
**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральная служба по гидрометеорологии
и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)**

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

**РД
52.08.915 –
2021**

**Обработка и обобщение данных наблюдений
за стоком воды на реках и каналах
при подготовке справочных изданий водного кадастра**

Санкт-Петербург

ФГБУ «ГГИ»

2022

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН:

- Федеральным государственным бюджетным учреждением «Государственный гидрологический институт» (ФГБУ «ГГИ»);

- Федеральным государственным бюджетным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных» (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»)

2 РАЗРАБОТЧИКИ Т. И. Яковлева, канд. техн. наук (руководитель разработки);

О. Е. Кучеренко, Т. М. Аксянов, Ю. В. Изъюрова (ФГБУ «ГГИ»); А. И. Шевченко, Л. И. Яковенко, канд. техн. наук, И. Л. Готовченкова (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»)

3 СОГЛАСОВАН:

- с Управлением государственной наблюдательной сети и научных исследований (УГСН) Росгидромета 26.08.2021

- с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун») письмом от 20.10.2020 № 01-46/2423

4 ОДОБРЕН решением методической комиссии ФГБУ «ГГИ», протокол от 26 декабря 2019 № 2

5 УТВЕРЖДЕН и ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ приказом Росгидромета от 26.08.2021 № 280

6 ЗАРЕГИСТРИРОВАН головной организацией по стандартизации Росгидромета ФГБУ «НПО «Тайфун» 26.08.2021

ОБОЗНАЧЕНИЕ РУКОВОДЯЩЕГО ДОКУМЕНТА РД 52.08.915–2021

7 ВЗАМЕН:

- наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Ч. III. Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника», в части главы 5 «Вычисление стока воды» и главы 6 «Сведения о стоке воды в составе гидрологического ежегодника»;

- методических рекомендаций по автоматизированному вычислению ежедневных расходов воды. – Обнинск: ФООП ВНИИГМИ-МЦД, 1991

8 СРОК ПЕРВОЙ ПРОВЕРКИ 2026 год.

ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРКИ 5 лет

Содержание

1 Область применения.....	1
2 Нормативные ссылки.....	1
3 Термины, определения и сокращения.....	2
4 Общие положения.....	5
5 Гидрометрический учет стока воды.....	7
5.1 Варианты и расчетные характеристики гидрометрического учета стока	7
5.2 Задача и основные положения режимного учета стока.....	9
5.3 Построение и анализ комплексного графика гидрометеорологических характеристик. Выделение фазово-однородных периодов водного режима.....	14
5.4 Аппроксимация зависимости расходов воды и элементов руслового потока от уровней воды.....	17
5.5 Контроль надежности исходных данных, исключение грубых погрешностей измерения расходов воды и аппроксимация зависимости расходов от уровней воды в диапазоне измеренных расходов воды.....	21
5.6 Экстраполяция расходов воды за пределы диапазона их измерения.....	23
5.7 Оценка однозначности зависимости расходов от уровней воды и выбор методов учета стока по фазам водного режима.....	27
6 Учет стока при однозначных зависимостях расходов от уровней воды.....	30
6.1 Зависимость расходов от уровней воды за отдельный год.....	30
6.2 Многолетняя зависимость расходов от уровней воды.....	34
7 Гидрометрический учет стока при изменяющихся гидравлических условиях и деформациях русла.....	37
7.1 Характеристики пропускной способности русла и способы их интерполяции	37
7.2 Алгоритм вычисления ежедневных расходов воды при отсутствии однозначной зависимости расходов от уровней воды.....	45
7.3 Гидрометрический учет стока в условиях неустановившегося движения речного потока.....	49
7.4 Гидрометрический учет стока в условиях переменного подпора.....	53
7.5 Гидрометрический учет стока на реках с деформирующимися руслами.....	56
7.6 Гидрометрический учет стока рек в условиях ледообразования, ледостава и таяния льда.....	60
7.6.1 Алгоритм учета стока с использованием данных о температуре воздуха.....	60
7.6.2 Модель учета стока, основанная на закономерности спада зимних расходов и истощения стока.....	62
7.7 Гидрометрический учет стока рек в условиях зарастания русла.....	64
7.7.1 Факторы, определяющие пропускную способность зарастающего русла.....	64
7.7.2 Алгоритм учета стока с использованием выравнивания и интерполяции временных рядов относительных отклонений.....	66
7.7.3 Алгоритм учета стока в условиях зарастания русла с использованием интерполяционно-гидравлической модели.....	68
7.8 Линейная интерполяция между измеренными расходами воды по времени.	69

7.9 Интерполяция между измеренными расходами воды с учетом хода уровня воды.....	70
7.10 Срезка расходов воды, рассчитанных по данным подпорных уровней воды.....	70
8 Определение средних расходов воды за отчетный год.....	71
8.1 Общие положения.....	71
8.2 Помесячная обработка данных о расходах воды.....	72
8.3 Вычисление срочных расходов воды.....	72
8.4 Вычисление средних суточных расходов воды.....	73
8.5 Вычисление средних декадных расходов воды.....	74
8.6 Вычисление средних месячных расходов воды.....	75
8.7 Вычисление среднего годового расхода воды.....	75
9 Формирование «Пояснений» к таблице «Расходы воды».....	76
10 Гидрологический анализ сведений о стоке воды.....	77
Приложение А (обязательное) Алгоритмы аппроксимации зависимостей расходов и элементов руслового потока от уровней воды.....	87
Приложение Б (обязательное) Примеры экстраполяции расходов воды за пределы диапазона их измерений.....	98
Приложение В (обязательное) Пример оценки однозначности зависимости расходов от уровней воды.....	107
Приложение Г (обязательное) Пример расчета параметров годовых зависимостей расходов от уровней воды $Q(H)$	111
Приложение Д (обязательное) Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном состоянии русла при наличии однозначной годовой зависимости расходов от уровней воды.....	119
Приложение Е (обязательное) Пример аппроксимации многолетней зависимости расходов от уровней воды $Q(H)$	122
Приложение Ж (обязательное) Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном состоянии русла при наличии однозначной многолетней зависимости расходов от уровней воды.....	127
Приложение И (обязательное) Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном русле в условиях неустановившегося движения речного потока.....	130
Приложение К (обязательное) Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном состоянии русла в условиях переменного подпора.....	141
Приложение Л (обязательное) Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном состоянии русла в условиях русловых деформаций.....	148
Приложение М (рекомендованное) Примеры расчета ежедневных расходов воды в условиях ледообразования, ледостава и таяния льда.....	160
Приложение Н (обязательное) Пример расчета ежедневных расходов воды в условиях зарастания русла.....	178
Приложение П (обязательное) Пример расчета ежедневных расходов воды за весь год при различных условиях протекания потока.....	191
Приложение Р (обязательное) Пример анализа надежности гидрометрического учета стока воды на основе расчета русловых водных балансов для участка реки.....	215
Библиография.....	222

Введение

Настоящий руководящий документ подготовлен в связи с необходимостью переработки и дополнения положений нормативных и методических документов [1]–[4], регламентирующих порядок режимной обработки данных наблюдений за стоком воды при подготовке таблиц справочных изданий водного кадастра с учетом включения в новый документ усовершенствованных методов учета стока для различных условий протекания потока, ориентированных на автоматизацию выполнения расчетов на всех этапах обработки данных наблюдений и подготовки обобщенных характеристик расходов воды.

До настоящего времени вычисление ежедневных расходов осуществляется в соответствии с положениями наставления [1], опубликованного в 1958 г. и методических рекомендаций [2], подготовленных для автоматизированной обработки данных наблюдений за стоком воды. Усовершенствованные методы гидрометрического учета стока, разработанные в ГГИ после выхода указанных документов, не нашли отражения в действующих нормативных документах.

Настоящий руководящий документ наиболее полно включает в себя как традиционные, изложенные в [1] и [2], так современные разработки по усовершенствованию методов гидрометрического учета стока с учетом развития технологий автоматизированной обработки и обобщения данных гидрологических наблюдений.

Рассмотренные в руководящем документе методы вычисления ежедневных расходов воды реализованы в программной технологии «Речной сток», форматы входных и выходных данных в которой увязаны с технологией «Реки Режим».

По всем вопросам, связанным с применением настоящего руководящего документа, следует обращаться к разработчикам:

- в отдел гидрометрии и гидрологической сети (ОГГС) ФГБУ «ГГИ» (199053, г. Санкт-Петербург, В.О., 2-я линия, д. 23, тел. (812) 323-11-39, 433-93-32, e-mail: oggc@yandex.ru);

- в отдел информационных технологий первичной обработки гидрометеорологической информации (ОИТПОГИ) ФГБУ «ВНИИГМИ - МЦД» (249035, г. Обнинск, ул. Королева, д. 6, тел. (484) 397-49-54, (484) 397-46-52. e-mail: ashevchenko@meteo.ru, liv@meteo.ru).

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

ОБРАБОТКА И ОБЩЕНИЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СТОКОМ ВОДЫ НА РЕКАХ И КАНАЛАХ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПРАВОЧНЫХ ИЗДАНИЙ ВОДНОГО КАДАСТРА

Дата введения – 2022–02–01

1 Область применения

Настоящий руководящий документ содержит порядок обработки и обобщения данных наблюдений за стоком воды при подготовке таблицы «Расход воды» справочных изданий водного кадастра.

Настоящий руководящий документ предназначен для инженерно-технического персонала подразделений гидрологической сети Росгидромета (отделов гидрологии УГМС, ЦГМС, гидрологических станций, гидрометеорологических обсерваторий), разработчиков автоматизированных систем обработки гидрологических данных.

2 Нормативные ссылки

В настоящем руководящем документе использованы нормативные ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 19179–73 Гидрология суши. Термины и определения

МИ 1759–87 Государственная система обеспечения единства измерений. Расход воды на реках и каналах. Методика выполнения измерений методом «скорость-площадь»

РД 52.04.563–2013 Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями

РД 52.08.915–2021

РД 52.08.163–88 Дополнение к Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. 1. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках

РД 52.08.871–2017 Создание и ведение электронного технического паспорта речного гидрологического поста

РД 52.19.857–2016 Подготовка и занесение гидрологической информации по рекам и каналам на технический носитель

Р 52.08.872–2018 Оперативный учет стока на водотоках. Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды

П р и м е ч а н и е – При пользовании настоящим руководящим документом целесообразно проверять действие ссылочных нормативных документов:

- национальных стандартов - в информационной системе общего пользования - на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году;

- нормативных документов Росгидромета - по РД 52.18.5–2012 и дополнениям к нему - ежегодно издаваемым информационным указателям нормативных документов.

Если ссылочный нормативный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящим руководящим документом следует руководствоваться замененным (измененным) нормативным документом. Если ссылочный нормативный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и сокращения

3.1 В настоящем руководящем документе применены термины по ГОСТ 19179, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **гидрометрический учет речного стока:** Определение объемов воды, протекшей в створе гидрологического поста за отдельно взятые или календарные периоды времени (сутки, декада, месяц, год) по данным совокупностей непрерывных наблюдений за уровнем и эпизодических измерений расходов воды.

3.1.2 кривая расходов $Q(H)$: Графическое представление связи измеренных расходов Q и уровней воды H в конкретном гидрометрическом створе, которое используется для оценки пропускной способности русла и учета стока.

3.1.3 нуль поста: Условная горизонтальная плоскость сравнения, принимаемая за нуль отсчета при измерении уровня воды на гидрологическом посту.

3.1.4 оперативный учет стока воды: Гидрометрический учет стока (вычисление срочных и ежедневных значений расходов воды), осуществляемый в оперативно-прогностических подразделениях обработки гидрологических данных в реальном времени по данным об уровнях и расходах воды, поступающим по каналам связи, для текущей оценки водности рек и обеспечения задач оперативного гидрометеорологического обслуживания потребителей и гидрологического прогнозирования.

3.1.5 режимный учет стока воды: Гидрометрический учет стока воды, осуществляемый в режимных подразделениях обработки гидрологических данных по истечении расчетного периода по данным полных совокупностей наблюдаемых уровней и расходов воды.

3.1.6 погрешность результата измерения: Отклонение результата измерения от истинного или действительного (условно истинного) значения измеряемой величины.

