

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Сикан А.В., Винокуров И.О., Дрегваль М.С.

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
по дисциплине

«ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ»
Часть I

для студентов заочного обучения

Направление: 05.03.05 Прикладная гидрометеорология
Профиль: Прикладная гидрология

Санкт-Петербург
РГГМУ
2021

УДК 556.48+556(07)

Сикан А.В., Винокуров И.О., Дрегваль М.С.

Учебное пособие по дисциплине «Гидрологические расчеты». Часть I / А.В. Сикан, И.О. Винокуров, М.С. Дрегваль. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2021. – 48 с.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой дисциплины «Гидрологические расчеты». Предназначено для студентов заочной формы обучения. Даются рекомендации по освоению теоретической части курса и выполнению контрольных работ.

© Сикан А.В., Винокуров И.О., Дрегваль М.С., 2021
© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основная задача гидрологических расчетов – получить количественные характеристики, описывающие гидрологические явления и процессы в ближайшем и отдаленном будущем на основе анализа состояния водных объектов в прошлом и настоящем.

Знание расчетных гидрологических характеристик необходимо при проектировании гидротехнических сооружений, трубопроводов, железных и автомобильных дорог; при сооружении мелиоративных систем и систем водоснабжения; разработке планов развития промышленных и сельскохозяйственных предприятий; при подготовке схем охраны и рационального использования природных ресурсов; при планировании мероприятий по защите населения от природных и техногенных катастроф и т. д.

Цель изучения дисциплины «Гидрологические расчеты»:

1) обеспечить изучение студентами теоретических основ методов определения основных гидрологических характеристик, а также причин и закономерностей изменения этих характеристик в пространстве и времени;

2) научить студентов выполнять расчеты в соответствии с действующими нормативными документами и самостоятельно разрабатывать региональные методы определения расчетных гидрологических характеристик.

Дисциплина «Гидрологические расчеты» изучается в течение двух семестров, и состоит из двух частей. Настоящие Указания разработаны по первой части дисциплины, включающей разделы: «Норма годового стока», «Определение среднегодовых расходов воды расчетной обеспеченности», «Внутригодовое распределение стока» и «Минимальный сток».

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Студенты-заочники самостоятельно прорабатывают теоретическую часть курса согласно программе дисциплины и выполняют две контрольные работы. В период экзаменационной сессии студенты слушают лекции по ключевым вопросам теории и практики гидрологических расчетов. К экзамену по дисциплине студенты допускаются только после получения зачета по всем контрольным работам.

ЛИТЕРАТУРА

Учебники и учебные пособия

1. *Владимиров А.М.* Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 365 с.
2. *Владимиров А.М., Дружинин В.С.* Сборник задач и упражнений по гидрологическим расчетам. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 208 с.
3. *Сикан А.В.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007.–279 с.

Нормативная и методическая литература

4. Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Стройиздат, 2004. – 72 с.
5. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. – Нижний Новгород: Вектор-ТиС. 2007. – 134 с.
6. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. – СПб.: Ротапринт ГНЦ ААНИИ, 2007. – 67 с.
7. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. – СПб «Нестор-История», 2009. – 193 с.
8. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 444 с.

Электронные версии Методических рекомендаций [5-7] доступны на сайте ГГИ по адресу http://www.hydrology.ru/ru/izdaniya_ggi_New

УКАЗАНИЯ ПО РАЗДЕЛАМ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КУРСА

Дисциплина «Гидрологические расчеты» относится к категории инженерных дисциплин. Поэтому при ее освоении необходимо не только чтение учебной литературы, но и изучение действующих нормативных документов. В настоящее время основным нормативным документом в области гидрологических расчетов является Свод правил СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». В дополнение к своду правил выпущены Методические рекомендации [5,6,7]. Поэтому в списке рекомендуемой литературы по каждому разделу приводятся ссылки на эти источники.

Введение

В результате изучения вводной части курса студенты должны знать задачи и содержание дисциплины «Гидрологические расчеты». Иметь ясное представление о связи гидрологических расчетов с другими дисциплинами гидрологического цикла, об основных этапах и перспективах развития инженерной гидрологии.

Необходимо знать основные нормативные документы, относящиеся к области гидрологических расчетов и источники гидрологической информации.

Рекомендуемые материалы для изучения: [1] – Введение; [4] – разделы 1-4.

Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит основная задача гидрологических расчетов и для чего необходима информация об основных гидрологических характеристиках?
2. Какие нормативные документы регламентируют организацию и порядок проведения гидрологических расчетов?
3. Перечислите официальные источники гидрологической информации?

Норма годового стока

Основные темы. Определение нормы годового стока. Зависимость нормы годового стока от климатических, физико-географических и антропогенных факторов. Влияние на норму годового стока площади водосборного бассейна. Норма стока, как одна из составляющих уравнения водного баланса. Понятие «климатическая норма». Закономерности распределения нормы годового стока по территории России. Метод пространственной интерполяции и построение карт нормы годового стока. Многолетние колебания водности рек и разностные интегральные кривые. Расчет нормы годового стока при различном объеме гидрометрической информации.

Рекомендуемые материалы для изучения: [1] – разделы 4-5; [4] – п.5.1, п.6.1-6.7, п.6.15-6.22, п.7.11-7.14.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется нормой годового стока, единицы измерения, точность и способы определения в зависимости от наличия данных наблюдений?
2. Как влияют на норму годового стока климатические, физико-географические и антропогенные факторы?
3. Какова допустимая погрешность при расчете нормы годового стока?

4. Какие требования при выборе пунктов-аналогов?
5. В каких случаях уравнение регрессии, используемое для восстановления короткого ряда, можно считать надежным?
6. Каковы принципиальные основы построения карт нормы годового стока?
7. Как определить норму годового стока больших рек и малых водотоков по карте?
8. Что такое поправочные коэффициенты к карте нормы годового стока для малых водотоков и как они учитываются при пользовании картой?

Определение среднегодовых расходов воды расчетной обеспеченности

Основные темы. Влияние климатических, физико-географических и антропогенных факторов на годовой сток рек.

Методы расчета, рекомендуемые Сводом правил [4] для расчета параметров распределения рядов годового стока.

Аналитические кривые, рекомендуемые Сводом правил [4] для аппроксимации эмпирических кривых обеспеченностей.

Рекомендации Свода правил [4] по определению коэффициентов асимметрии и автокорреляции рядов годового стока.

Общая схема расчета расходов заданной обеспеченности при наличии данных гидрометрических наблюдений: предварительный анализ исходных данных; проверка рядов на случайность и однородность; расчет параметров распределения и их погрешностей; построение эмпирической и аналитической кривых обеспеченностей.

Методы расчета среднегодовых расходов заданной обеспеченности при ограниченности данных гидрометрических наблюдений при длине ряда 6 и более лет. Расчет характеристик стока методом пропорций при длине ряда менее 6 лет.

Расчет среднегодовых расходов заданной обеспеченности при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в пункте проектирования.

Рекомендуемые материалы для изучения: [1] – раздел 6; [3] – раздел 7; [4] – п.4.7, п.5.1-5.7, п.6.1-6.7, п.6.15-6.22, п.7.11-7.16.

Вопросы для самопроверки

1. Какие статистические критерии рекомендуются Сводом правил [4] для проверки однородности гидрологических рядов?
2. Какие аналитические кривые используются для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченностей?
3. Какие статистические характеристики (параметры распределения) необходимо определить для построения аналитической кривой обеспеченностей?

4. От чего зависит точность определения параметров распределения?
5. Как производится расчет среднегодовых расходов заданной обеспеченности при наличии данных гидрометрических наблюдений?
6. Как производится расчет среднегодовых расходов заданной обеспеченности при недостаточности данных гидрометрических наблюдений?
7. Как определяются параметры распределения при отсутствии данных гидрометрических наблюдений?

Внутригодовое распределение стока

Основные темы. Влияние климатических, физико-географических и антропогенных факторов на внутригодовое распределение стока рек. Понятие водохозяйственного года. Разбивка водохозяйственного года на периоды и сезоны.

Исходные данные, используемые при расчете внутригодового распределения стока. Принципы выделения групп лет различной водности (многоводные годы, средние по водности годы, маловодные годы).

Методы расчета внутригодового распределения стока: метод компоновки сезонов, метод реального года, метод среднего распределения стока за годы характерной градации водности.

Построение кривых продолжительности стояния суточных расходов воды. Расчет коэффициента естественной зарегулированности реки.

Рекомендуемые материалы для изучения: [1] – раздел 7; [4] – п.5.19-5.25, п.6.25, п.7.19-7.24.

Вопросы для самопроверки

1. Как производится разбивка года на периоды и сезоны при расчете внутригодового распределения стока?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета внутригодового распределения стока?
3. Как и какие группы водности выделяются при расчете внутригодового распределения стока?
4. Какие методы используются при расчете внутригодового распределения стока?
5. Как производится расчет внутригодового стока методом реального года при наличии и отсутствии данных гидрометрических наблюдений?
6. Что такое кривая продолжительности стояния суточных расходов воды, и для каких целей она используется?

Минимальный сток

Характеристики минимального стока и их роль в строительном и водохозяйственном проектировании. Принципы выделения периодов низкого стока. Влияние климатических, физико-географических и антропогенных факторов на минимальный сток рек. Особенности формирования минимального стока на малых и средних реках. Причины пересыхания и перемерзания рек.

Расчет минимального стока при наличии данных гидрометрических наблюдений. Учет нулевых значений при расчете минимального стока. Расчет минимального стока в случае генетической неоднородности рядов.

Методы расчета минимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

Рекомендуемые материалы для изучения: [1] – раздел 8; [4] – п.5.12, п.5.41-5.43, п.6.29, п.7.55-7.67; [8] – п.4.24-4.26.

Вопросы для самопроверки

1. В каких видах строительного и водохозяйственного проектирования определяющими являются характеристики минимального стока?
2. Как влияют климатические, физико-географические и антропогенные факторы на характеристики минимального стока рек?
3. Как зависит минимальный сток от размеров водосборного бассейна реки?
4. Каковы причины пересыхания и перемерзания рек?
5. Какие характеристики минимального стока вы знаете?
6. В чем разница между минимальными 30-суточными и минимальными месячными расходами воды?
7. Как производится расчет минимальных расходов заданной обеспеченности при наличии в ряду нулевых значений?
8. Как определяются минимальные расходы воды при отсутствии данных наблюдений на средних и малых реках?

КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

В процессе выполнения контрольных работ студенты работают с двумя водными объектами – «расчетной рекой» и «рекой-аналогом». Период наблюдений на расчетной реке должен составлять 20-25 лет, на реке-аналог – не менее чем на 10 лет больше. Расчетная река и река-аналог должны иметь площади водосборов не менее 500 км² и не более 50 000 км². При этом их площади водосборов должны различаться не более чем в 10 раз. Предполагается также, что на исследуемых реках не

происходило существенных изменений условий формирования стока, вызванных антропогенными факторами (отсутствует межбассейновая переброска стока, сток не подвергся искусственному регулированию и т. п.).

Водные объекты выбираются индивидуально каждым студентом и согласовываются с преподавателем кафедры инженерной гидрологии.

Исходные данные за период с начала наблюдений и до 1980 г. выписываются из справочников «Основные гидрологические характеристики» (ОГХ) и «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод» (МДС); за более поздние годы – из гидрологических ежегодников и по данным Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО).

Порядок выбора реки-аналога и то, какие гидрологические данные требуются для выполнения каждой работы, описаны ниже – в указаниях по выполнению контрольных работ.

Контрольная работа № 1

«Определение нормы годового стока и расчет среднегодовых расходов различной обеспеченности»

Исходные данные: ряды среднегодовых расходов воды по расчетной реке и реке-аналогу.

Цель настоящей работы – освоение методов расчета нормы годового стока и среднегодовых расходов различной обеспеченности при различном объеме гидрометрической информации.

Для иллюстрации излагаемого материала в качестве примера использованы ряды среднегодовых расходов двух рек Северо-запада РФ: р. Лжа – с. Фелицианово за 1958-1982 гг. (расчетная река) и р. Утроя – д. Большая Губа за 1945-1982 гг. (река-аналог). Исходные данные по этим рекам представлены в приложении 3.

Для выполнения контрольной работы студенты должны изучить теоретический материал по темам: «Норма годового стока», «Определение среднегодовых расходов воды расчетной обеспеченности» и знать ответы на контрольные вопросы по этим темам.

1. РАСЧЕТ НОРМЫ ГОДОВОГО СТОКА

Нормой годового стока называется среднее его значение за многолетний период, включающий несколько полных (не менее двух) циклов колебаний водности реки при неизменных физико-географических и климатических условиях и одинаковом уровне хозяйственной деятельности в бассейне реки.

Говоря другими словами, если условия формирования стока на водосборе остаются неизменными, то под нормой стока понимается среднее значение стока за многолетний период такой продолжительности, при увеличении которой полученное значение практически не меняется, т. е. находится в пределах допустимой погрешности.

Значение нормы годового стока может быть выражено в виде любой из четырех характеристик, представленных в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные формулы для определения нормы годового стока

Характеристика стока	Обозначение	Размерность	Расчетная формула	№ формулы
Средний многолетний расход воды	\bar{Q}	м ³ /с	$\bar{Q} = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i / n$	1
Средний многолетний модуль стока	\bar{q}	л/с км ²	$\bar{q} = (\bar{Q}/F)10^3$	2
Средний многолетний объем годового стока	\bar{W}	км ³	$\bar{W} = 31,5 \bar{Q} 10^{-3}$	3
Средний многолетний слой годового стока	\bar{h}	мм	$\bar{h} = 31,5(\bar{Q}/F)10^3$	4
<i>Примечание:</i> F – площадь водосбора, км ² ; n – длина ряда.				

Норма годового стока является основной и устойчивой характеристикой, определяющей общую водоносность рек и потенциальные водные ресурсы данного бассейна или района. Она служит своего рода гидрологическим «эталоном» или «репером», от которого исходят при определении других характеристик стока.

1.1. Расчет нормы годового стока при наличии данных гидрометрических наблюдений

1.1.1. Определить норму годового стока расчетной реки по имеющемуся ряду наблюдений, используя формулы, представленные в табл.1.

1.1.2. Определить коэффициент вариации ряда:

$$C_v = \sqrt{\sum (k_i - 1)^2 / (n - 1)}, \quad (5)$$

где k_i – модульные коэффициенты, определяемые по формуле $k_i = Q_i / \bar{Q}$; n – длина ряда.

1.1.3. Определить относительную погрешность расчета нормы годового стока, используя формулу, рекомендуемую Сводом правил [4]:

$$\varepsilon_{\bar{Q}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}} 100\%, \quad (6)$$

где r – районный коэффициент автокорреляции, который определяется по таблице, представленной в прил.1 (аналогичная таблица опубликована в Пособии [8] – стр.148).

1.1.4. Результаты расчетов оформить в табличном виде (табл.2).

Таблица.2

Расчетные характеристики годового стока реки Лжа – с. Фелицианово

Характеристика	Обозначение	Размерность	Значение
Длина ряда	n	лет	25
Площадь водосбора	F	км ²	619
Коэффициент автокорреляции	r	-	0,21
Погрешность расчета нормы стока	ε	%	10,6
Средний многолетний расход воды	\bar{Q}	м ³ /с	3,52
Средний многолетний модуль стока	\bar{q}	л/с км ²	5,69
Средний многолетний объем годового стока	\bar{W}	км ³	0,111
Средний многолетний слой годового стока	\bar{h}	мм	179

1.2. Расчет нормы годового стока при недостаточности данных гидрометрических наблюдений

- 1.2.1. Выбрать реку-аналог в пределах исследуемого района с периодом наблюдений превышающим период наблюдений на расчетной реке не менее чем на 10 лет.
- 1.2.2. Река-аналог и расчетная река должны иметь сходные гидрографические характеристики. В частности, их площади водосборов должны различаться не более чем в 10 раз. Представить таблицу основных гидрографических характеристик расчетной реки и реки-аналога (табл.3). Данные для таблицы 3 выписать из справочника ОГХ.

Таблица.3

Основные гидрографические характеристики расчетной реки и реки-аналога

Гидрографическая характеристика	Расчетная река р. Лжа – с. Фелицианово	Река-аналог р. Утроя – д. Большая Губа
Площадь водосбора F , км ²	619	2970
Средняя высота водосбора H , м	159	110
Средний уклон реки I_p , ‰	2,22	0,80
Относительная озерность $f_{оз}$, %	8	2
Относительная заболоченность $f_б$, %	<1	4
Относительная лесистость $f_л$, %	18	23

- 1.2.3. Рассчитать и записать в табл.4 характеристики годового стока расчетной реки и реки и реки-аналога.

Таблица.4

Основные статистические характеристики годового стока расчетной реки и реки-аналога

Река - створ	n, лет	F, км ²	r	C _v	Q̄, м ³ /с	q̄, л/с км ²	ε, %
Расчетная река р. Лжа – с. Фелицианово	25	619	0,21	0,43	3,52	5,69	10,6
Река-аналог р. Утроя – д. Большая Губа	38	2970	0,21	0,38	16,0	5,39	7,6

1.2.4. Для проверки синхронности колебаний стока на расчетной реке и реке-аналоге построить совмещенные хронологические графики и разностные интегральные кривые.

1.2.5. Построение хронологических графиков $Q = f(t)$ выполняется либо вручную, либо с использованием табличного процессора Excel (рис.1). На хронологических графиках провести линии средних многолетних расходов (пунктирная линия на рис.1).

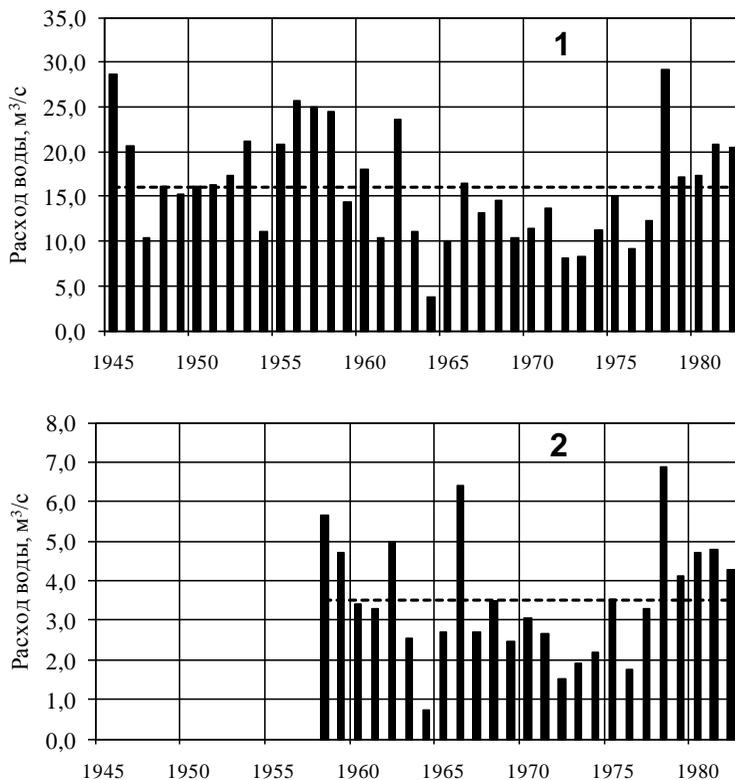


Рис.1 – Хронологические графики среднегодовых расходов воды;
1 – р. Утря – д. Большая Губа (река-аналог); 2 – р. Лжа – д. Фелицианово
(расчетная река).

1.2.6. В рядах годового стока рек, как правило, наблюдается чередование групп маловодных и многоводных лет, что приводит к образованию так называемых «циклов водности». Один цикл водно-

сти включает в себя маловодную и многоводную фазы. Наиболее наглядное представление о циклах колебаний годового стока даст разностная интегральная кривая, которая представляет собой график зависимости

$$\sum_{i=1}^{i=n} (k_i - 1) / C_v = f(t). \quad (7)$$

1.2.7. Для построения разностных интегральных кривых заполняются вспомогательные таблицы 5 и 6. Кривые строятся по данным колонок 2 и 7. Примеры разностных интегральных кривых приведены на рис.2.

