0,50	0,44	0,39	0,35	0,32	0,29	0,27	0,25	0,23	0,22
6		0,28	0,26	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16
7			0,58	0,46	0,35	0,26	0,23	0,21	0,19	0,18	0,17
8	0,47	0,37	0,30	0,24	0,20	0,17	0,14	0,12	0,10		
9	0,41	0,1									
10	0,47	0,40	0,34	0,28	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14		
11	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12			
12								0,40	0,37	0,34	0,31
Номер района по схеме $C_v = f(H_{cp})$	Средняя высота водосбора, м										
	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	2000	2200	2400	
1	0,22	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	
2	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,20	
3	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	
4	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,34	0,33	0,32	0,32	0,31	
5	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15			
6	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,12	
7	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	
8											
9											
10											
11											
12	0,29	0,26	0,24	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,16	0,16	

Приложение Д

График связи коэффициентов вариации годового стока (C_v) и годовых осадков (C_{vx}) при различных размерах водосборной площади (F , км²): 1 – ≤ 500 км², 2 – 1000 км², 3 – 5000 км²



ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ В ПРИРОДООБУСТРОЙСТВЕ

Методические указания

Гордеев Иван Николаевич

Иванова Ольга Игоревна

Электронное издание

Редактор И.Н. Крицына

Подписано в свет 24.01.2023. Регистрационный номер 155
Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117
e-mail: rio@kgau.ru