3.1.7 расход воды: Объем воды, протекающий через живое сечение потока в единицу времени

3.1.8 сток воды¹⁾: Движение воды по поверхности земли, а также в толще почв и горных пород в процессе круговорота ее в природе.

3.2 В настоящем руководящем документе применены следующие сокращения:

- АГК – автоматизированный гидрологический комплекс;
- АКФ – автокорреляционная функция;
- ВК – водный кадастр;
- ВКР – временная кривая расходов;
- гидроствор – гидрометрический створ;
- ГП – гидрологический пост;
- ГРВ – средний годовой расход воды;

¹⁾ При расчетах характеристик водных ресурсов стоком воды называют количество воды, стекающее с водосбора реки за некоторый период времени – секунду, час, сутки, декаду, месяц, сезон, год.

- ДРВ – средние декадные расходы воды;
- ЕДС – ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши;
- ЕМДС – ежегодные и многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши;
- ЕРВ – ежедневные расходы воды;
- ЕУВ – ежедневные уровни воды;
- ИРВ – измеренные расходы воды;
- КР – кривая расходов;
- МКР – многолетняя кривая расходов;
- МНК – метод наименьших квадратов;
- МРВ – средние месячные расходы воды;
- ОГХ – обобщенные гидрологические характеристики;
- ПСР – пропускная способность русла;
- РВБ – русловой водный баланс;
- РЕКИ-РЕЖИМ – автоматизированная система обработки, накопления, обобщения и подготовки к распространению результатов наблюдений на сети гидрологических станций и постов Росгидромета, расположенных на реках и каналах;
- Росгидромет – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды;
- СВО – состояние водного объекта;
- СИ – средство измерения;
- СКО – среднее квадратическое отклонение;
- СУВ – самописец уровня воды;
- УГМС – управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды;
- УР – уравнение регрессии;
- УРМ – уравнение регрессии по многолетним данным;
- ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации - Мировой центр данных»;
- ФГБУ «ГГИ» – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт»;
- ЦГМС – центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

4 Общие положения

4.1 При определении характеристик водных ресурсов стоком воды называют количество воды, стекающее с данного участка суши (водосбора) за некоторый период времени – секунду, час, сутки, декаду, месяц, сезон, год. Характеристики стока воды определяются как секундные значения расходов воды, по которым рассчитываются осредненные и характерные (наибольшие и наименьшие) значения расходов воды за сутки, декаду, месяц, год, а также такие характеристики как объем, модуль и слой стока.

4.2 Таблица ежедневных (среднесуточных) расходов воды (ЕРВ) (далее – таблица ЕРВ) помещается в подразделе «Реки и каналы» справочников водного кадастра (ВК). В справочниках «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (далее – ЕДС) и «Ежегодные и многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (далее – ЕМДС) таблица ЕРВ помещается под названием «Таблица 1.3. Расход воды». Таблица ЕРВ содержит расходы воды в кубических метрах (литрах) в секунду, протекающих в гидрометрическом створе гидрологического поста за одну секунду. Подготовка таблиц выполняется в соответствии с требованиями [3]–[5].

4.3 Гидрологическое подразделение обязано вычислить сток воды по всем гидрологическим постам (ГП), на которых осуществляется учет стока воды и составить таблицу ЕРВ, используя все имеющиеся материалы, применяя любые наиболее подходящие способы и приемы вычислений, имея в виду получение наиболее точных величин стока за наиболее длительный период.

4.4 Опубликованию в справочниках ВК не подлежат таблицы ЕРВ, в которых обнаружены или подозреваются грубые неисправимые ошибки.

4.5 Если по какому-либо посту оказалось, что средние суточные значения расхода воды оцениваются как грубо приближенные, то подготовленная таблица ЕРВ не помещается в справочнике ВК, но обязательно сохраняется в архивах УГМС.

4.6 Вопрос о целесообразности публикации в справочниках ВК результатов гидрометрического учета стока в виде таблицы ЕРВ или сокращенных сведений о расходе воды решается редактором справочника ВК.

4.7 Таблицы ЕРВ, не подлежащие опубликованию в справочниках ВК, как не удовлетворяющие требованиям 4.3, обязательно должны сохраняться в архивах УГМС в электронном виде.

4.8 В справочниках ВК ЕДС сведения о расходах воды публикуются в таблицах по двум формам:

- А – для рек с устойчивым ледоставом;
- Б – для рек с отсутствием устойчивого ледостава.

4.9 Таблица ЕРВ содержит следующие сведения:

- значения среднего расхода воды за сутки, декаду, месяц;
- значения наибольшего и наименьшего расходов воды за месяц;
- значения среднего, наибольшего за год и наименьших расходов воды периода открытого русла, зимнего периода, за год, с указанием даты их наступления;
- значения среднего, наибольшего за год и наименьших расходов воды периода открытого русла, зимнего периода за многолетний однородный период, с указанием даты.

4.10 После окончания года таблицы ЕРВ должны быть тщательно проверены и проанализированы. После чего они могут быть использованы для пополнения таблиц обобщенных гидрологических характеристик (ОГХ) и оформлены для опубликования в составе справочников ВК или для хранения в архиве УГМС вместе с другими, не подлежащими опубликованию материалами наблюдений.

5 Гидрометрический учет стока воды

5.1 Варианты и расчетные характеристики гидрометрического учета стока

5.1.1 При определении характеристик водных ресурсов стоком воды называют количество воды, стекающее с данного участка суши (водосбора) за некоторый период времени – секунду, час, сутки, декаду, месяц, сезон, год. При подготовке таблиц справочников ВК должны быть определены следующие характеристики стока воды:

- срочные значения расходов воды;
- значения расходов воды, осредненные соответственно:
 - за сутки – ЕРВ;
 - за декаду – средние декадные расходы воды (ДРВ);
 - за месяц – средние месячные расходы воды (МРВ);
 - за год – средний годовой расход воды (ГРВ).

За периоды сутки, месяц, год, а также период открытого русла и зимний период определяются экстремальные (наименьший и наибольший) расходы воды. Расходы воды выражаются в литрах в секунду (л/с) или кубических метрах в секунду ($\text{м}^3/\text{с}$). Для годового периода времени определяются также такие характеристики, как объем стока воды в кубических километрах (км^3), модуль стока воды в литрах в секунду с квадратного километра ($\text{л}/(\text{с км}^2)$) и слой стока воды в миллиметрах (мм).

Измерения расходов воды в русловых гидрометрических створах (гидростворах) ГП проводятся лишь эпизодически. В этих условиях задача учета стока состоит в том, чтобы воспроизвести гидрограф стока как непрерывную функцию времени по результатам дискретных измерений расходов воды и непрерывных наблюдений за уровнем воды.

5.1.2 Учет стока воды осуществляется в двух вариантах:

- а) режимном – для определения водных ресурсов и изучения гидрологического режима рек;
- б) оперативном – для текущего контроля и прогноза водности рек при гидролого-прогностическом обслуживании народного хозяйства.

В том и другом случае сток воды вычисляется на основе гидрометрических данных о расходах и уровнях воды, но при использовании различных способов их интерпретации.

Режимные характеристики стока вычисляют по истечении года, имея в распоряжении всю годовую совокупность измеренных расходов и уровней воды, дополненную сведениями о состоянии реки и ее русла в течение всего годового цикла. При режимном учете стока специалист-гидролог располагает сведениями о состоянии пропускной способности русла реки на моменты измерений расходов воды и должен воспроизвести эти характеристики в интервалах между измерениями, т. е. в ретроспективном варианте выполнить их интерполяцию.

Оперативный учет стока ведется в условиях существенно меньшей определенности, связанной с необходимостью прогнозировать (экстраполировать) характеристики пропускной способности русла в промежутке времени от даты состоявшегося измерения до текущего момента времени.

Оба варианта учета стока должны опираться на единую объективную основу, учитывающую особенности изменения пропускной способности русла с тем, чтобы преодолеть разрыв между оперативными и режимными данными.

5.1.3 Основная расчетная характеристика гидрометрического учета стока – расход воды ставится в прямое соответствие к значению уровня воды. В большинстве случаев ежедневный расход воды ставится в соответствие среднему суточному значению уровня воды. В случае резких суточных колебаний водности реки вычисление средних суточных расходов воды производят как среднее взвешенное во времени из срочных значений расходов воды, вычисленных для моментов, когда измерялся уровень воды. Такой порядок вычисления средних суточных расходов воды необходимо применять при подсчете стока воды с малых водосборов, а также для водосборов рек с выраженным внутрисуточным ходом уровня воды, в частности, горных рек, режим которых характеризуется кратковременными быстро формирующимися паводками. Для надежного учета стока воды ГП, замыкающие такие водосборы обязательно должны быть оборудованы самописцами уровней воды или автоматизированными гидрологическими комплексами (АГК), выполняющими учащенные измерения уровней воды.

5.1.4 В зависимости от состояния русла и условий протекания потока в гидрометрическом створе функциональная связь расходов и уровней воды может быть однозначной или неоднозначной, поэтому не всегда одинаковым значениям уровней воды в таблице ежедневных уровней воды (ЕУВ) соответствуют одинаковые

значения расходов воды в таблице ЕРВ.

5.1.5 На основе ЕРВ вычисляются значения расходов воды, средние соответственно за каждую декаду, каждый месяц и календарный год с 1 января по 31 декабря. За каждые сутки определяют экстремальные (наибольшие и наименьшие) расходы воды, по которым определяются экстремальные (наибольшие и наименьшие) значения расходов воды за каждый месяц и фиксируются даты их прохождения.

5.1.6 Из экстремальных месячных значений расходов воды выбираются наибольшие и наименьшие в течение года расходы воды и фиксируются даты их прохождения.

5.1.7 Ежегодные данные о стоке воды в справочных изданиях ВК служат для определения статистических характеристик стока (норма, экстремальные и обеспеченные значения расходов воды и продолжительность их стояния в течение календарного года, гидрологического года и фаз гидрологического режима).

5.2 Задача и основные положения режимного учета стока

5.2.1 Задача режимного учета стока заключается в получении срочных и ежедневных значений расходов воды по данным ежедневных двусрочных или учащенных (многосрочных) наблюдений за уровнем воды и эпизодических измерений расходов воды, выполненных в течение расчетного года с учетом данных предшествующих лет. Согласно 5.1.2 режимные характеристики речного стока вычисляют по истечении года, когда специалист-гидролог имеет в распоряжении всю годовую совокупность измеренных расходов и уровней воды, дополненную сведениями о состоянии реки и ее русла в течение всего годового цикла.

5.2.2 В режимном варианте учета стока в качестве первого приближения к значению расхода воды при фиксированном уровне принимается значение расхода воды, полученное по осредняющей поле точек измеренных расходов воды (ИРВ) кривой расходов (КР) (зависимости расходов от уровней воды) $Q(H_t)$ для расчетного уровня воды H_t . Осредняющая зависимость $Q(H_t)$ должна быть получена для полной амплитуды уровня воды, наблюдавшейся в расчетном году по данным расходов воды, измеренных при свободном состоянии русла. КР или уравнение регрессии (УР) расходов от уровней воды отражают осредненные за исследуемый период характеристики пропускной способности русла. Значение расхода воды, полученное

по КР или УР принимается в качестве детерминированной характеристики пропускной способности русла для оценки значения расхода воды в первом приближении.

5.2.3 В общем случае значение расхода воды на дату (срок) t Q_{pt} , м³/с, вычисляется по формуле

$$Q_{pt} = Q(H_t)(1 + \tilde{q}_t), \quad (5.1)$$

где $Q(H_t)$ – значение расхода воды, полученное по КР для расчетного уровня H_t , м³/с;

\tilde{q}_t – поправка, учитывающая изменение пропускной способности русла (ПСП) на момент расчета t .

5.2.4 Отклонения измеренных расходов воды исходной совокупности ИРВ от КР, пример которой приведен на рисунке 5.1, оказываются обусловленными двумя причинами: случайными погрешностями измерения расходов воды и изменениями условий протекания потока под воздействием динамических и морфологических факторов, таких как ледовые явления зимой и зарастание в летнюю межень, деформации неустойчивого русла, переменный подпор от впадающих ниже притоков или размещенных в русле гидротехнических сооружений и т.п. Количественная оценка совокупного влияния этих факторов на изменение ПСП возможна лишь на основе совместного решения уравнения неустановившегося движения потока и уравнения деформации русла. На практике такое решение затруднено недостаточностью необходимых данных. Поэтому изменения ПСП, обусловленные неучтенными факторами, в алгоритмах учета стока воды рассматриваются как случайная функция времени и оцениваются с использованием статистических методов [6].