Таблица 5

**Расчет координат разностной интегральной кривой реки-аналога,
р. Утряя – д. Большая Губа**

№ п/п	Год	Среднегодовые расходы воды, Q м ³ /с	$k_i = \frac{Q_i}{Q}$	$k_i - 1$	$\sum (k_i - 1)$	$\frac{\sum (k_i - 1)}{C_v}$
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
	1944				0,000	0,00
1	1945	28,6	1,786	0,786	0,786	2,09
2	1946	20,6	1,286	0,286	1,072	2,85
.....						
11	1955	20,8	1,299	0,299	1,100	2,92
12	1956	25,7	1,605	0,605	1,705	4,53
13	1957	25,0	1,561	0,561	2,265	6,02
14	1958	24,5	1,530	0,530	2,795	7,43
15	1959	14,4	0,899	-0,101	2,694	7,16
.....						
34	1978	29,2	1,823	0,823	-0,739	-1,96
35	1979	17,2	1,074	0,074	-0,665	-1,77
36	1980	17,3	1,080	0,080	-0,585	-1,55
37	1981	20,9	1,305	0,305	-0,280	-0,74
38	1982	20,5	1,280	0,280	0,000	0,00
Среднее		16,0	1,00	0,00		

**Расчет координат разностной интегральной кривой расчетной реки,
р. Лжа – д. Фелицианово**

№ п/п	Год	Среднегодовые расходы воды, Q м ³ /с	$k_i = \frac{Q_i}{Q}$	$k_i - 1$	$\sum (k_i - 1)$	$\frac{\sum (k_i - 1)}{C_v}$
1	2	3	4	5	6	7
	1957				0,000	0,00
1	1958	5,66	1,610	0,610	0,610	1,41
2	1959	4,73	1,345	0,345	0,955	2,21
3	1960	3,43	0,976	-0,024	0,931	2,15
4	1961	3,29	0,936	-0,064	0,866	2,00
5	1962	4,98	1,416	0,416	1,283	2,97
.....						
22	1979	4,14	1,177	0,177	-0,925	-2,14
23	1980	4,7	1,337	0,337	-0,588	-1,36
24	1981	4,81	1,368	0,368	-0,220	-0,51
25	1982	4,29	1,220	0,220	0,000	0,00
Среднее		3,52	1,00	0,00		

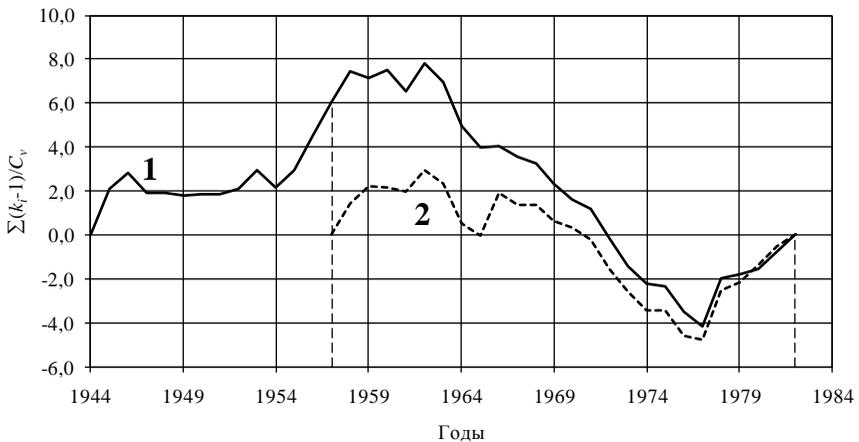


Рис.2. Разностные интегральные кривые среднегодовых расходов воды.
1 – р. Утроя – д. Большая Губа (река-аналог); 2 – р. Лжа – д. Фелицианово (расчетная река).

1.2.8. Оценить водность имеющегося периода наблюдений на расчетной реке, используя разностную интегральную кривую реки-

аналога. С этой целью рассчитать средний модульный коэффициент по формуле:

$$k_{cp} = \frac{C_v(l_k - l_n)}{m} + 1, \quad (8)$$

где C_v – коэффициент вариации ряда среднегодовых расходов реки-аналога; m – период, за который оценивается водность реки, в данном случае m – длина ряда расчетной реки; l_k и l_n – соответственно ордината конца и начала разностной интегральной кривой реки-аналога за интервал времени m .

В рассматриваемом примере $m = 25$; $l_k = 0$, $l_n = 6,02$ (см. 1957 г. в табл.5); $C_v = 0,38$. С использованием этих параметров по формуле (8) получаем $k_{cp} = 0,91$. То есть за имеющийся период наблюдений водность расчетной реки была на 9 % ниже нормы.

1.2.9. За совместный период наблюдений построить график связи среднегодовых расходов расчетной реки и реки-аналога (рис.3).

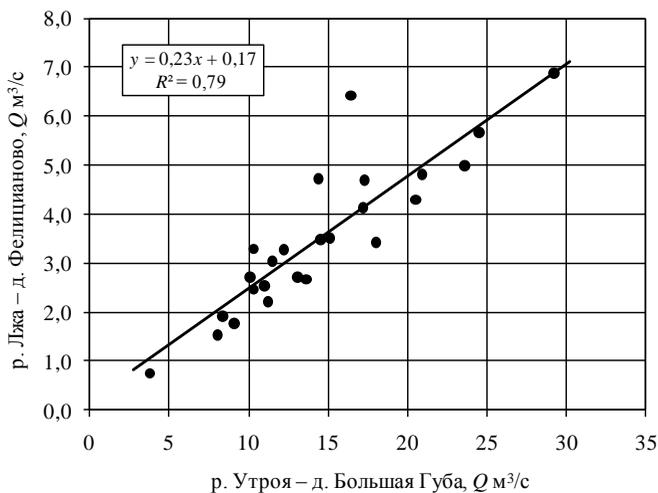


Рис.3. График связи среднегодовых расходов расчетной реки и реки-аналога за совместный период наблюдений.

1.2.10. Рассчитать и записать в табл.7 параметры уравнения линейной регрессии и их погрешности.

Таблица 7

Параметры уравнения линейной регрессии

Параметр	Формула	Значение
Коэффициент корреляции, R	$R = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{(n-1)\sigma_x\sigma_y}$	0,89
Абсолютная среднеквадратическая ошибка коэффициента корреляции, σ_R	$\sigma_R = \frac{1 - R^2}{\sqrt{n - 1}}$	0,044
Коэффициент регрессии, a	$a = R \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$	+ 0,23
Абсолютная среднеквадратическая ошибка коэффициента регрессии, σ_a	$\sigma_a = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \sqrt{\frac{1 - R^2}{n - 2}}$	0,025
Свободный член, b	$b = \bar{y} - a\bar{x}$	+ 0,17
Уравнение регрессии	$y = ax + b$	$y = 0,23x + 0,17$

В таблице 7 используются следующие обозначения:

\bar{x} – средний расход воды на реке-аналоге за совместный период наблюдений; \bar{y} – средний расход воды на расчетной реке за совместный период наблюдений; σ_x – среднеквадратическое отклонение ряда среднегодовых расходов на реке-аналоге за совместный период наблюдений; σ_y – среднеквадратическое отклонение ряда среднегодовых расходов на расчетной реке за совместный период наблюдений. В представленном примере совместный период наблюдений с 1958 по 1982 г, длина совместного периода 25 лет.

1.2.11. Уравнение регрессии является надежным, если выполняются следующие условия:

$$n \geq 6; \quad R \geq 0,7; \quad \frac{R}{\sigma_R} \geq 2; \quad \frac{a}{\sigma_a} \geq 2. \quad (9)$$

В рассмотренном примере

$$n = 25; \quad R = 0,89; \quad \frac{R}{\sigma_R} = 20,3; \quad \frac{a}{\sigma_a} = 9,18.$$

То есть, все условия выполняются и, следовательно, уравнение можно использовать для дальнейших расчетов.

1.2.12. По полученному уравнению регрессии рассчитать норму стока на расчетной реке, приведенную к длинному ряду реки-аналога:

$$\bar{Q}_N = a\bar{Q}_{N,a} + b, \quad (10)$$

где $\bar{Q}_{N,a}$ – средний многолетний расход воды реки-аналога за весь период наблюдений.

1.2.13. Оценить погрешность расчета нормы стока, приведенной к длинному ряду реки-аналога:

$$\varepsilon_{\bar{Q}_N} = \frac{100\sigma_n}{\bar{Q}_N \sqrt{n}} \sqrt{1 + R^2 \left(\frac{n\sigma_{N,a}^2}{N\sigma_{n,a}^2} - 1 \right)} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}}, \quad (11)$$

где \bar{Q}_N – средний многолетний расход воды расчетной реки, определенный по формуле (10); σ_n и $\sigma_{n,a}$ – среднеквадратические отклонения соответственно для ряда расчетной реки и реки-аналога за совместный период наблюдений n ; $\sigma_{N,a}$ – среднеквадратическое отклонение для ряда реки-аналога за весь период наблюдений N ; R – коэффициент корреляции; r – районный коэффициент автокорреляции (см. прил.1).

1.2.14. Расчет по формулам (10-11) представить в табличном виде (табл.8)

**Расчет нормы стока и ее погрешности для реки Лжа – д. Фелицианово
с использованием данных по реке-аналогу**

a	b	R	σ_n	$\sigma_{n,a}$	$\sigma_{N,a}$	$\bar{Q}_{N,a}, \text{м}^3/\text{с}$	$\bar{Q}_N, \text{м}^3/\text{с}$	$\varepsilon_{\bar{Q}_N}, \%$
0,23	0,17	0,89	1,52	5,87	6,02	16,0	3,85	8,5

1.3. Расчет нормы годового стока при отсутствии данных
гидрометрических наблюдений

Основным методом расчета нормы годового стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений является метод пространственной интерполяции. При использовании этого метода норма стока должна быть выражена либо в виде среднего многолетнего слоя годового стока (мм), либо в виде среднего многолетнего модуля стока (л/с км²) (чаще используется модуль стока). Разновидностью этого метода является картирование нормы годового стока.

При построении карт выполняется расчет средних многолетних модулей стока в пунктах наблюдений гидрометрической сети, затем эти значения относят к центрам соответствующих водосборов и проводят изолинии. Полученной картой пользуются для определения нормы стока неизученных рек.

При выполнении единичных расчетов можно не строить карту, а провести интерполяцию нормы годового стока по 3-4 ближайшим рекам-аналогам.

Если створы рек-аналогов расположены достаточно близко к расчетному створу допустимо определять норму стока как среднее значение по этим створам.

В настоящей работе норма стока определяется только по одному аналогу. То есть предполагается, что средние многолетние модули стока на расчетной реке и реке-аналоге примерно равны.

Расчет производится по формуле

$$\bar{Q} = \bar{q}_a F 10^{-3}, \quad (12)$$

где \bar{Q} – средний многолетний расход воды на расчетной реке, м³/с;

\bar{q}_a – средний многолетний модуль стока реки-аналога, л/с км²;

F – площадь водосбора расчетной реки, км².

В исследуемом примере: $\bar{Q} = 5,39 \cdot 619 \cdot 10^{-3} = 3,34 \text{ м}^3/\text{с}$.

1.4. Выводы

В заключение этой части работы заполняется сводная таблица 9. На основе анализа таблицы делаются выводы о том, какой из методов дает наименьшую погрешность и как различаются значения нормы стока, полученные разными методами.

Таблица 9

**Значения нормы годового стока, полученные различными методами;
р. Лжа – д. Фелицианово**

Метод определения нормы годового стока	\bar{Q} , м ³ /с	\bar{q} , л/с км ²	$\varepsilon_{\bar{Q}}$, %
По имеющемуся (короткому) ряду наблюдений	3,52	5,69	10,6
Путем приведения к многолетнему периоду с использованием реки-аналога	3,85	6,22	8,5
При отсутствии данных гидрометрических наблюдений	3,34	5,39	–

При этом следует учитывать, что методы расчета, применяемые при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, имеют меньшую точность, чем расчет с использованием ряда наблюдений в пункте проектирования. В частности точность расчета с использованием карт изолиний средних многолетних модулей стока зависит от длины рядов использованных при построении карты, густоты гидрометрической сети, степени однородности рельефа, масштаба карты, шага изолиний и ряда других факторов. Считается, что ошибка определения нормы стока по картам в зависимости от перечисленных факторов может составлять от 10% до 25% .

2. РАСЧЕТ СРЕДНЕГОДОВЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ РАЗЛИЧНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ

При водохозяйственном планировании и строительном проектировании требуется рассчитывать среднегодовые расходы заданной обеспеченности (заданной вероятности ежегодного превышения). Для решения этой задачи используются методы теории вероятностей и математической статистики [3].

На практике алгоритм расчета включает в себя два основных этапа: 1) необходимо оценить параметры распределения (среднее значение, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии); 2) с использованием этих параметров по аналитической кривой обеспеченностей определить расходы заданной вероятности ежегодного превышения.

2.1. Расчет среднегодовых расходов воды различной обеспеченности при наличии данных гидрометрических наблюдений

- 2.1.1. Требуется: рассчитать среднегодовые расходы заданной обеспеченности: $P = 0,1; 1; 5; 10; 25; 50; 75; 90; 95; 99$ и $99,9\%$. Расчет выполняется для двух рек – расчетной реки и реки, которая в дальнейшем будет использоваться как река аналог. При этом предполагается, что используемые ряды являются однородными по условиям формирования стока (нет явных антропогенных нарушений, отсутствуют выраженные климатические тренды).
- 2.1.2. Рассчитать параметры распределения исследуемых рядов методом моментов по формулам

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{(n - 1)(n - 2)C_v^3}, \quad (13-15)$$

где \bar{Q} – средний многолетний расход воды; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии; $k_i = Q_i / \bar{Q}$ – модульный коэффициент; n – длина ряда.

- 2.1.3. Оценить погрешности расчета полученных параметров по формулам:

$$\varepsilon_{\bar{Q}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}} 100\%, \quad (16)$$

$$\varepsilon_{C_v} = \frac{1}{n + 4C_v^2} \sqrt{\frac{n(1+C_v^2)}{2}} \left(1 + \frac{3C_v r^2}{1+r^2} \right) 100\%, \quad (17)$$

$$\varepsilon_{C_s, \%} = \frac{1}{C_s} \sqrt{\frac{6}{n} (1 + 6C_v^2 + 5C_v^4)} 100\%, \quad (18)$$

где r – районный коэффициент автокорреляции, который определяется по таблице, представленной в прил.1 (для рассматриваемого примера $r = 0,21$).

2.1.4. Результаты расчета параметров распределения и их погрешностей представить в табличном виде (табл. 10).

Таблица 10

Основные статистические характеристики рядов среднегодовых расходов воды

Река – створ	n лет	\bar{Q} м ³ /с	C_v	C_s	$\frac{C_s}{C_v}$	$\varepsilon_{\bar{Q}}$ %	ε_{C_v} %	ε_{C_s} %
р. Лжа – д. Фелицианово	25	3,52	0,43	0,48	1,12	10,6	15,8	154
р. Утроя – д. Б. Губа	38	16,0	0,38	0,40	1,07	7,6	12,7	139

2.1.5. Учитывая, что погрешность расчета коэффициента асимметрии существенно превышает допустимую, в качестве расчетного значения отношения (C_s/C_v) принимается его среднее значение по ближайшим 3-4 пунктам гидрометрической сети с наиболее продолжительными рядами наблюдений (и округлением до 0,5). В рассматриваемом примере принято $C_s/C_v = 1,0$. При этом для большей части территории России наиболее типичным для годового стока является отношение $C_s/C_v = 2$.

2.1.6. С использованием полученных параметров по соответствующим таблицам¹ определить ординаты аналитических кривых обеспеченностей Крицкого-Менкеля. Результаты записать в таблицы 11 и 12.

Таблица 11

Ординаты аналитической кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля для среднегодовых расходов воды, р. Лжа – д. Фелицианово ($Q_{cp} = 3,52$, $Cv = 0,43$, $Cs/Cv = 1$)

$P, \%$	0,1	1	5	10	25	50	75	90	95	99	99,9
k_p	2,51	2,11	1,76	1,58	1,28	0,97	0,68	0,46	0,35	0,19	0,09
Q_p	8,83	7,42	6,19	5,56	4,50	3,40	2,40	1,63	1,24	0,68	0,30

Таблица 12

Ординаты аналитической кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля для среднегодовых расходов воды, р. Утроя – д. Большая Губа ($Q_{cp} = 16,0$, $Cv = 0,38$, $Cs/Cv = 1$)

$P, \%$	0,1	1	5	10	25	50	75	90	95	99	99,9
k_p	2,33	1,98	1,66	1,51	1,25	0,97	0,72	0,52	0,42	0,26	0,14
Q_p	37,3	31,6	26,7	24,2	20,0	15,6	11,6	8,40	6,73	4,16	2,18

2.1.7. Рассчитать ординаты эмпирических кривых обеспеченностей (см. пример 3.1 в [3]). Результаты представить в табличном виде (табл.13-14). Расчет эмпирической обеспеченности произвести по формуле

$$P = \frac{m}{n+1} 100\% , \quad (19)$$

где m – порядковый номер расхода в ранжированном ряду;
 n – длина ряда.

¹ Ординаты кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля опубликованы в [2,3,5,8].

Таблица 13

Расчет ординат эмпирической кривой обеспеченностей среднегодовых расходов воды, р. Лжа – д. Фелицианово

№ п/п	Расходы воды, Q м ³ /с	Ранжированные расходы воды, Q_R м ³ /с	$k = \frac{Q_R}{Q}$	P %
1	5,66	6,88	1,96	3,85
2	4,73	6,42	1,83	7,69
3	3,43	5,66	1,61	11,5
...
22	4,14	1,91	0,54	84,6
23	4,70	1,76	0,50	88,5
24	4,81	1,53	0,44	92,3
25	4,29	0,75	0,21	96,2

Таблица 14

Расчет ординат эмпирической кривой обеспеченностей среднегодовых расходов воды, р. Утroyа – д. Большая Губа

№ п/п	Расходы воды, Q м ³ /с	Ранжированные расходы воды, Q_R м ³ /с	$k = \frac{Q_R}{Q}$	P %
1	28,6	29,2	1,82	2,56
2	20,6	28,6	1,79	5,13
3	10,3	25,7	1,60	7,69
...
35	17,2	9,07	0,57	89,74
36	17,3	8,34	0,52	92,31
37	20,9	8,04	0,50	94,87
38	20,5	3,78	0,24	97,44

2.1.8. На клетчатке вероятностей построить эмпирические и аналитические кривые обеспеченностей (рис.4-5). Кривые обеспеченностей строить либо в расходах, либо в модульных коэффициентах.

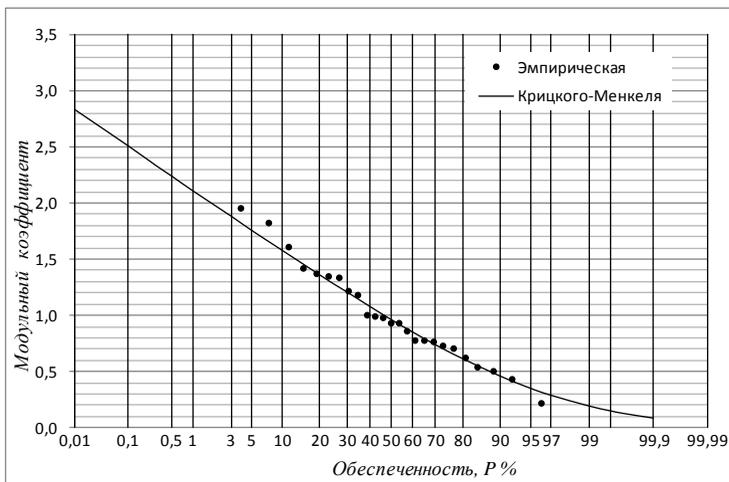


Рис. 4. Эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченностей среднегодовых расходов воды в модульных коэффициентах, р. Лжа – д. Фелицианово;
 $Q_{cp} = 3,52$, $C_v = 0,43$, $C_v/C_v = 1$.

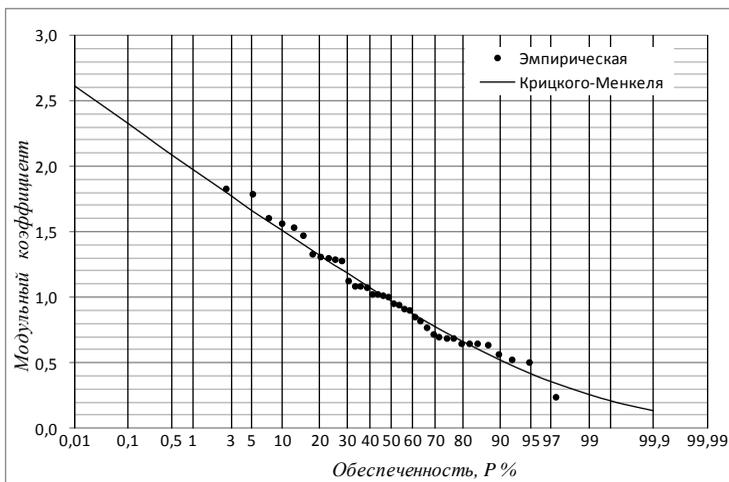


Рис. 5. Эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченностей среднегодовых расходов воды в модульных коэффициентах, р. Утroya – д. Большая Губа;
 $Q_{cp} = 16,0$, $C_v = 0,38$, $C_v/C_v = 1$.