В качестве характеристик изменения ПСП во времени используются относительные отклонения ИРВ \tilde{q}_i от осредняющей зависимости $Q(H)$, которые вычисляются по формуле

$$\tilde{q}_i = \frac{Q_i - Q(H_i)}{Q(H_i)}, \quad (5.2)$$

где Q_i – ИРВ, м³/с;

$Q(H_i)$ – расход воды, полученный по КР $Q(H)$ для уровня H_i , зафиксированного во время измерения расхода воды Q_i , м³/с.

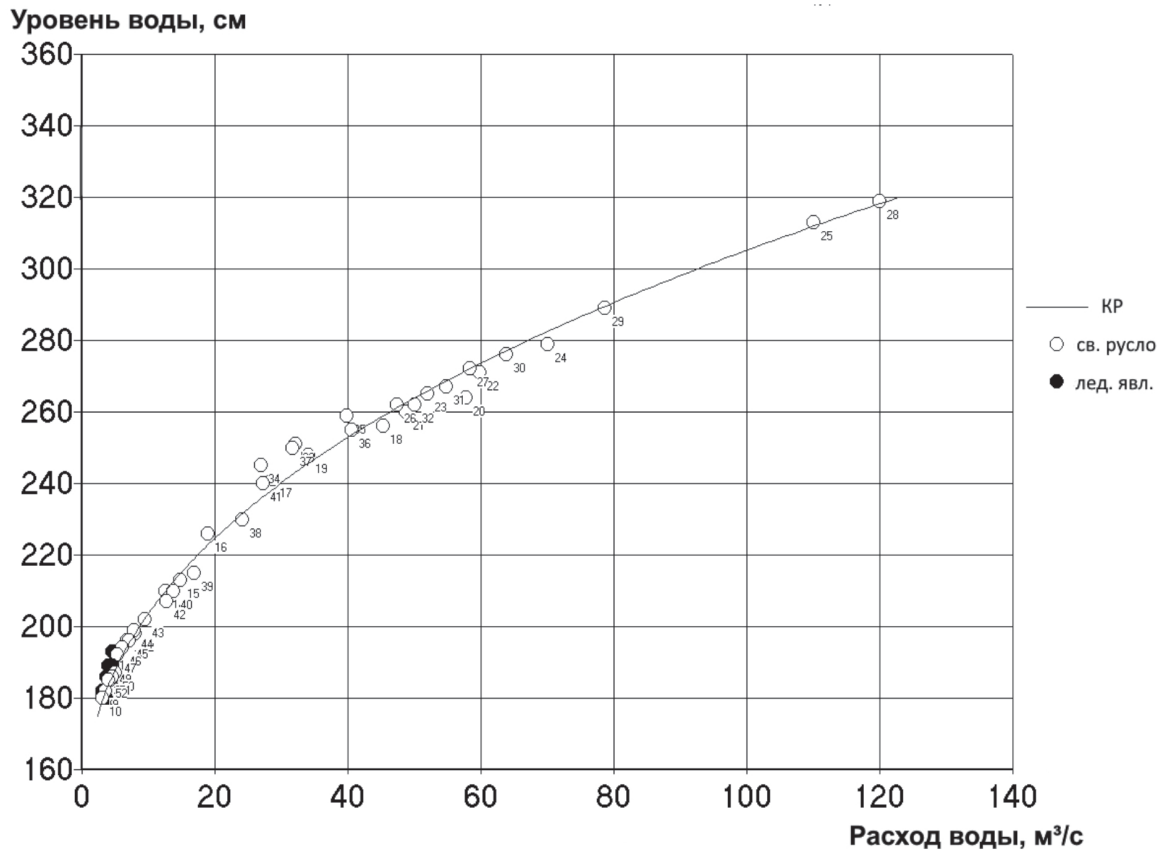


Рисунок 5.1 – Зависимость расходов от уровней воды, р. Теберда – г. Теберда, 1993 год

5.2.5 Модели учета стока, основанные на таком подходе, формально связаны с методом Стаута, но отличаются от него последовательной гидравлико-статистической основой. Так, в качестве главной характеристики пропускной способности русла вместо априорной стандартной кривой Стаута, которая может располагаться вне поля точек ИРВ, принимается КР, осредняющая поле точек измеренных расходов воды и аппроксимированная уравнением регрессии расходов по уровням воды. Вместо поправок к уровням воды H , как в способе Стаута, используется более информативная величина – поправки к расходам, а точнее их относительные значения \tilde{q} . Преимущество перехода к относительным значениям отклонений \tilde{q} заключается в том, что удастся получить приблизительно постоянное значение дисперсии \tilde{q} в пределах всей амплитуды изменения уровня воды, в то время как дисперсия абсолютных значений q ($q = Q_i - Q(H_i)$) увеличивается с ростом уровня. Последнее объясняется мультипликативным характером погрешности измерения расхода воды, а именно: погрешность измерения расхода воды пропорциональна значению измеренного расхода.

Анализ рядов относительных отклонений \tilde{q} позволяет проследить за характером изменения пропускной способности русла в различные фазы водного режима, выявить периоды, в течение которых имеют место систематические отклонения ИРВ в одну или другую сторону от осредняющей кривой. На рисунке 5.2 представлен хронологический ход относительных отклонений ИРВ от КР, представленной на рисунке 5.1, который отражает изменения ПСР в гидрометрическом створе ГП р. Теберда – г. Теберда в 1993 году. Так, в период с 1 января по 2 марта относительные отклонения ИРВ от КР имеют преимущественно отрицательный знак, что свидетельствует о снижении ПСР под влиянием ледовых явлений на реке. В период с 3 марта по 11 августа относительные отклонения ИРВ от КР близки к нулевым значениям и равномерной полосой в пределах от минус 0,1 до 0,1 располагаются относительно нулевой ординаты. Это свидетельствует о том, что в этот период КР однозначна и при расчете расходов воды по формуле (5.1) значение \tilde{q}_t должны приниматься, равными «0» (нулю). Анализ хода относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ показывает, что в период с 12 августа по 17 декабря ПСР находится под влиянием факторов (деформаций русла, ледовых явлений), обуславливающих неоднозначность КР в этот период. В период с 18 по 31 декабря \tilde{q}_t вновь находятся в пределах диапазона от минус 0,1 до 0,1, что свидетельствует об однозначности КР в этот период. Подробный анализ факторов, приводящих к нарушению однозначной зависимости расходов от уровней воды $Q(H)$ рассмотрен в 7.2.

5.2.4 Вычисление расходов воды при подготовке таблиц справочников ВК допускается выполнять традиционным способом с использованием переходных коэффициентов $K_{\text{пер}}$ по формуле

$$Q_{p_t} = K_{\text{пер}_t} Q(H_t). \quad (5.3)$$

В этом случае учет изменения ПСР во времени осуществляется с использованием переходных коэффициентов: в зимний и переходные периоды – $K_{\text{зим}}$; при зарастании – $K_{\text{зар}}$; в периоды подпора – $K_{\text{пп}}$. Переходные коэффициенты на моменты измерения расходов воды определяются по формуле

$$K_{\text{пер}} = \frac{Q_{\text{и}}}{Q(H_{\text{и}})}. \quad (5.4)$$

Ряд 2 на рисунке 5.2 представляет собой хронологический график переходных коэффициентов. Видно, что ход $K_{пер}(t)$ повторяет ход $\tilde{q}(t)$ с разницей по оси ординат на единицу.

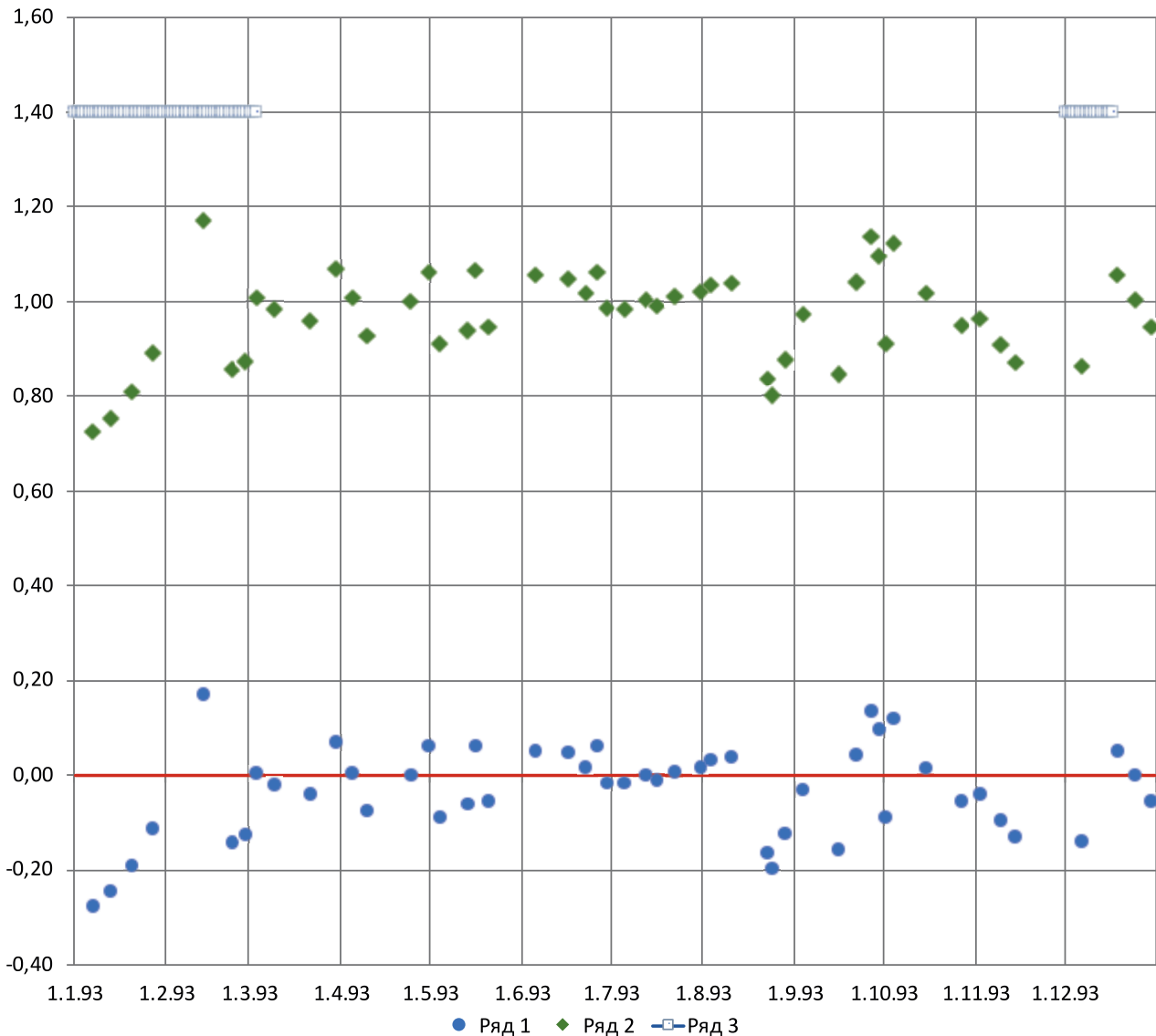


Рисунок 5.2 – Хронологический график относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ ИРВ от КР (Ряд 1), переходных коэффициентов $K_{пер}(t)$ (Ряд 2) и СВО (Ряд 3)

5.2.5 Переходные коэффициенты связаны с относительными отклонениями \tilde{q} , которые определяются по формуле (5.2), очевидным соотношением

$$\tilde{q}_t = K_{перt} - 1. \quad (5.5)$$

При однозначной зависимости $Q(H)$ значения \tilde{q}_t в формуле (5.1) равны «0» (нулю), а значения $K_{перt}$ в формуле (5.3) – «1» (единице).

Преимущество использования для анализа изменения ПСР относительных отклонений ИРВ от КР по сравнению с переходными коэффициентами заключается в следующем:

- характеристики ПСР, представленные временным рядом относительных отклонений $\tilde{q}(t)$, выражены относительными значениями и совокупно отражают погрешности измерения расходов воды и факторы, определяющие нарушение однозначности КР, и поэтому могут быть основой при оценке однозначности КР.

- для анализа и расчета характеристик ПСР при использовании временных рядов $\tilde{q}(t)$ применимы различные методы интерполяции и экстраполяции случайных временных рядов.

5.3 Построение и анализ комплексного графика гидрометеорологических характеристик. Выделение фазово-однородных периодов водного режима

5.3.1 Пропускная способность русла определяется многочисленными факторами, которые следует учитывать при выборе способа учета стока. К ним относятся:

- нестационарность движения воды (волны попусков, паводочные петли);
- переменный подпор;
- неустойчивость русла (периодические деформации, обусловленные фазовыми переформированиями русла; многократные сезонные переформирования русла; блуждание русла).
- ледяные образования и степень их развития;
- зарастание русла.

5.3.2 Для правильного выбора и применения метода вычисления стока воды необходимо предварительно собрать и проанализировать все имеющиеся данные наблюдений, сведения об условиях, влияющих на режим потока на участке ГП, а также материалы учета стока за прошлые годы.

5.3.3 С этой же целью строится и анализируется комплексный график результатов гидрометеорологических наблюдений (далее – комплексный график), представленный на рисунке 5.3. На комплексный график наносятся совмещенные хронологические графики метеорологических и гидрологических характеристик, полученные по данным наблюдений и измерений в расчетном гидрометрическом створе; температура воды и воздуха, осадки, толщина льда, высота снега на льду, уровни воды, измеренные расходы и мутность воды.

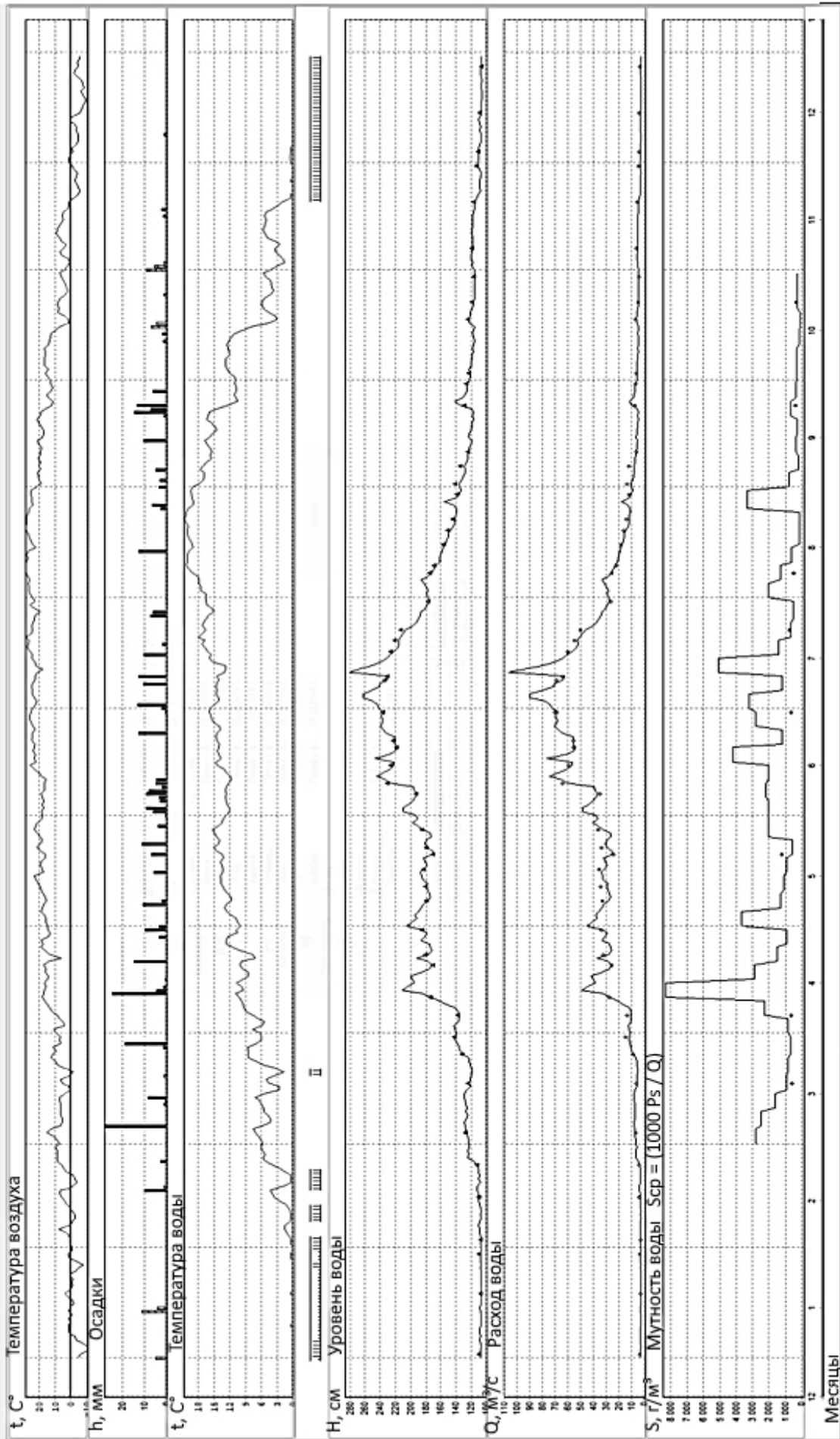


Рисунок 5.3 – Комплексный график результатов гидрометеорологических наблюдений за 2016 г.
(ГП р. Казикумухское Койсу – с. Гергебиль)

5.3.4 При анализе и отборе данных наблюдений, используемых для вычисления стока, необходимо учитывать вид и тип применявшихся приборов, метод измерения, общие условия участка ГП и условия каждого конкретного измерения, которые могли повлиять на его точность. Особое внимание следует обращать на условия, которые могут вызывать систематические односторонние погрешности при измерениях расходов воды, обусловленные неполным или неправильным учетом стока через пойму, рукава, протоки. Причинами систематических погрешностей измерения могут быть также наличие косоструйности потока в гидрометрическом створе или недоучет отнота промерного троса при высоком его подвешивании относительно поверхности воды.

5.3.5 При выборе способа учета стока необходимо проанализировать условия, определяющие режим уровней воды в гидрометрическом створе, который формируется под влиянием естественных и искусственных факторов, таких как:

а) колебания уровней воды притоков, впадающих ниже гидрометрического створа (гидроствора), или уровней водоприемника (реки, озера, моря);

б) временные стеснения русла реки льдом (заторы, зажоры) или сплавляемой древесиной (запаны, заломы);

в) зарастание русла;

г) подпор от плотин, расположенных ниже по течению.

На комплексном графике на основе анализа гидрометеорологических факторов необходимо выделить периоды с наличием кратковременных подпоров, вызывающих подъемы уровня без значительного изменения водности реки. Для этих периодов выполняется срезка расходов воды, вычисленных по фактически измеренным в период подпора уровням воды. Для выявления периодов, в течение которых необходимо выполнять срезку расходов воды, в ходе анализа комплексного графика рекомендуется привлекать аналогичные графики, построенные для смежных гидрологических постов, расположенных в русле реки выше и ниже по течению.

5.3.6 При учете стока в режимном варианте внутри годового цикла обычно выделяется несколько периодов с различными условиями протекания потока в русле, для которых должны использоваться различные способы подсчета стока.

Границы этих периодов определяются возникновением и исчезновением сезонных явлений, влияющих на режим потока (ледовые явления, зарастание, регулирование стока искусственными сооружениями, подпор от водоприемника или впадающего ниже гидроствора притока и пр.).

5.3.7 На основе анализа комплексного графика гидрометеорологических

характеристик необходимо предварительно выделить фазово-однородные периоды:

- зимний период при наличии в русле ледовых образований с выделением периода устойчивого ледостава и переходных осенне-зимнего и весенне-летнего периодов;

- период зарастания русла;

- период свободного ото льда и растительности русла;

- периоды подпора и другое.

В дальнейшем границы фазово-однородных периодов уточняются по материалам анализа зависимости расходов от уровней воды $Q(H)$ и графиков относительных отклонений измеренных расходов воды от связи $Q(H)$. От правильной оценки факторов, оказавших влияние на изменение пропускной способности русла в различные периоды расчетного года, зависит выбор метода учета стока. Выбранная методика учета стока должна обеспечивать наиболее полное, а, вместе с тем, и наиболее простое использование данных наблюдений для вычисления характеристик стока с наименьшими погрешностями.

5.4 Аппроксимация зависимости расходов воды и элементов руслового потока от уровней воды

5.4.1 Гидравлические и геометрические элементы руслового потока в конечном счете зависят от положения уровня воды H . Поэтому в гидрометрии принято использовать зависимость расходов Q от уровней воды H , в аналитической форме $Q = f(H)$ или в виде так называемой кривой расходов (КР). Хотя с точки зрения физики процесса независимой переменной в этой связи является расход воды, обратную зависимость $Q(H)$ удобно использовать потому, что измерения уровней воды менее трудоемки и выполняются на ГП ежедневно в стандартные сроки или, при использовании самописцев или АГК, – непрерывно, в то время как измерения расходов воды производятся лишь эпизодически – в отдельные моменты времени. Зависимость расходов от уровней воды, построенная графически или полученная аналитически, является основной и важнейшей гидрометрической характеристикой пропускной способности русла для каждого конкретного гидрометрического свора.

5.4.2 Для анализа исходных данных и выбора метода учета стока по совокупности данных измеренных расходов воды строятся зависимости расходов воды $Q(H)$ – КР, и его элементов: площади живого сечения $\omega(H)$ и средней скорости потока $V(H)$, от уровня воды. С этой целью используются данные таблиц

«Измеренные расходы воды». Кроме того, для анализа характера связи $Q(H)$ привлекаются сведения об измерениях расхода воды и наблюдаемых при этом уровнях, помещаемых в книжках КГ-3М, в которых содержатся также данные о состоянии русла и влияющих на изменения его пропускной способности факторах. В исходную совокупность следует включать все данные, полученные при свободном состоянии русла, при отсутствии зарастания, переменного подпора и прочих влияющих на изменение пропускной способности русла факторов, в том числе следующие ряды данных:

- измеренные расходы воды Q_i ;
- наблюдаемые при измерениях расходов воды уровни H_i ;
- зафиксированные при измерениях площади живого сечения ω_i ;
- средние скорости течения в гидростворе во время измерений расходов воды V_i .

5.4.3 Различают однозначные и неоднозначные зависимости расходов от уровней воды. Понятие однозначности связи $Q(H)$ и методика ее оценки изложены в 5.7. В общем случае зависимость $Q(H)$ не может считаться однозначной. Следует исходить именно из этой предпосылки с тем, чтобы исследовать факторы, нарушающие однозначность связи $Q(H)$, и обосновать, с одной стороны, наиболее эффективные методы учета стока, с другой – требования к точности измерений расходов воды.

Однозначная зависимость $Q(H)$ наблюдается в гидростворах с устойчивыми руслами при равномерном движении потока. В некоторых гидростворах она может сохраняться в течение нескольких лет (трех и более). В этом случае ее принято называть многолетней.

5.4.4 В графическом варианте однозначная связь расходов и уровней воды представляется кривой в поле точек (Q, H) , которая строится на миллиметровке (проводится на глаз посередине полосы рассеивания точек) [1], [7]. Такой способ представления зависимости $Q(H)$ при современном развитии вычислительных методов не может быть рекомендован. Вопросы аналитической интерпретации гидрометрических данных к настоящему времени достаточно разработаны. Ниже излагаются основные методы, рекомендуемые для аналитической аппроксимации зависимости расходов от уровней воды, равно как и для аналитического представления зависимостей от уровня площади живого сечения $\omega(H)$, ширины $B(H)$, средней глубины $h(H)$ и средней скорости потока $V(H)$.