2.1.9. Если аналитические кривые обеспеченностей хорошо согласуются с эмпирическими точками то расходы, представленные в таблицах 11 и 12 можно рекомендовать в качестве расчетных.

2.2. Расчет среднегодовых расходов воды различной обеспеченности при недостаточности данных гидрометрических наблюдений

2.2.1. Если погрешность расчета среднего значения больше 10%, то период наблюдений является недостаточным и ряд следует удлинить, используя данные по реке-аналогу.

2.2.2. В Своде правил [4] приводятся два метода расчета при недостаточности данных наблюдений. Первый метод используется, когда нет необходимости восстанавливать ряд на расчетной реке, а требуется только уточнить параметры распределения, чтобы выполнить более надежный расчет расходов заданной обеспеченности. В этом случае среднее значение и коэффициент вариации рассчитываются по формулам 20 и 21. Результаты расчетов следует представить в табличном виде (табл.15).

$$\bar{Q}_N = a\bar{Q}_{N,a} + b, \quad (20)$$

$$C_{v,N} = \frac{\sigma_n}{\bar{Q}_N \sqrt{1 - R^2 \left(1 - \frac{\sigma_{n,a}^2}{\sigma_{N,a}^2} \right)}}, \quad (21)$$

где \bar{Q}_N – средний многолетний расход воды расчетной реки, приведенный к длинному ряду реки-аналога; $\sigma_{n,a}$ – среднеквадратические отклонения для ряда реки-аналога за совместный период наблюдений n ; $\sigma_{N,a}$ – среднеквадратическое отклонение для ряда реки-аналога за весь период наблюдений N ; R – коэффициент корреляции; a и b – параметры уравнения регрессии.

Расчет среднего значения и коэффициента вариации ряда среднегодовых расходов воды расчетной реки с учетом данных по реке-аналогу*

a	b	R	$\sigma_{n,a}$	$\sigma_{N,a}$	$\bar{Q}_{N,a}$, м ³ /с	\bar{Q}_N , м ³ /с	$C_{v,N}$
0,23	0,17	0,89	5,87	5,78	16,0	3,85	0,39

* – значения параметров в первых семи столбцах таблицы переписаны из таблицы 7.

2.2.3. При реализации второго метода ряд расчетной реки восстанавливается по уравнению линейной регрессии с использованием данных реки-аналога:

$$\tilde{Q}_i = a Q_{i,a} + b. \quad (22)$$

2.2.4. Систематическое преуменьшение дисперсии восстановленной части ряда исключается путем корректировки погодичных значений по формуле:

$$Q_i = \frac{\tilde{Q}_i - \bar{Q}_n}{R} + \bar{Q}_n, \quad (23)$$

где Q_i – расчетные погодичные значения расходов воды восстановленной части ряда; \tilde{Q}_i – погодичные значения, полученные по уравнению регрессии; \bar{Q}_n – среднее значение расхода воды расчетной реки за совместный период наблюдений.

2.2.5. Восстановление ряда оформить в виде таблицы (табл.16). Для контроля качества восстановления ряда построить хронологический график среднегодовых расходов воды расчетной реки, приведенный к длинному ряду реки-аналога (рис.6).

2.2.6. По удлинённому ряду рассчитать новые значения среднего и коэффициента вариации.

В рассматриваемом примере $\bar{Q}_N = 3,89$; $C_{v,N} = 0,40$, то есть, оба метода дают практически одинаковые результаты.

Приведение ряда среднегодовых расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) расчетной реки к длинному ряду реки-аналога

№ п/п	Год	Расходы реки-аналога	Расходы расчетной реки	\tilde{Q}_i	Q_i	
1	1945	28,6		6,75	7,15	Восстановленная часть ряда
2	1946	20,6		4,91	5,08	
3	1947	10,3		2,54	2,42	
4	1948	16,1		3,87	3,92	
5	1949	15,3		3,69	3,71	
6	1950	16,2		3,90	3,94	
7	1951	16,3		3,92	3,97	
8	1952	17,4		4,17	4,25	
9	1953	21,2		5,05	5,23	
10	1954	11,0		2,70	2,60	
11	1955	20,8		4,95	5,13	
12	1956	25,7		6,08	6,40	
13	1957	25,0		5,92	6,22	
14	1958	24,5	5,66		5,66	Исходный ряд
15	1959	14,4	4,73		4,73	
16	1960	18,0	3,43		3,43	
17	1961	10,3	3,29		3,29	
18	1962	23,6	4,98		4,98	
19	1963	11,0	2,54		2,54	
20	1964	3,78	0,75		0,75	
...	
33	1977	12,2	3,28		3,28	
34	1978	29,2	6,88		6,88	
35	1979	17,2	4,14		4,14	
36	1980	17,3	4,70		4,70	
37	1981	20,9	4,81		4,81	
38	1982	20,5	4,29		4,29	

2.2.7. Так же как и при наличии длинного ряда наблюдений, в качестве расчетного значения отношения (C_r/C_v) принимается его среднее значение по ближайшим 3-4 пунктам гидрометрической сети с наиболее продолжительными рядами наблюдений (и округлением до 0,5). В рассматриваемом примере $C_r/C_v = 1,0$.

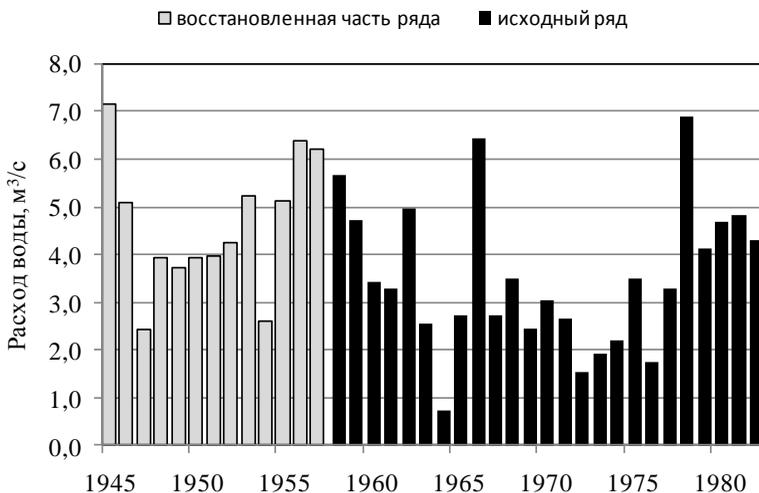


Рис.6. Хронологический график среднегодовых расходов воды расчетной реки, р. Лжа – д. Фелицианово.

2.2.8. С использованием полученных статистических характеристик рассчитать ординаты аналитической кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля и представить их в табличном виде (табл.17).

Таблица 17

Ординаты аналитической кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля для среднегодовых расходов воды, р. Лжа – д. Фелицианово (расчет по удлинненному ряду, $Q_{cp} = 3,89$, $C_v = 0,40$, $C_s/C_v = 1$)

$P, \%$	0,1	1	5	10	25	50	75	90	95	99	99,9
k_p	2,40	2,03	1,70	1,54	1,26	0,97	0,71	0,50	0,39	0,23	0,11
Q_p	9,34	7,90	6,61	5,99	4,90	3,77	2,76	1,95	1,52	0,89	0,43

2.2.9. Построить эмпирическую и аналитическую кривые обеспеченностей (рис.7).

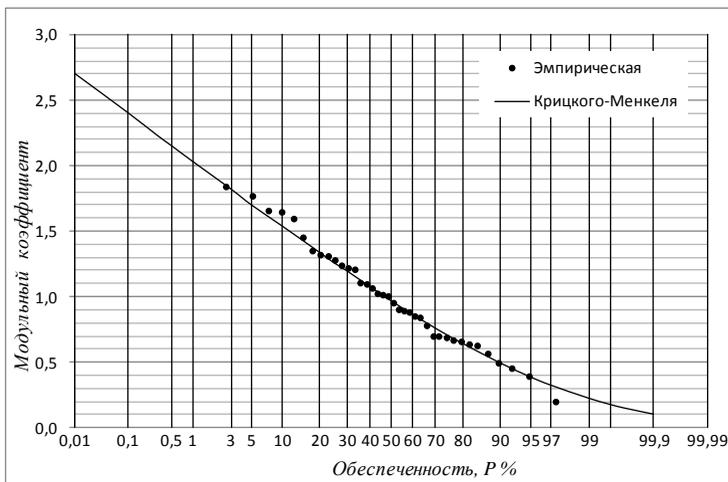


Рис. 7. Эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченностей среднегодовых расходов воды в модульных коэффициентах, р. Лжа – д. Фелицианово (расчет по удлинненному ряду; $Q_{cp} = 3,89$, $C_v = 0,40$, $C_v/C_v = 1$).

2.3. Расчет среднегодовых расходов воды различной обеспеченности при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

2.3.1. При отсутствии данных гидрометрических наблюдений для определения нормы годового стока и коэффициента вариации основным методом является метод пространственной интерполяции (см. п.1.3). Коэффициент вариации, также как и норму стока можно картировать.

В настоящей работе допускается принять в качестве расчетных параметров норму стока и коэффициент вариации по одному аналогу. В рассматриваемом примере:

$$\bar{q} = \bar{q}_a = 5,39 \text{ л/с км}^2; \quad C_v = C_{v,a} = 0,38;$$

$$\bar{Q} = \bar{q}_a F 10^{-3}; \quad \bar{Q} = 5,39 \cdot 619 \cdot 10^{-3} = 3,34 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2.3.2. Так же как и в предыдущих случаях, в качестве расчетного значения отношения (C_v/C_v) принимается его среднее значение по ближайшим 3-4 пунктам гидрометрической сети с наиболее продолжительными рядами наблюдений (и округлением до 0,5). В рассматриваемом примере $C_v/C_v = 1,0$.

2.3.3. С использованием полученных статистических характеристик рассчитать ординаты аналитической кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля и представить их в табличном виде (табл.18).

Таблица 18

Ординаты аналитической кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля для среднегодовых расходов воды, р. Лжа – д. Фелицианово (расчет при отсутствии данных наблюдений, $Q_{cp} = 3,34$, $C_v = 0,38$, $C_s/C_v = 1$)

$P, \%$	0,1	1	5	10	25	50	75	90	95	99	99,9
k_p	2,33	1,98	1,66	1,51	1,25	0,97	0,72	0,52	0,42	0,26	0,14
Q_p	7,77	6,60	5,56	5,05	4,17	3,26	2,42	1,75	1,40	0,87	0,45

2.4. Выводы

В заключение этой части работы заполнить сводную таблицу 19. На основании анализа таблицы провести сравнение статистических характеристик и расчетных расходов, полученных разными методами.