5.4.5 При аналитической аппроксимации зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$ их

качество оценивается значениями:

а) среднего квадратического стандарта рассеяния связи (среднее квадратическое значение абсолютных остатков регрессии) σ_p [8]:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_1^n [Y_{ni} - Y(H_{ni})]^2}{n - k}}, \quad (5.6)$$

где Y_{ni} – измеренная характеристика, для которой подбирается аналитическое УР;

$Y_{ni}(H_{ni})$ – характеристика, вычисленная по УР для наблюдаемого при измерении уровня H_{ni} ;

n – количество ИРВ;

k – число степеней свободы подбираемого уравнения;

б) выборочного множественного коэффициента корреляции, который определяется как коэффициент между Y_{ni} и $Y_{ni}(H_{ni})$, т. е.

$$R = \frac{\sum_1^n (Y_{ni} - \bar{Y}_{ni}) \cdot [Y_{ni}(H_{ni}) - \bar{Y}_{ni}(H_{ni})]}{\{\sum_1^n (Y_{ni} - \bar{Y}_{ni})^2 \cdot \sum_1^n [Y_{ni}(H_{ni}) - \bar{Y}_{ni}(H_{ni})]^2\}^{1/2}}, \quad (5.7)$$

где $\bar{Y}_{ni} = \frac{\sum_1^n Y_{ni}}{n}$ – среднее значение ряда измеренных характеристик;

$\bar{Y}_{ni}(H_{ni}) = \frac{\sum_1^n Y_{ni}(H_{ni})}{n}$ – среднее значение ряда характеристик, вычисленных по УР для наблюдаемых при измерении уровней H_{ni} ;

в) среднего квадратического значения относительных остатков регрессии $\sigma_{\tilde{q}}$;

г) оценки математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\tilde{q}}$.

Относительные остатки регрессии \tilde{y} вычисляются по формуле

$$\tilde{y} = \frac{Y_{ni} - Y(H_{ni})}{Y(H_{ni})}. \quad (5.8)$$

Для зависимости $Q(H)$ относительные остатки регрессии являются относительными отклонениями расходов воды от аппроксимирующей зависимости $Q(H)$, которые определяются по формуле (5.2).

5.4.6 Для аппроксимации связи $Q(H)$ применяются представленные ниже зависимости, из которых выбирается наиболее эффективная (оптимальная).

5.4.6.1 Аппроксимация зависимости $Q(H)$ параболой Глушкова

$$Q(H) = a(H - H_0)^b, \quad (5.9)$$

где Q – расход воды, м³/с;

H – уровень воды над «нулем» поста, м;

H_0 – уровень, при котором расход воды в исследуемом гидростворе равен нулю, м;

a и b – параметры УР в виде параболы Глушкова (5.9), определяемые по данным измерений.

Аппроксимация зависимости $Q(H)$ параболой Глушкова рекомендована Руководством по гидрологической практике ВМО [9], однако, она не всегда пригодна для аппроксимации КР во всем диапазоне изменения уровня воды.

5.4.6.2 Аппроксимация методом полиномиальной регрессии

$$Q = a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_mH^m, \quad (5.10)$$

где a_0, \dots, a_m – параметры УР расходов по уровням воды в форме полинома (5.10).

5.4.6.3 Аппроксимация методом полиномиальной регрессии с введением ограничений в экстремальных точках амплитуды уровня воды или выполнение кусочно-полиномиальной аппроксимации. В этом случае аппроксимирующее уравнение принимает вид

$$Q(H) = Q(H_{гр}) + (H - H_{гр})(a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_mH^m), \quad (5.11)$$

где $H_{гр}$ – уровень воды, для которого задается ограничение на значение аппроксимирующей функции, м.

Ограничения могут быть заданы в нижней или верхней части кривой. При кусочно-полиномиальной аппроксимации ограничения задаются на границах отрезков кривой расходов, для которых подбираются различные уравнения аппроксимации. Так, для сложных форм русла, для которых характерно изменение крутизны берегов при повышении уровня воды, в том числе при выходе воды на пойму, что обуславливает изменение угла наклона кривой расходов к осям Q и H , бывает сложно выполнить аппроксимацию кривой расходов одним уравнением во всем диапазоне изменения уровня воды. В этом случае рекомендуется выполнять кусочно-полиномиальную аппроксимацию.

5.4.7 В качестве наилучшей (оптимальной) выбирается аппроксимирующая зависимость, имеющая следующие характеристики качества аппроксимации:

- среднее значение (оценка математического ожидания) относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}}$ должно быть близко к нулю, что свидетельствует об отсутствии систематической составляющей в совокупности отклонений ИРВ от линии (поверхности) регрессии;
- абсолютные σ_q и относительные $\sigma_{\bar{q}}$ средние квадратические значения остатков регрессии должны быть наименьшими по сравнению с другими алгоритмами аппроксимации;
- выборочный множественный коэффициент корреляции должен быть наибольшим.

5.4.8 Для аппроксимации зависимостей $\omega(H)$, $B(H)$, $h(H)$ и $V(H)$ используются те же алгоритмы, что и для $Q(H)$. Их подробное описание представлено в приложении А.

5.5 Контроль надежности исходных данных, исключение грубых погрешностей измерения расходов воды и аппроксимация зависимости расходов от уровней воды в диапазоне измеренных расходов воды

5.5.1 Аппроксимация связи $Q(H)$ первоначально выполняется по всей совокупности ИРВ, измеренных при свободном состоянии русла. После получения статистических оценок рассеяния связи $Q(H)$ необходимо проанализировать ряд исходных данных для выявления грубых погрешностей измерения и промахов. Для этого выделяются точки ИРВ, наиболее отклонившиеся от осредняющей связи $Q(H)$. Если наибольшее отклонение ИРВ от связи $Q(H)$ лежит в пределах доверительного интервала полосы рассеяния связи, т. е. с вероятностью не превышения $P = 90 \%$, что справедливо при любом законе распределения случайных величин [10]

$$\frac{Q_n - Q(H_n)}{Q(H_n)} \leq 2\sigma_{\bar{q}}, \quad (5.12)$$

то результаты измерения должны быть признаны достоверными и приняты для расчета годового УР. В противном случае, необходимо установить причину значительного отклонения ИРВ от осредняющей связи $Q(H)$: является ли оно результатом нарушения методики и правил измерения или следствием объективных изменений условий протекания потока в гидростворе.

5.5.2 С этой целью полезно:

- проверить правильность вычисления средних скоростей и глубин потока;
- убедиться в близости уровня воды в день измерения расхода уровню того же дня по таблице ЕУВ;
- сопоставить записи о состоянии реки при измерении расхода воды с теми же данными в таблице ЕУВ.

5.5.3 Важно выяснить, учтен ли при измерении полный расход воды или только его часть (без расходов в пойме и протоках).

5.5.4 Подобный анализ целесообразно выполнять также и для элементов расхода воды – площади живого сечения (ω) и средней скорости потока (V). Если отношение (5.12) превышает значение $3\sigma_{\bar{q}}$, и нет сведений о произошедших существенных изменениях пропускной способности русла, проверяемый расход сразу должен быть отброшен, как измеренный с грубой погрешностью.

5.5.5 Причина значительного отклонения ИРВ от осредняющей зависимости может быть и в грубой погрешности определения уровня воды. При выполнении анализа надежности уроченных наблюдений должен быть выполнен контроль принятых приводок нулей уроченмерных устройств и моментов их изменения, и, при необходимости, произведена корректировка данных.

5.5.6 В ходе оценки надежности уроченных наблюдений устанавливается соответствие хода уровня воды на данном посту и соседних постах, расположенных на одной реке или ее притоках. С этой целью анализируются хронологические графики $H(t)$, на которые наносятся уровни при измерениях расходов воды. Несоответствие данных в отдельные периоды позволяет выявить систематические или грубые погрешности наблюдений. При обнаружении такого несоответствия может потребоваться дополнительная проверка исходной информации. Если установлена причина систематических погрешностей измерения уровней воды, исходные данные должны быть откорректированы. Для этого могут быть использованы связи соответственных уровней воды на смежных гидрологических постах. Корректировка выполняется, если отклонение измеренного уровня воды от осредненной связи выходит за пределы доверительного интервала:

$$\Delta H_{и} > 2\sigma_{и}, \quad (5.13)$$

где $\Delta H_{и}$ – отклонение измеренного уровня воды от осредненной связи соответственных уровней воды, м;

σ_H – стандарт рассеяния связи соответственных уровней воды.

Критерий (5.13) применим при условии, что режим уровней смежных постов не искажается факторами, меняющимися во времени: деформациями русла, переменным подпором, попусками из водохранилищ.

5.5.7 В результате такого анализа и контроля надежности данных (при достоверности уровней, к которым отнесены ИРВ) из исходной совокупности должны быть исключены расходы воды, не удовлетворяющие условию (5.12), как величины, полученные с погрешностями.

5.5.8 После этой процедуры аппроксимация связи $Q(H)$ осуществляется уже ранее выбранным методом, но по откорректированной совокупности исходных данных.

5.6 Экстраполяция расходов воды за пределы диапазона их измерения

5.6.1 Иногда по различным объективным причинам не удается измерить расходы воды, особенно при высоких уровнях паводков и половодий. Измерения расходов в таких условиях бывают затруднены из-за ограниченности технических возможностей, а также из-за кратковременности периода прохождения пика паводка. Определенные трудности могут возникать и при измерении минимальных расходов воды.

5.6.2 Принято считать зависимость $Q(H)$ надежной, если она обоснована измерениями расходов при 80 % и более амплитуды уровня воды. В части амплитуды, не обоснованной измерениями, необходимо выполнять экстраполяцию зависимостей расходов от уровней воды. Совершенно недопустимо экстраполировать кривые расходов «по тенденции» или использовать уравнение аппроксимирующей зависимости $Q(H)$ для вычисления расходов воды при уровнях, выходящих за пределы диапазона, освещенного измерениями. Такой формальный подход может привести к недопустимым погрешностям определения экстраполированных значений расходов воды и даже к абсурдным результатам, например – отрицательным расходам воды при низких уровнях. Для оценки пропускной способности русла при отсутствии измерений прежде всего следует опираться на гидравлические закономерности, поэтому вместо экстраполяции кривых $Q(H)$ следует говорить об экстраполяции расходов воды за пределами диапазона их измерений.

5.6.3 Экстраполяция расходов воды за пределы диапазона их измерения должна опираться на надежно определенные геометрические и морфометрические характеристики русла и прирусловых форм на участке гидрометрического створа. С этой целью выполняется нивелировка морфометрического створа до положения высших наблюдаемых уровней воды. По данным нивелировки вычерчивается профиль поперечного сечения морфоствора и определяются основные геометрические характеристики русла и прирусловых форм в поперечном сечении: площадь поперечного сечения ω , средняя глубина h и ширина потока B при различных положениях уровня воды. По полученным данным строятся зависимости элементов поперечного сечения от уровня воды: $\omega = f(H)$, $h = f(H)$, $B = f(H)$, и выполняется аппроксимация этих зависимостей с использованием алгоритмов, описанных в приложении А.

5.6.4 Существуют два вида гидравлических зависимостей, которые рекомендуется использовать для экстраполяции расходов воды:

- 1) формулы для квазиравномерного движения потока;
- 2) выражения, представляющие собой интегралы уравнений неустановившегося движения воды, например, Сен-Венана [6].

5.6.5 Основной зависимостью первой группы служит формула Шези

$$Q = \omega C \sqrt{R I}, \quad (5.14)$$

$$V = C \sqrt{R I}, \quad (5.15)$$

где C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус, равный средней глубине h для речных русел;

I – уклон водной поверхности.

Коэффициент Шези C рассматривается не только как функция гидравлического радиуса R (средней глубины h для речных русел) и коэффициента шероховатости n_0 , но и относительной ширины русла, определяемой по формуле

$$\tilde{b} = \frac{B}{h}, \quad (5.16)$$

где B – ширина русла.

Для нешироких русел ($\tilde{b} < 30$) коэффициент Шези C определяется по формуле

$$C = \frac{h^{1/6}}{n_0}, \quad (5.17)$$

где n_0 – коэффициент шероховатости, который определяется по известным таблицам шероховатостей [10].