Таблица 19

Характеристики годового стока реки Лжа – д. Фелицианово, рассчитанные различными методами

Метод расчета	\bar{Q} м ³ /с	\bar{q} л/с км ²	C_v	$\frac{C_s}{C_v}$	$Q_{5\%}$ м ³ /с	$Q_{50\%}$ м ³ /с	$Q_{95\%}$ м ³ /с
По имеющемуся (короткому) ряду наблюдений	3,52	5,69	0,43	1	6,34	3,30	1,46
Путем приведения к многолетнему периоду с использованием реки-аналога (расчет по формулам)	3,85	6,22	0,39	1	–	–	–
Путем приведения к многолетнему периоду с использованием реки-аналога (с удлинением ряда)	3,89	6,28	0,40	1	6,78	3,69	1,74
При отсутствии данных гидрометрических наблюдений	3,34	5,39	0,38	1	5,56	3,26	1,40

Контрольная работа № 2

«Расчет внутригодового распределения стока»

Расчет внутригодового распределения стока представляет собой количественную оценку распределения речного стока по сезонам и месяцам года. Сведения о внутригодовом распределении стока необходимы при проектировании водохранилищ, для оценки баланса притока и потребления воды, при разработке проектов промышленного и хозяйственного водоснабжения.

При расчете внутригодового распределения стока рассматриваются среднемесячные расходы за водохозяйственные годы. За начало водохозяйственного года принимается наиболее ранняя дата наступления многоводной фазы с округлением до месяца. На практике за начало водохозяйственного года принимают первый месяц, для которого средняя многолетняя величина месячного расхода превышает норму годового стока. Для большей части территории России наиболее многоводной фазой является весеннее половодье, и, следовательно, водохозяйственный год начинается с началом весны. В отличие от календарного года, водохозяйственный год начинается в разные сроки в различных климатических зонах. Так на большей части северо-запада ЕТР водохозяйственный год начинается с 1 апреля, а в Восточной Сибири – с 1 мая.

Водохозяйственный год делится не на четыре, а на три сезона – два смежных сезона, со сходными условиями формирования стока, объединяются в один составной. Для северо-запада ЕТР сходные условия формирования стока наблюдаются летом и осенью. В эти сезоны сток рек формируется за счет грунтового питания и жидких осадков. Поэтому для данной территории составным сезоном является сезон «лето-осень». Весной река питается главным образом за счет таяния снега, а зимой переходит преимущественно на грунтовое питание. Границы сезонов назначаются едиными для всех лет.

Два смежных сезона, когда сток лимитирует потребление, объединяются в лимитирующий период, следовательно, нелимитирующий период всегда состоит из одного сезона.

Внутри лимитирующего периода выбирается лимитирующий сезон. Следовательно, лимитирующий период состоит из лимитирующего и нелимитирующего сезонов (рис. 1).

Назначение лимитирующего периода и сезона зависит от конкретной задачи. Так для сельского хозяйства лимитирующим сезоном в большинстве случаев является «лето-осень», а для нужд водоснабжения лимитирующим будет самый маловодный сезон в году (для многих регионов России – это зима).

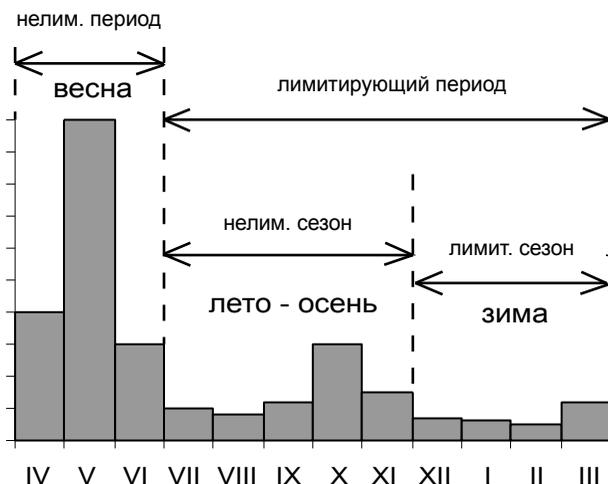


Рис.1. Схема разбивки водохозяйственного года на сезоны и периоды при расчете внутригодового распределения стока.

Расчет внутригодового распределения стока в соответствии с действующими нормативными документами [4] можно производить одним из трех методов: 1) компоновки сезонов; 2) реального года; 3) среднего распределения стока за годы характерной градации водности.

Помимо хронологического описания внутригодового распределения стока (календарное распределение), в практике расчетов используется и некалендарное распределение в форме кривых продолжительности суточных расходов воды. Эти кривые показывают продолжительность стояния внутри года расходов воды, равных или превышающих заданную величину.

В данной работе требуется: 1) выполнить расчет внутригодового распределения стока для года 90%-ной обеспеченности методом «реального года»; 2) построить две кривые продолжительности стояния

суточных расходов воды – для реального маловодного года и осредненную кривую.

Для выполнения работы студентам необходимо изучить теоретический материал по теме «Внутригодовое распределение стока» и знать ответы на контрольные вопросы по этой теме.

Для иллюстрации излагаемого материала в качестве примера используются среднемесячные расходы воды реки р. Луга – ст. Толмачево за 1921-1986 гг.

1. РАСЧЕТ ВНУТРИГODOVОГО СТОКА МЕТОДОМ РЕАЛЬНОГО ГОДА ПРИ НАЛИЧИИ ДАННЫХ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

1.1. Для выполнения этой работы необходимо выписать среднемесячные расходы воды по расчетной реке за имеющийся период наблюдений (не менее 15 лет).

1.2. Обосновать и назначить границы водохозяйственного года лимитирующего периода и лимитирующего сезона.

В приложении 2 приводятся ориентировочные границы сезонов для различных районов России. Как видно из таблиц продолжительность отдельных сезонов в разных географических зонах может составлять от 2 до 7 месяцев. Более точно границы сезонов для каждого региона обоснованы в справочниках «Ресурсы поверхностных вод СССР».

1.3. В качестве лимитирующего сезона принять наиболее маловодный сезон.

1.4. Составить таблицу месячных расходов воды за водохозяйственные годы с разбивкой на периоды и сезоны.

1.5. Для каждого водохозяйственного года рассчитать суммы месячных расходов за год – $\sum Q_{\text{Г}}$, лимитирующий период – $\sum Q_{\text{ЛП}}$ и лимитирующий сезон – $\sum Q_{\text{ЛС}}$ (табл.1).

Таблица 1

**Расчет месячных сумм расходов за водохозяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон
для р. Луги – ст. Толмачево, Q м³/с**

№ п/п	Год	Нелимитирующий период			ЛИМИТИРУЮЩИЙ ПЕРИОД									ΣQ_r	$\Sigma Q_{лп}$	$\Sigma Q_{лс}$
					Нелимитирующий сезон					Лимитирующий сезон						
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	1921-22	164	42,5	16,9	17,3	16,5	14,2	21,5	24,9	12,2	12,1	12,6	15,6	370	147	52,5
2	1922-23	221	250	44,7	28,0	48,0	23,3	26,9	56,0	36,3	16,3	13,5	13,3	777	262	79,4
3	1923-24	50,6	136	93,8	49,5	23,8	27,9	52,5	110	50,6	35,8	19,3	20,9	671	390	127
...
51	1971-72	234	70,2	29,8	18,8	12,7	12,5	15,3	16,7	15	12	11	14,8	463	129	52,8
52	1972-73	99,6	52,2	18,4	9,6	7,6	8,3	11,8	13,1	14,9	9,1	8,2	13,3	266	95,9	45,5
53	1973-74	36	27,6	12,9	8,2	7,1	10	13,4	17,7	16,4	16,8	15,3	16,1	198	121	64,6
54	1974-75	66,6	76,7	37,2	35,8	79,3	31,4	29	55,5	59,6	91	44,2	50,7	657	477	246
55	1975-76	162	44,2	18,2	13,1	11,5	9,7	12,3	11,9	12,9	14,3	12,3	12,6	335	111	52,1
56	1976-77	103	93,3	37,6	36,3	18,2	19,6	17,2	21	28	18,2	13,1	17,9	423	190	77,2
57	1977-78	150	80	22,1	15	17	14,2	26,8	43,6	32	16,9	14,1	21,3	453	201	84,3
58	1978-79	166	65,2	18,8	22,6	34,8	51,2	46,8	60	45,8	20,9	18,1	19,7	570	320	105
59	1979-80	118	107	18,7	16	18,4	18,8	20,4	23,3	43,2	19,7	16,5	16,4	436	193	95,8
60	1980-81	98,3	105	22,4	18,8	21,7	24,4	30,3	52,6	58,6	39,1	25,9	27,8	525	299	151
61	1981-82	150	81,7	36	22,6	16,9	22,4	41,3	77,4	55,6	38,6	30	36,8	609	342	161
62	1982-83	230	77,2	28,2	25,5	17,9	21,9	32,4	66,5	50,9	53,3	45,3	34,1	683	348	184
63	1983-84	194	55,6	32,6	20,5	17,2	15,4	21,4	33,2	36,9	54,8	34,2	26,7	543	260	153
64	1984-85	210	59,2	25,6	16,8	14,4	20,5	39,2	50,5	32,4	19,3	15,6	18,4	522	227	85,7
65	1985-86	107	131	36,4	27,4	22,7	27,6	50,7	70,3	36,4	28,6	24,1	24,8	587	313	114

1.6. Для ряда сумм расходов за водохозяйственный год (колонка 15 в табл.1) рассчитать статистические характеристики, построить эмпирическую и аналитическую кривые обеспеченности и определить сумму расходов за водохозяйственный год 90%-ной обеспеченности (рис.2, табл.2). В качестве расчетного принять эмпирическое отношение C_s/C_v с округлением до 0,5.