Для достаточно широких русел ($\tilde{b} > 30$) рекомендуется использовать формулу, предложенную И. Ф. Карасевым [6]

$$C = \left[1 + \frac{66,7\varphi h^{1/3}}{g(B/h)n_0^2} \right]^{-0,5} \cdot \frac{h^{1/6}}{n_0}. \quad (5.18)$$

5.6.6 Условиям естественных паводков и половодий, кроме уравнения Сен-Венана, отвечают более простые зависимости, полученные для так называемых кинематических волн – одного из видов неустановившегося движения при больших силах трения. При отсутствии измеренных уклонов поверхности воды рекомендуется использовать формулу, полученную в результате интегрирования уравнения кинематической волны

$$Q_3 = Q_i (\omega_3 / \omega_i)^{m_i}, \quad (5.19)$$

где Q_3 – расход в любой фазе водного режима за пределами диапазона измерений, который следует определить, м³/с;

Q_i – расход воды, вычисленный по УР $Q(H)$ в пределах диапазона измерений, м³/с;

ω_i – площадь живого сечения потока, соответствующая Q_i и рассчитанная на основе поперечного профиля гидроствора или по уравнению зависимости $\omega(H)$, м²;

ω_3 – площадь живого сечения, соответствующая Q_3 , м².

Параметр m_i вычисляется по формуле

$$m_i = \frac{\lg Q_i - \lg Q_{i-1}}{\lg \omega_i - \lg \omega_{i-1}}, \quad (5.20)$$

где Q_i и Q_{i-1} – смежные во времени на фазе подъема в верхнем диапазоне уровней или фазе спада в нижнем диапазоне уровней значения расходов воды, но не измеренные, а вычисленные по УР для значений уровней воды, наблюдавшихся при измерении, м³/с;

ω_i и ω_{i-1} – соответствующие расходам Q_i и Q_{i-1} значения площадей живого сечения, полученные по зависимости $\omega(H)$, м².

Расчет по формуле (5.20) будет корректен при условии, что расходы Q_i и Q_{i-1} не слишком близки между собой – относительное значение их разности должно существенно превышать относительную погрешность измерения расходов воды и составлять не менее 20 %.

Параметр m_i рекомендуется определять для нескольких пар расходов воды в пределах одной фазы водного режима и принимать осредненное в ее пределах значение. Экстраполируемый расход определяется по формуле (5.19). Средняя скорость течения в этом случае за пределами диапазона измерения расходов воды вычисляется по формуле

$$V_э = Q_э/\omega_э. \quad (5.21)$$

5.6.7 Для оценки пропускной способности устойчивых русел за пределами диапазона измерений расчетного года можно использовать также данные ИРВ прошлых лет, если таковые имеются. При этом следует придерживаться следующих рекомендаций. Один или несколько расходов предшествующих лет $Q_{пл}$, измеренных в диапазоне, где необходимо выполнить экстраполяцию, принимаются в расчет, если их расхождение с соответствующими расходами, вычисленными по формуле (5.19) с вероятностью не превышения $P = 90$ % не выходят за пределы доверительного интервала рассеяния аппроксимирующей зависимости $Q(H)$

$$(Q_{пл} - Q_э)/Q_{ср} \leq 2\sigma_Q, \quad (5.22)$$

где $Q_{ср}$ – среднее значений $Q_{пл}$ и $Q_э$, м³/с.

5.6.8 Процедура экстраполяции зависимости $Q(H)$ состоит в следующем.

Исходная совокупность ИРВ расчетного года дополняется расходами, вычисленными по формуле (5.14 и (или) 5.19) и, при возможности, данными прошлых лет. Затем для определения параметров нового УР зависимости $Q(H)$, которое будет использовано для расчета расходов воды за пределами диапазона, освещенного измерениями расходов воды, выполняется аппроксимация зависимости методом кусочно-полиномиальной регрессии.

5.6.9 Приведенный метод экстраполяции связи $Q(H)$ может быть использован как в верхней, так и в нижней частях диапазона изменения уровней и расходов воды.

Следует обратить внимание на то, что при экстраполяции зависимости $Q(H)$ вниз использование данных ИРВ прошлых лет менее обосновано. Это объясняется тем, что деформации меженного русла даже относительно устойчивых рек оказывают более существенное влияние на его пропускную способность, чем при среднем и наибольшем наполнениях.

5.6.10 Экстраполяция многолетней зависимости $Q(H)$ вверх не должна превышать 15 %, а вниз 5 % от полной амплитуды уровней за прошлые годы, установленной по меткам высоких вод или каким-либо другим способом. Для годовой зависимости $Q(H)$ экстраполяция вверх не должна превышать 20 %, а вниз 10 % от полной амплитуды уровней расчетного года.

Пример экстраполяции расходов воды за пределы диапазона их измерения с использованием формул (5.19) и (5.20) приведен в приложении Б.

5.7 Оценка однозначности зависимости расходов от уровней воды и выбор методов учета стока по фазам водного режима

5.7.1 В общем случае КР или УР расходов от уровней воды отражают осредненные за исследуемый период характеристики пропускной способности русла и не может считаться однозначной. Отклонения измеренных расходов воды от УР, аппроксимирующего КР, отражают совокупное влияние факторов, которые непосредственно не учтены в нем, хотя они могут быть связаны с изменениями пропускной способности русла. Оценка однозначности зависимости расходов от уровней воды $Q(H)$ устанавливается на основе критериального соотношения относительных значений среднего квадратического рассеяния зависимости $Q(H)$ и случайной погрешности измерения расхода воды.

5.7.2 Для оценки однозначности зависимости $Q(H)$ рекомендуется использовать отношение дисперсий Фишера (далее – критерий Фишера) [11]. Связь $Q(H)$ признается однозначной, если

$$F = \frac{D_{\tilde{q}}}{\sigma_{\text{и}}^2} \leq F_{\text{кр}}, \quad (5.23)$$

где $D_{\tilde{q}}$ – дисперсия относительных отклонений \tilde{q} ;

$\sigma_{\text{и}}$ – среднеквадратическое значение относительной погрешности ИРВ;

$F_{кр}$ – критическое значение распределения Фишера при заданном уровне значимости (5 %) и соответствующем числе измерений.

Величина $D_{\bar{q}}$ определяется по результатам оценки рассеяния связи $Q(H)$

$$D_{\bar{q}} = \sigma_{\bar{q}}^2 = \frac{1}{n-k} \sum_1^n \left[\frac{Q_{ni} - Q(H_{ni})}{Q(H_{ni})} \right]^2, \quad (5.24)$$

где n – количество ИРВ;

k – число степеней свободы выбранного УР.

5.7.3 Погрешность этой оценки в значительной степени зависит от объема исходной выборки. Относительное значение погрешности измерения расхода воды $\sigma_{\bar{q}}$ определяется методом частных погрешностей. Для такой оценки к настоящему времени накоплено большое количество материалов, относящихся к различным фазам водного режима и разным условиям протекания потока. Поэтому можно считать, что дисперсия $\sigma_{\bar{q}}^2$ оценивается достаточно надежно в статистическом смысле, т. е. близка к значению дисперсии генеральной совокупности. Следовательно, при выборе критерияльных значений распределения Фишера допустимо принимать число степеней свободы, относящееся к оценке $\sigma_{\bar{q}}^2$, равным ∞ . Таким образом, зависимость $Q(H)$ должна быть признана однозначной в тех случаях, когда критерий Фишера (5.23) не превышает критических значений распределения Фишера при заданном уровне значимости.

5.7.4 Критические значения распределения Фишера для 5-процентного уровня значимости и различного числа измерений n при условии, если принято, что длина выборки для оценки $\sigma_{\bar{q}}$ равна ∞ , приведены в таблице 5.1.

Т а б л и ц а 5.1 – Критические значения распределения Фишера $F_{кр}$, $\alpha = 0,05$

$n - 1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{кр}$	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	2,01	1,94	1,88	1,83

Продолжение таблицы 5.1

$n - 1$	12	16	20	24	30	40	50	100	120	200
$F_{кр}$	1,75	1,64	1,57	1,52	1,46	1,40	1,35	1,24	1,21	1,17

5.7.5 Согласно предложенному критерию для 5-процентного уровня значимости и числа измерений $n = 31$ критическое значение распределения Фишера равно 1,46.

Это означает, что зависимость $Q(H)$ можно признать однозначной если $\sigma_{\bar{q}} \leq 1,21 \sigma_{\bar{q}}$.

5.7.6 Критерий Фишера (5.23) дает возможность судить о близости или различии дисперсий $D_{\bar{q}}$ и $\sigma_{\bar{q}}^2$, но не позволяет выявить наличие систематической составляющей относительных отклонений \bar{q} . Во многих случаях даже при выполнении неравенства (5.23), расходы воды, измеренные в различные в различные фазы водного режима, располагаются по разные стороны осредняющей КР. Например, на подъеме половодья – правее КР, после прохождения максимума расхода – левее. При этом относительные отклонения \bar{q} , соответствующие различным фазам режима, имеют противоположные знаки. Очевидно, что в таких ситуациях даже при выполнении неравенства (5.23) зависимость $Q(H)$ должна быть признана неоднозначной.

5.7.7 Поэтому наряду с критерием Фишера (5.23) для оценки однозначности КР следует использовать непараметрический критерий оценки случайности временных рядов, в частности, наиболее простой для этого случая – критерий оценки рядов на случайность с учетом знаков относительных отклонений [10], [11]. Выполняется анализ временных рядов относительных отклонений \bar{q} , зафиксированных в различные фазы водного режима. Если не наблюдается систематической составляющей в рядах \bar{q} , то оба знака («+» и «-») должны встречаться одинаково часто.

5.7.8 Зависимость $Q(H)$ следует считать однозначной, если во временном ряду относительных отклонений $\bar{q}(t)$, зафиксированных в течение исследуемой фазы водного режима, число элементов одного знака попадает в следующие интервалы

$$m_{\pm} > \frac{N_0 - 1}{2} - \sqrt{\frac{N_0 + 1}{12}}, \quad (5.25)$$

$$m_{\pm} < \frac{N_0 - 1}{2} + \sqrt{\frac{N_0 + 1}{12}}, \quad (5.26)$$

где N_0 – число элементов \bar{q} в исследуемом ряду (например, во время подъема или спада паводка);

m – число элементов \bar{q} одного знака («+» или «-»).

5.7.9 Таким образом, зависимость $Q(H)$ признается однозначной в тех случаях, когда отношение дисперсий удовлетворяет критерию Фишера (5.23) при заданном

уровне значимости, а относительные отклонения ИРВ от КР или УР носят случайный характер. Проверка временных рядов $\tilde{q}(t)$ на случайность выполняется на основе непараметрического метода – критерия знаков.

5.7.10 Такая процедура должна осуществляться при оценке однозначности зависимостей расходов воды и от других, кроме уровней воды, определяющих факторов. Если связь $Q(H)$ на основе соответствующих уравнений регрессии признается неоднозначной, устанавливаются причины, ее обусловившие, и в соответствии с ними выбирается адекватный способ учета стока.

5.7.11 В случае нарушения критерия Фишера (5.23) и неслучайности группировки последовательности \tilde{q} , установленной в соответствии с соотношениями (5.25) и (5.26), кривую (зависимость) $Q(H)$ следует считать неоднозначной, дающей лишь первое приближение для ЕРВ. Для уточнения значений ЕРВ с учетом неоднозначности зависимости $Q(H)$ для каждого измеренного расхода воды определяются относительные отклонения \tilde{q}_i , которые затем интерполируются тем или иным способом в интервалах между измерениями и на каждую расчетную дату вычисляется поправка \tilde{q}_t . Полученная хронологическая последовательность поправок \tilde{q}_t используется для уточнения ЕРВ по формуле (5.1).

5.7.12 На основе анализа временных рядов относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ принимается окончательное решение о выделении фазово-однородных периодов, в течение которых должны использоваться различные способы учета стока. Критерий Фишера (5.23) и условия однозначности (5.25) и (5.26) служат основной предпосылкой выбора метода и оценки точности гидрометрического учета стока.

Пример использования изложенных алгоритмов оценки однозначности зависимости расходов от уровней воды представлен в приложении В.

6 Учет стока при однозначных зависимостях расходов от уровней воды

6.1 Зависимость расходов от уровней воды за отдельный год

6.1.1 Однозначная зависимость расходов от уровней воды нередко соблюдается только в ограниченный период времени: сезон, год – и тогда ее называют сезонная или годовая. В тех случаях, когда достаточно тесная связь $Q(H)$

сохраняется в течение нескольких лет, ее принято называть многолетней. Для большинства рек России однозначная зависимость, даже если она многолетняя, является сезонной – для периода свободного состояния русла. В течение года однозначность связи $Q(H)$ нарушается летом при зарастании, в зимний и переходные периоды – в связи с ледообразованиями и ледоставом.