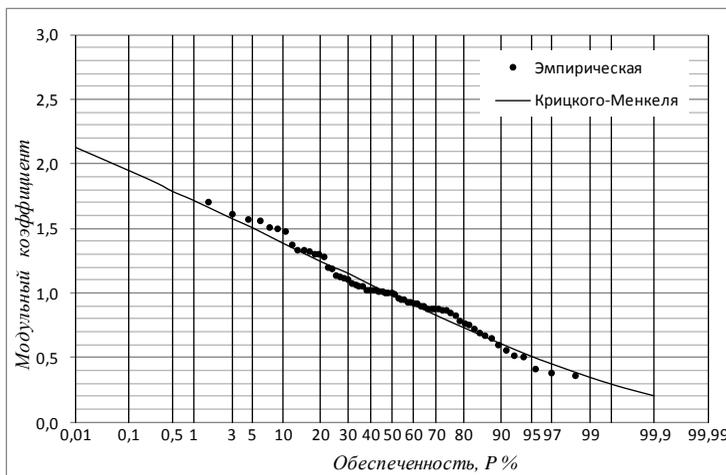


Рис. 2. Эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченностей сумм месячных расходов за водохозяйственный год в модульных коэффициентах, р. Луга – ст. Толмачево.

Таблица 2

Статистические характеристики ряда сумм месячных расходов;
р. Луга – ст. Толмачево

Среднее значение	C_v	C_s	C_s/C_v		$k_{90\%}$	$(\sum Q_{\Gamma})_{90\%}$
			эмпирическое	расчетное		
515	0,30	0,15	0,51	0,50	0,61	316

1.7. Составить таблицу ранжированных сумм месячных расходов за год – $\sum Q_{\Gamma}$, лимитирующий период – $\sum Q_{\text{лп}}$ и лимитирующий сезон – $\sum Q_{\text{лс}}$ с указанием водохозяйственного года, когда эта сумма наблюдалась (табл.3).

Таблица 3

Ранжированные суммы месячных расходов за водохозяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон для р. Луги – ст. Толмачево

№ п/п	$p\%$	ΣQ_{Γ}	год	$\Sigma Q_{\text{лп}}$	год	$\Sigma Q_{\text{лс}}$	год
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,52	876	1928-29	581	1928-29	246	1974-75
2	3,03	828	1924-25	483	1935-36	209	1960-61
3	4,55	807	1926-27	477	1974-75	184	1982-83
...
42	63,6	465	1937-38	199	1940-41	84,3	1977-78
43	65,2	463	1971-72	193	1979-80	82,1	1956-57
44	66,6	454	1969-70	193	1968-69	79,4	1922-23
45	68,2	454	1933-34	190	1976-77	78,2	1967-68
46	69,7	453	1967-68	189	1952-53	77,2	1976-77
47	71,2	453	1977-78	165	1956-57	75,8	1951-52
48	72,7	448	1961-62	161	1955-56	74,2	1955-56
49	74,2	447	1949-50	158	1967-68	65,0	1947-48
50	75,8	436	1979-80	147	1921-22	65,0	1968-69
51	77,3	423	1976-77	146	1946-47	64,6	1973-74
52	78,8	402	1952-53	143	1951-52	59,2	1945-46
53	80,3	393	1947-48	133	1938-39	59,0	1938-39
54	81,8	390	1954-55	131	1963-64	58,4	1969-70
55	83,3	370	1921-22	130	1947-48	57,5	1964-65
56	84,8	357	1944-45	130	1969-70	54,4	1946-47
57	86,4	347	1963-64	129	1971-72	52,8	1971-72
58	87,9	335	1975-76	126	1959-60	52,5	1921-22
59	89,4	309	1965-66	121	1973-74	52,1	1975-76
60	90,9	288	1940-41	111	1964-65	49,8	1963-64
61	92,4	266	1972-73	111	1975-76	48,7	1965-66
62	93,9	259	1964-65	107	1965-66	45,5	1972-73
63	95,5	213	1938-39	106	1944-45	45,3	1959-60
64	97,0	198	1973-74	95,9	1972-73	44,8	1944-45
65	98,5	185	1939-40	95,3	1939-40	36,6	1939-40

Маловодная группа

1.8. Рассчитать эмпирическую обеспеченность сумм расходов по формуле $P = [m/(n+1)]100\%$ (колонка 2 в табл.3), где m – порядковый номер суммы в ранжированном ряду; n – длина ряда.

1.9. Выделить в табл.3 маловодную группу ($P > 66,7\%$).

1.10. В маловодной группе выбрать реальный водохозяйственный год, для которого обеспеченность сумм месячных расходов за водохозяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон наиболее близка к расчетной обеспеченности (в данном случае по условиям задания $P = 90\%$). Для объективного выбора расчетного года используется критерий ΔP :

$$\Delta P = (P_{\Gamma} - P_{\text{расч}})^2 + (P_{\text{ЛП}} - P_{\text{расч}})^2 + (P_{\text{ЛС}} - P_{\text{расч}})^2, \quad (1)$$

где $P_{\text{расч}}$ – расчетная обеспеченность; P_{Γ} , $P_{\text{ЛП}}$, $P_{\text{ЛС}}$ – эмпирические обеспеченности сумм расходов соответственно за год, лимитирующий период и лимитирующий сезон в конкретном водохозяйственном году. В качестве расчетного принимается год, для которого ΔP является минимальным. Расчет ΔP представить в табличном виде (табл.4).

Таблица 4

Расчет критерия ΔP для маловодной группы лет

в/х год	Обеспеченность, P%				ΔP
	расчетная	в/х года	лимитирующего периода	лимитирующего сезона	
1967-68	90	69,70	74,20	68,20	1137
1976-77	90	77,30	68,20	69,70	1049
1947-48	90	80,30	83,30	74,20	389
1921-22	90	83,30	75,80	87,90	251
1944-45	90	84,80	95,50	97,00	106
1975-76	90	87,90	92,40	89,40	11
1965-66	90	89,40	93,90	92,40	21
1972-73	90	92,40	97,00	93,90	70
1964-65	90	93,90	90,90	83,30	61
1938-39	90	95,50	80,30	80,30	218
1973-74	90	97,00	89,40	77,30	211
1939-40	90	98,50	98,50	98,50	217

В рассматриваемом примере в качестве расчетного принимается 1975-76 водохозяйственный год, для которого значение ΔP минимальное ($\Delta P = 11$).

- 1.11. Среднемесячные расходы выбранного года-модели выражаются в процентах от суммы месячных расходов за весь водохозяйственный год ($\sum Q_{\Gamma}$):

$$R_i = (Q_i / \sum Q_{\Gamma}) 100\% \quad (2)$$

где Q_i – среднемесячный расход i -того месяца года-модели. Результаты записать в таблицу 5 (строки 1 и 2).

- 1.12. В последнюю ячейку третьей (последней) строки таблицы 5 записывается расчетная годовая сумма месячных расходов 90%-ной обеспеченности ($(\sum Q_{\Gamma})_{90\%}$ из табл.2).
- 1.13. Окончательно расчет внутригодового распределения стока производится по формуле

$$Q_{p,i} = (R_i / 100) \cdot (\sum Q_{\Gamma})_{90\%}, \quad (3)$$

где $Q_{p,i}$ – среднемесячный расход i -того месяца для года расчетной обеспеченности;

Результаты записываются в последнюю строку таблицы 5.

- 1.14. По данным таблицы 5 построить расчетный гидрограф (рис.3).

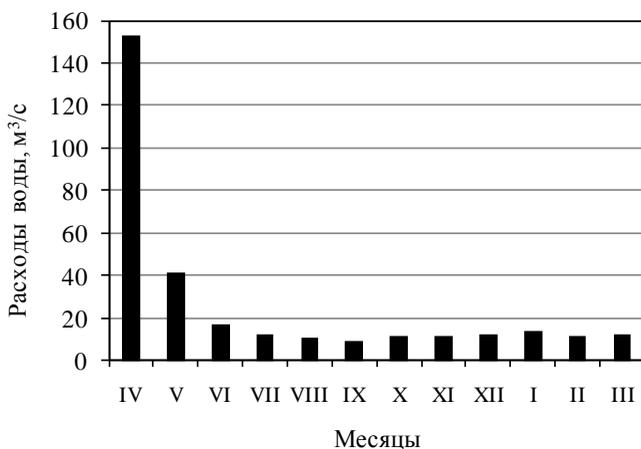


Рис.3. Расчетное внутригодовое распределение стока для года 90%-ной обеспеченности; р. Луга – ст. Толмачево.

Таблица 5

Расчетное внутригодовое распределение стока для года 90%-ной обеспеченности по модели реального водохозяйственного года для р. Луги – ст. Толмачево, расходы в м³/с

Характеристика в/х года	Нелимитирующий период			ЛИМИТИРУЮЩИЙ ПЕРИОД									Сумма за год
				Нелимитирующий сезон					Лимитирующий сезон				
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
Год-модель 1975-1976	162	44,2	18,2	13,1	11,5	9,7	12,3	11,9	12,9	14,3	12,3	12,6	335
$R_p, \%$	48,4	13,2	5,4	3,9	3,4	2,9	3,7	3,6	3,9	4,3	3,7	3,8	100 %
Расчетный год, $P = 90\%$	153	41,7	17,2	12,4	10,8	9,1	11,6	11,2	12,2	13,5	11,6	11,9	316

Таблица 5а

Процентное распределение стока по сезонам для года 90%-ной обеспеченности

Нелимитирующий период (IV – VI)	Нелимитирующий сезон (VII – XI)	Лимитирующий сезон (XII – III)	Сумма за год, %
67	17,5	15,5	100

Замечание. Метод реального года можно применять и при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. В этом случае весь расчет ведется по данным реки-аналога за исключением последнего этапа.

При заполнении последней строки таблицы 5 используется среднегодовой расход воды P %-ной обеспеченности расчетной реки, полученный по методике, которая применяется при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. При этом переход к расчетной сумме месячных расходов осуществляется по формуле

$$(\sum Q_{г})_{P\%} = 12Q_{P\%}, \quad (4)$$

1.15. *Выводы.* На основе выполненных расчетов дать краткую характеристику внутригодового распределения стока на расчетной реке. Отметить какая доля суммарного стока приходится на каждый сезон.

2. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТОЯНИЯ СУТОЧНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ

2.1. Из таблицы «Средние и характерные расходы воды» справочника ОГХ для реального маловодного года выписать расходы продолжительностью стояния 30, 90, 180, 270, 355 суток, а также наибольший расход (продолжительность его стояния 1 сутки) и наименьший расход (продолжительность стояния – 365 суток). Данные записать в первую строку таблицы 6. В эту же строку таблицы записать среднегодовой расход. В качестве маловодного года можно выбрать любой календарный год, у которого среднегодовой расход существенно ниже нормы.

2.2. Во вторую строку таблицы 6 выписать те же характеристики осредненные за многолетний период (см. строка «средний» в справочнике ОГХ).