6.1.2 Для получения годового аппроксимирующего УР используются данные о расходах воды, измеренных в течение прошедшего года при свободном состоянии русла. Если на участке гидрометрического створа при определенном уровне воды начинают действовать пойма, протоки и рукава, и в них выполняются измерения, то в исходную совокупность включается значение расхода воды, полученное суммированием соответствующих ИРВ. При невозможности получить удовлетворительную аппроксимацию суммарной связи $Q(H)$, аппроксимирующие зависимости определяются на основе формул речной гидравлики отдельно для каждого рукава или протока.

6.1.3 Аппроксимация годовых зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$, $V(H)$ осуществляется при использовании методов, изложенных в 5.4 и приложении А. В соответствии с рекомендациями 5.4 и приложения А выбирается наилучшая аппроксимирующая зависимость, т. е. конкретное уравнение, например, в виде (5.9), с его статистическими характеристиками: коэффициентом множественной корреляции R ; стандартом рассеяния связи σ_q (средним квадратическим значением абсолютных значений отклонений q точек ИРВ от осредняющей зависимости); оценкой математического ожидания абсолютных значений отклонений m_q ; средним квадратическим значением относительных отклонений $\sigma_{\bar{q}}$, оценкой математического ожидания относительных значений отклонений $m_{\bar{q}}$. Эти показатели должны быть оптимальными в соответствии с требованиями, изложенными в приложении А.

6.1.4 Характеристика рассеяния аппроксимирующей связи, а точнее, значение дисперсии относительных отклонений $D_{\bar{q}}$, и дисперсия относительной погрешности измерения расходов воды в гидрометрическом створе D_n используются для оценки однозначности зависимости $Q(H)$. Если критерий Фишера (5.23) не превышает критическое значение распределения Фишера из таблицы 5.1 и при анализе остатков регрессии, как показано на рисунке А.1, не обнаруживается участков с систематическими отклонениями, т. е. выполняются критерии (5.25) и (5.26), связь $Q(H)$ признается однозначной.

6.1.5 Аппроксимация связи $Q(H)$ первоначально выполняется по всей совокупности ИРВ, измеренных при свободном состоянии русла. После получения

статистических оценок рассеяния связи $Q(H)$ необходимо проанализировать ряд исходных данных для выявления грубых погрешностей измерения и промахов по методике, изложенной в 5.5. После этой процедуры аппроксимация связи $Q(H)$ осуществляется уже ранее выбранным методом, но по откорректированной совокупности исходных данных.

6.1.6 В случае, если измерениями расходов воды освещена вся амплитуда уровня воды, полученное УР принимается для расчета ЕРВ, в противном случае необходимо выполнить экстраполяцию расходов воды за пределы диапазона их измерения по методике, описанной в 5.6.

6.1.7 Для получения годового аппроксимирующего УР используются данные о расходах воды, измеренных в течение прошедшего года при свободном состоянии русла. Кроме стандартных данных, помещаемых в таблице «Измеренные расходы воды», необходимо иметь сведения о погрешностях измерения расходов воды в различные фазы водного режима, оценка которых выполнена согласно МИ 1759. Если на участке гидрометрического створа при определенном уровне воды начинают действовать пойма, протоки и рукава, и в них выполняются измерения, то в исходную совокупность включается значение расхода воды, полученное суммированием соответствующих ИРВ. При невозможности получить удовлетворительную аппроксимацию суммарной связи $Q(H)$ аппроксимирующие зависимости определяются по той же методике отдельно для каждого руслового (прируслового) образования.

6.1.8 Для принятия окончательного решения о возможности использования полученной зависимости $Q(H)$ необходимо выполнить увязку связей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$. Процедура аппроксимации зависимостей площади живого сечения и средней скорости течения от уровня воды ($\omega(H)$ и $V(H)$) выполняется в соответствии с положениями 6.1.5. Для получения зависимости $\omega(H)$ за пределами диапазона измерения расходов воды необходимо использовать данные определения площади поперечного сечения по данным нивелировки поперечного профиля гидрометрического створа до высших наблюдаемых уровней воды. Скорости течения за пределами диапазона экстраполяции рассчитываются с использованием методов экстраполяции, описанных в 5.6.

Увязка зависимостей расхода воды и его элементов от уровня воды осуществляется по формуле

$$Q_y(H_i) = \omega(H_i) \cdot V(H_i). \quad (6.1)$$

Соответствующие значения $\omega(H_i)$, $V(H_i)$ вычисляются по уравнениям аппроксимации этих связей. Сопоставляются расходы воды, полученные через каждые 5 % амплитуды уровня воды. Вычисляются относительные расхождения значений расходов $\widetilde{\Delta Q}_i$, рассчитанных по УР $Q(H_i)$, и значений $Q_y(H_i)$, полученных по формуле (6.1)

$$\widetilde{\Delta Q}_i = \frac{Q_y(H_i) - Q(H_i)}{Q(H_i)}. \quad (6.2)$$

Значения $\widetilde{\Delta Q}_i$ не должны превышать относительные значения допустимой погрешности определения произведения площади живого сечения на среднюю скорость потока, которая рассчитывается по формуле

$$\tilde{\sigma}_{\text{доп}} = \frac{(\omega_i^2 \cdot \sigma_{\omega i}^2 + V_i^2 \cdot \sigma_{V i}^2)^{0,5}}{Q(H_i)}, \quad (6.3)$$

где σ_V и σ_ω – соответственно относительные среднеквадратические значения (стандарты) рассеяния зависимостей $V(H)$ и $\omega(H)$.

Если это условие не соблюдается, необходимо выяснить причины неувязки кривых, внести соответствующие исправления в аппроксимирующие зависимости и процедуру увязки повторить снова.

6.1.9 За основу учета стока – вычисления ЕРВ в данном гидрометрическом створе принимается уравнение аппроксимирующей зависимости, полученное по откорректированной совокупности ИРВ (после исключения данных, измеренных с грубыми погрешностями) и увязанное с зависимостями элементов расхода ω и V от уровня воды. Допустимый диапазон применения полученного УР находится в пределах от низшего $H_{\text{низш}}$ до высшего $H_{\text{высш}}$ уровня воды, наблюдаемых при измерениях в совокупности ИРВ, использованной для получения зависимости УР $Q(H)$.

Если амплитуда изменения уровня воды освещена измерениями полностью, а именно, расходы воды измерены и при $H_{\text{низш}}$ и при $H_{\text{высш}}$, процедура учета стока заключается в том, что значения ЕРВ, а при необходимости, и срочных расходов воды вычисляются непосредственно по уравнению связи $Q(H)$ путем подстановки в это уравнение соответствующего значения уровня воды – среднесуточного или срочного. При значительных суточных колебаниях уровня воды следует определять расход воды для каждого срочного уровня, а ЕРВ вычислять как среднее взвешенное по

времени из полученных значений срочных расходов воды.

В случае, когда расходы воды рассчитаны отдельно в русле, пойме, протоках и рукавах, ЕРВ в соответствующих диапазонах уровней ЕРВ определяются путем суммирования значений расходов воды, полученных по отдельным аппроксимирующим зависимостям (для основного русла, поймы, протоки, рукава) для среднего суточного значения уровня воды, взятого из таблицы ЕУВ.

В приложении Г приведен пример расчета параметров годовой зависимости $Q(H)$. Пример расчета ежедневных расходов воды при наличии однозначной годовой зависимости $Q(H)$ приведен в приложении Д.

6.2 Многолетняя зависимость расходов от уровней воды

6.2.1 Нередко связь $Q(H)$ сохраняет устойчивость в течение многих лет. Многолетняя зависимость расходов от уровней воды может считаться обоснованной, если она получена при использовании данных ИРВ не менее, чем за три года наблюдений на гидрологическом посту. Для постов с длительными рядами наблюдений рекомендуется использовать сведения об ИРВ за последние 10 лет; данные предшествующего периода привлекаются для аппроксимации многолетней зависимости $Q(H)$ только в случаях, когда они освещают исключительно высокие паводки и могут уточнить ее положение в верхней части. Аппроксимация многолетней связи $Q(H)$ осуществляется методами, изложенными в 5.4, по всей совокупности данных о расходах воды, измеренных при свободном состоянии русла (отсутствии ледообразования и зарастания) в течение всех лет, вошедших в выбранный многолетний период. Так как многолетняя зависимость $Q(H)$ обоснована значительным числом ИРВ, для ее аппроксимации удобно использовать метод кусочно-полиномиальной регрессии.

6.2.2 Многолетняя однозначная зависимость расходов от уровней воды может считаться установленной, если:

- а) обоснована 50-60 инструментальными измерениями расходов воды, в течение не менее трех лет в периоды свободного состояния русла;
- б) ее экстраполяция не превышает вверх 15 %, вниз 5 % от полной амплитуды уровней за прошлые годы;
- в) установлена ее однозначность в соответствии с критерием Фишера (5.23);
- г) точки ИРВ в пределах полосы рассеяния не образуют хронологически обособленных групп, обусловленных, например, прохождением паводочных волн или

однонаправленных деформаций русла. Если такие группы выделяются, число отклонений \tilde{q} одного знака должно находиться в пределах интервалов (5.25), (5.26).

6.2.3 При оценке однозначности многолетней связи $Q(H)$ выделяют, как минимум, две фазы водного режима потока, для которых вычисляют дисперсию относительных отклонений \tilde{q} :

- меженную, характеризующуюся малыми скоростями потока ($V < 0,5$ м/с);
- фазу средней водности;
- фазу повышенной водности ($V > 0,5$ м/с).

Если известно, что при выходе воды на пойму погрешности измерения расходов воды значительно возрастают, следует выделять также третью фазу режима – повышенной водности после выхода воды на пойму. Каждая из выделенных фаз характеризуется своей погрешностью ИРВ и вычисленным значением дисперсии относительных отклонений \tilde{q} . Многолетняя зависимость $Q(H)$ признается однозначной, если для каждой фазы режима выполняется критерий Фишера (5.23).

6.2.4 При получении многолетней связи $Q(H)$ анализ и контроль исходных данных, а также увязка зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$ выполняются так же, как и при построении годовых зависимостей расходов от уровней воды, как это описано в 5.5, 5.7, 6.1.8.

6.2.5 В том случае, если имеется пойма или отдельные рукава и протоки (действующие постоянно или только при высоких уровнях) аппроксимирующая многолетняя зависимость строится по суммарным значениям расходам воды, измеренным во всех русловых и прирусловых образованиях. В случае, когда не удается получить удовлетворительную аппроксимацию общей зависимости $Q(H)$, для каждой из составных частей данного русла следует рассчитывать свое аппроксимирующее УР.

6.2.6 Для обоснования и подтверждения устойчивой многолетней связи $Q(H)$ расходы воды должны быть измерены с использованием средств измерений (СИ) имеющих свидетельство об утверждении типа СИ и внесенных в государственный реестр СИ.

6.2.7 При установленном факте наличия устойчивой многолетней зависимости $Q(H)$ ЕРВ для данного гидрологического поста вычисляются непосредственно по уравнению регрессии, аппроксимирующему многолетнюю зависимость (УРМ), при подстановке в него соответствующего среднего суточного значения уровня воды.

6.2.8 В течение последующих лет для подтверждения или опровержения устойчивой многолетней связи $Q(H)$ в данном гидрометрическом створе должны

выполняться ежегодные контрольные измерения расходов воды, приуроченные к различным фазам водного режима. После каждого контрольного измерения расхода воды вычисляется относительное значение его отклонения от УРМ – $\tilde{\delta}Q$

$$\tilde{\delta}Q = \frac{Q_{и} - Q_{УРМ}}{Q_{УРМ}} . \quad (6.4)$$

УРМ считается подтвержденным, если относительное отклонение $\tilde{\delta}Q$ не выходит за пределы доверительного интервала среднеквадратического значения рассеяния многолетней связи $Q(H)$ для соответствующей фазы режима, а именно: с доверительной вероятностью 90 % соблюдается условие

$$\tilde{\delta}Q \leq 2\tilde{\sigma}_{УРМ} \quad (6.5)$$

где $\tilde{\sigma}_{УРМ}$ – относительное среднее квадратическое значение рассеяния УРМ.