2.3. По данным таблицы 6 построить кривые продолжительности стояния суточных расходов воды (рис.4-5).

2.4. На графики нанести линии среднегодовых расходов воды.

**Ординаты кривых продолжительности стояния суточных
расходов воды, м³/с**

Характеристика года	$Q_{\text{ср}}$	Продолжительность стояния, сут						
		1	30	90	180	270	355	365
Маловодный, 1973 г.	15,0	41,4	32,8	17,7	12,0	8,47	7,04	6,81
Осредненная кривая	43,9	310	111	42,3	23,1	16,8	12,5	11,7

- 2.5. Для каждого года рассчитать коэффициент естественной зарегулированности реки:

$$\varphi = f_1 / f_2, \quad (5)$$

где f_1 – площадь подграфика ниже среднего значения; f_2 – общая площадь подграфика (см. рис. 6).

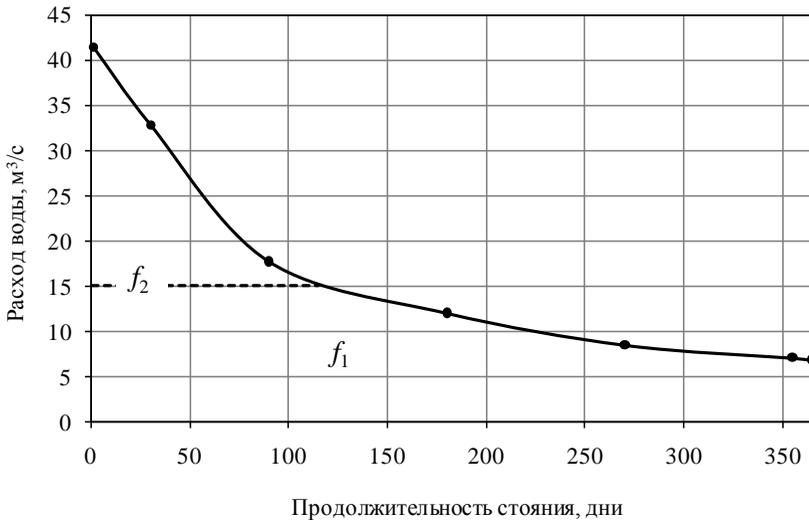


Рис.4. Кривая продолжительности стояния суточных расходов, р. Луга – ст. Толмачево; 1973 – маловодный год; $Q_{\text{ср}} = 15,0 \text{ м}^3/\text{с}$; $\varphi = 0,87$.

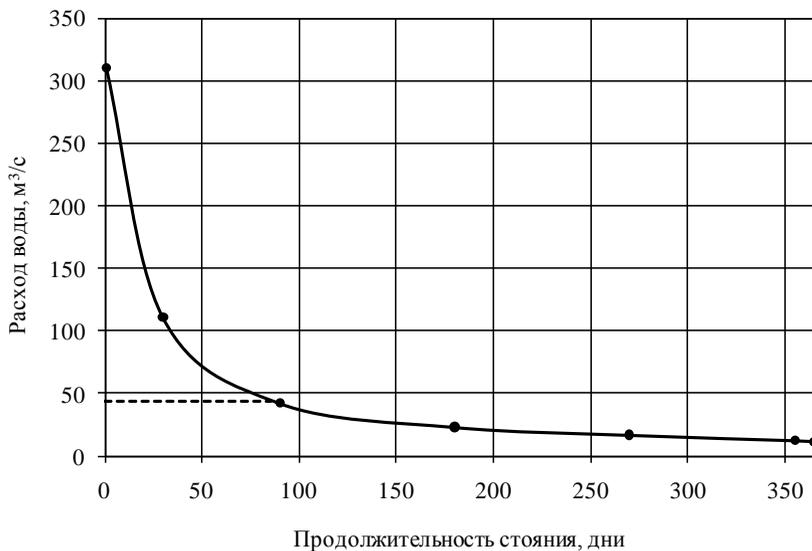


Рис.5. Осредненная кривая продолжительности стояния суточных расходов, р. Луга – ст. Толмачево; $Q_{cp} = 43,9 \text{ м}^3/\text{с}$; $\varphi = 0,63$.

- 2.6. *Выводы.* Проанализировать полученные кривые продолжительности стояния суточных расходов. Отметить: как зависит коэффициент естественной зарегулированности от водности реки?

Районные коэффициенты автокорреляции для рядов годового стока

Район	Коэффициент автокорреляции
Кольский п-ов, Карелия	0,24
Северо-запад и Северный край Европейской территории России	0,21
Прибалтика	0,20
Белоруссия, Верхнее Поднепровье, Верхневолжский район, Средний Урал (бассейн р. Камы) и Приуралье, Нижнее Поволжье и Западный Казахстан	0,23
Украина, Молдавия, Донской район, Северный Кавказ	0,22
Закавказье и Дагестан	0,17
Средний Урал и Приуралье (бассейн р. Тобола), Западная Сибирь и Северный Казахстан	0,31
Урало-Эмбинский район, Актюбинская, Кустанайская области, Центральный и Южный Казахстан, Средняя Азия	0,24
Ангаро-Енисейский, Лено-Индигирский районы, Северо-восток СССР, Дальний Восток, п-ов Камчатка	0,14
<i>Источник: Приложение 2, табл.5а в [8].</i>	

**Примерные сроки и продолжительность основных гидрологических сезонов
для России и прилегающих территорий**

Район	Название сезона и число месяцев в сезоне (числитель); границы сезона (знаменатель)		
Крайний Север (севернее 64° с. ш.)	<u>В (3)</u> V-VII	<u>Л-О (4)</u> VIII-XI	<u>З (5)</u> XII-IV
Лесная зона (севернее 56° с. ш. и восточнее 30° в. д.)	<u>В (3)</u> IV-VI	<u>Л-О (5)</u> VII-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Южная часть лесной зоны и лесостепная зона (севернее 49° с. ш.)	<u>В (3)</u> III-V	<u>Л-О (6)</u> VI-XI	<u>З (3)</u> XII-II
Степная зона (южнее 49° с. ш.) и юго-западная часть Прибалтики (южнее 57° с. ш. и западнее 24° в. д.)	<u>В (3)</u> II-IV	<u>Л-О (7)</u> V-XI	<u>З (2)</u> XII-I
Прикарпатье и Закарпатье	<u>В (3)</u> III-V	<u>Л-О (6)</u> VI-XI	<u>З (3)</u> XII-II
Горные районы Крыма	<u>З-В (6)</u> XII-V	<u>Л (3)</u> VI-VIII	<u>О (3)</u> IX-XI
Северная часть Сибири до р. Лены (севернее 64° на западе и 56° у оз. Байкал)	<u>В (2)</u> V-VI	<u>Л-О (4)</u> VII-X	<u>З (6)</u> XI-IV
Западная Сибирь (южнее 64°–60°)	<u>В (3)</u> IV-VI	<u>Л-О (5)</u> VII-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Центральный и Северный Казахстан	<u>В (2)</u> IV-V	<u>Л-О (6)</u> VI-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Горный Алтай	<u>В-Л (6)</u> IV-IX	<u>О (2)</u> X-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Забайкалье	<u>В (2)</u> IV-V	<u>Л-О (5)</u> VI-X	<u>З (5)</u> XI-III
Прибайкалье	<u>В-Л (5)</u> IV-VIII	<u>О (2)</u> IX-X	<u>З (5)</u> XI-III
Северо-Восточная Сибирь (восточнее р. Лены)	<u>В-Л (4)</u> V-VIII	<u>О (2)</u> IX-X	<u>З (6)</u> XI-IV
Дальний Восток (бассейн р. Амура)	<u>В-Л (6)</u> IV-IX	<u>О (2)</u> X-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Горные районы Кавказа и Средней Азии	<u>В (4)</u> III-VI	<u>Л-О (5)</u> VII-XI	<u>З (3)</u> XII-II
Высокогорные районы Кавказа и Средней Азии	<u>В (2)</u> III-IV	<u>Л (5)</u> V-IX	<u>О-З (5)</u> X-II
* В – весенний сезон; (3) – продолжительность сезона 3 месяца; V-VII – границы сезона: май – июль.			
Источник: Приложение Б1 в [7].			

Приложение 3а

Среднегодовые расходы реки Лжа – д. Фелицианово (25 лет)

Год	Расход, м ³ /с	Год	Расход, м ³ /с	Год	Расход, м ³ /с
1958	5,66	1967	2,72	1976	1,76
1959	4,73	1968	3,48	1977	3,28
1960	3,43	1969	2,46	1978	6,88
1961	3,29	1970	3,04	1979	4,14
1962	4,98	1971	2,67	1980	4,7
1963	2,54	1972	1,53	1981	4,81
1964	0,75	1973	1,91	1982	4,29
1965	2,72	1974	2,2		
1966	6,42	1975	3,51		

Приложение 3б

Среднегодовые расходы реки Утroyа – д. Большая Губа (38 лет)

Год	Расход, м ³ /с	Год	Расход, м ³ /с	Год	Расход, м ³ /с
1945	28,6	1958	24,5	1971	13,6
1946	20,6	1959	14,4	1972	8,0
1947	10,3	1960	18,0	1973	8,3
1948	16,1	1961	10,3	1974	11,2
1949	15,3	1962	23,6	1975	15,1
1950	16,2	1963	11,0	1976	9,1
1951	16,3	1964	3,80	1977	12,2
1952	17,4	1965	10,1	1978	29,2
1953	21,2	1966	16,4	1979	17,2
1954	11,0	1967	13,1	1980	17,3
1955	20,8	1968	14,5	1981	20,9
1956	25,7	1969	10,3	1982	20,5
1957	25,0	1970	11,5		

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Общие указания.....	3
Литература.....	4
Указания по разделам теоретического курса.....	4
Контрольные работы.....	8
Контрольная работа № 1– «Определение нормы годового стока и расчет среднегодовых расходов различной обеспеченности»..	9
Контрольная работа № 2 – «Расчет внутригодового распреде- ления стока».....	32
Приложения.....	44

Учебное издание

Сикан Александр Владимирович, к.г.н., доцент
Винокуров Игорь Олегович, ст. преподаватель
Дрегваль Мария Станиславовна, ст. преподаватель

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
по дисциплине

«Гидрологические расчеты»

Часть I

Печатается в авторской редакции.

Подписано в печать 16.11.2021. Формат 60×90 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 3. Тираж 20 экз. Заказ № 1156.
РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.