При анализе отклонений контрольных измерений от УРМ может наблюдаться несколько случаев:

1) условие (6.5) не соблюдается, следовательно, многолетняя зависимость признается неподтвержденной, назначаются дополнительные измерения расходов воды в гидростворе, и по истечении года аппроксимируется годовая зависимость $Q(H)$, по которой осуществляется учет стока за прошедший год;

2) для всех контрольных измерений соблюдается условие (6.5), отклонения $\tilde{\delta}Q$ различных знаков (плюс и минус) встречаются с примерно одинаковой частотой, при этом выполняются соотношения (5.25), (5.26). Многолетняя зависимость $Q(H)$ признается подтвержденной, сток за данный год вычисляется по УРМ;

3) условие (6.5) соблюдается для всех контрольных измерений расходов воды, но при этом большая часть $\tilde{\delta}Q$ имеют один знак «плюс» или «минус» (критериальные неравенства (5.25), (5.26) не выполняются). В этом случае наблюдается однонаправленное смещение зависимости $Q(H)$ или вправо или влево от многолетней зависимости, поэтому УРМ следует признать неподтвержденным и действовать, как и в случае 1.

Пример аппроксимации многолетней зависимости $Q(H)$ представлен в приложении Е. Пример расчета ежедневных расходов воды при наличии однозначной многолетней зависимости $Q(H)$ приведен в приложении Ж.

7 Гидрометрический учет стока при изменяющихся гидравлических условиях и деформациях русла

7.1 Характеристики пропускной способности русла и способы их интерполяции

7.1.1 Критерий Фишера (5.23) и условия однозначности (5.25), (5.26), представленные в разделе 5, служат основной предпосылкой выбора метода и оценки точности гидрометрического учета стока. Если $Q(H)$ признана однозначной, это означает, что ее аппроксимация выполнена оптимальным образом, а разброс точек ИРВ относительно осредняющей кривой обусловлен только случайными погрешностями измерения расходов воды. В таком случае аппроксимация связи $Q(H)$ обеспечивает статистическое сглаживание погрешностей ИРВ, и вычисление расходов воды осуществляется непосредственно по зависимости $Q(H)$. Задача учета стока на гидрометрических створах с однозначной зависимостью расходов от уровней воды рассмотрена в разделе 5.

7.1.2 При нарушении критерия Фишера (5.23) или неслучайности группировок последовательности \tilde{q}_t , установленной в соответствии с соотношениями (5.25) и (5.26) зависимость $Q(H)$ или УР следует считать неоднозначными, дающими лишь первое приближение для ЕРВ. Для их уточнения на основе каждого измеренного расхода воды определяются относительные отклонения \tilde{q}_i , которые затем интерполируются на интервал между измерениями [12]. Полученная при этом хронологическая последовательность поправок \tilde{q}_t используется для уточнения ЕРВ по формуле (5.1)

Неоднозначность зависимостей $Q(H)$ обусловлена изменением пропускной способности русла под воздействием ряда сезонных, гидроморфологических и динамических факторов, таких как: ледовые явления зимой и зарастание в летнюю межень, деформации неустойчивого русла, переменный подпор от впадающих притоков или сооружений и т. п. Влияние этих факторов обуславливает разброс точек ИРВ относительно осредняющей аппроксимирующей зависимости $Q(H)$ и составляет физическую причину относительных отклонений \tilde{q}_i , которые рассматриваются как основная характеристика изменения пропускной способности русла. Хронологическая последовательность отклонений $\tilde{q}(t)$ рассматривается как случайный временной

процесс и анализ изменения характеристик ПСР рек осуществляется с привлечением методов анализа случайных временных рядов.

7.1.3 В пределах отдельной фазы гидрологического режима хронологическую последовательность относительных отклонений можно считать реализацией квазистационарного случайного процесса [11]. Его статистическими характеристиками служат математическое ожидание, дисперсия и автокорреляционная функция. Эти характеристики получают на основе учащенных измерений расходов воды, выполненных в течение фазово-однородных периодов: половодья, межени, ледостава и т. п. Анализируя хронологические графики отклонений, можно заметить, что, как правило, изменение характеристик пропускной способности русла во времени принимает циклический (квазициклический) характер, образуя полные реализации цикла за период наблюдений T_n , и могут быть аппроксимированы периодической функцией – косинусоидой. Например, для петлеобразной зависимости $Q(H)$ хронологический ход $\bar{q}(t)$ может быть представлен полной косинусоидой, как это показано на рисунке 7.1а. Хронологический ход отклонений $\bar{q}(t)$ можно описать уравнением

$$\bar{q}(t) = a \cdot \cos(2\pi t/T_n + \varphi), \quad (7.1)$$

где $a = |\bar{q}_{max}|$ – осредненные по модулю наибольшие значения;

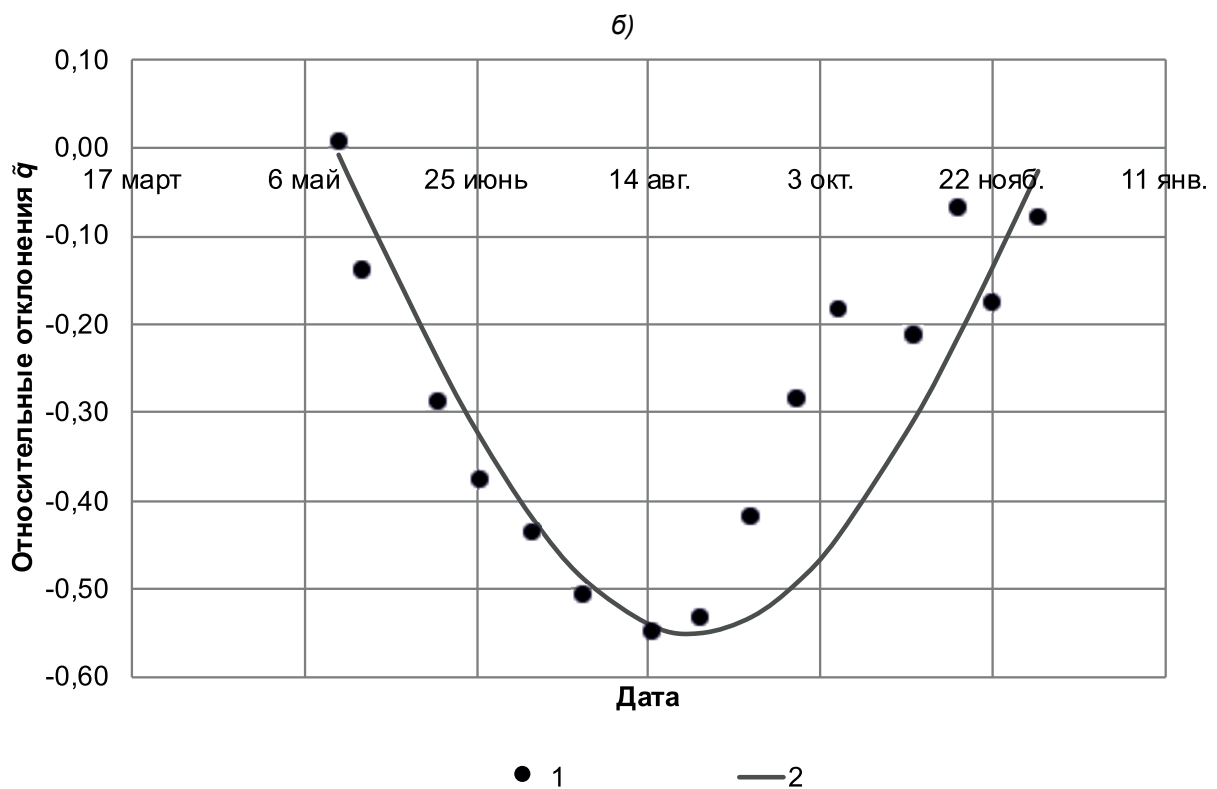
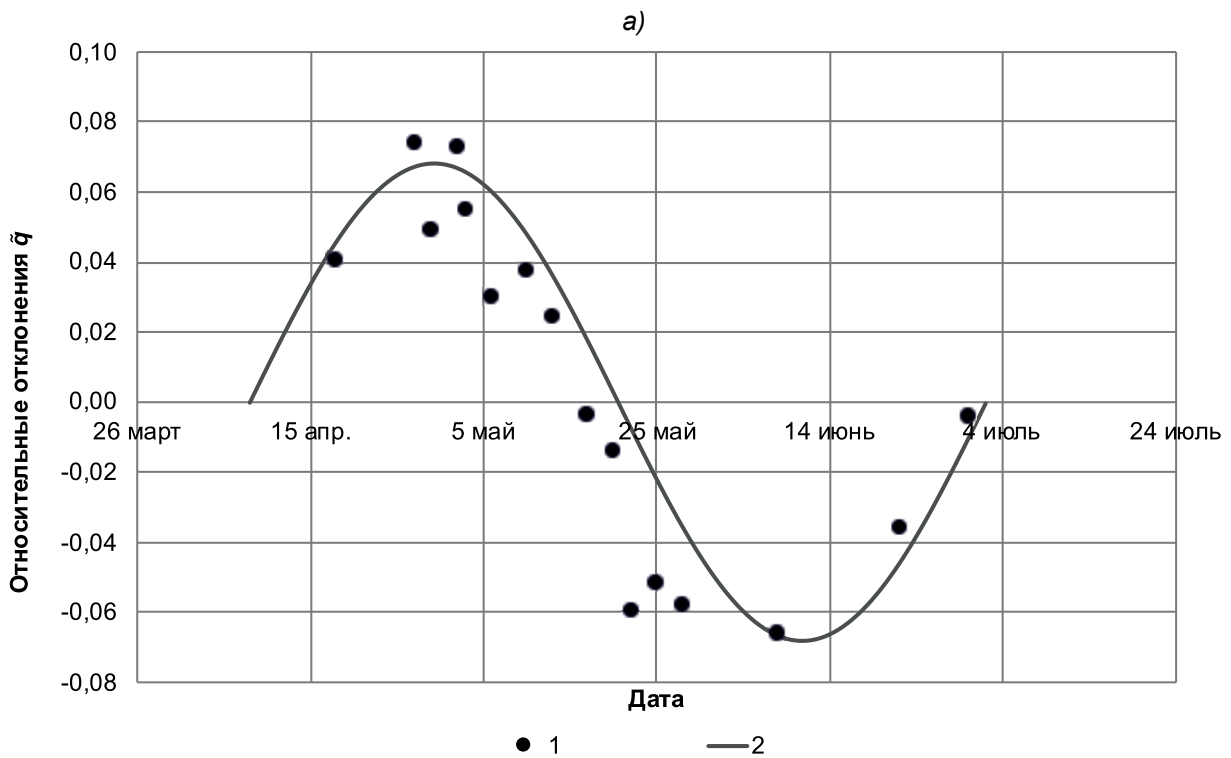
T_n – продолжительность периода, в течение которого связь $Q(H)$ остается неоднозначной, сут;

τ – параметр сдвига в долях T_n , сут;

φ – фаза косинусоиды, рад (для графика на рисунке 7.1а $\varphi = 3\pi/2$).

Эффект неустановившегося движения потока и деформаций русла на реках проявляются совместно и практически не поддаются дифференцированной оценке. При переменном подпоре от притоков период T_n совпадает с продолжительностью половодья (паводка) на впадающей реке. Переменный подпор от водохранилища зависит от его наполнения и транзитного (притекающего) расхода воды на реке. Динамика $\bar{q}(t)$ в этом случае охватывает весь годовой период $T_n = 365$ суток.

Изменения этих отклонений во времени отображаются одной волной косинусоиды (7.1) с фазой $\varphi = \pi/2$ и периодом $T_n = 2T_0$, где T_0 – продолжительность ледостава (зарастания), как показано на рисунке 7.1б.



а) – период неустановившегося движения потока (ГП р. Кас – пос. Александровский Шлюз, 2017 год, $a = 0,068$, $\varphi = 3\pi/2$); б) – период зарастания (ГП р. Воронеж – г. Липецк, 2013 год, $a = -0,55$, $\varphi = \pi/2$)
 1 – хронологические графики относительных отклонений \tilde{q} ;
 2 – гармонические аппроксимации относительных отклонений \tilde{q}

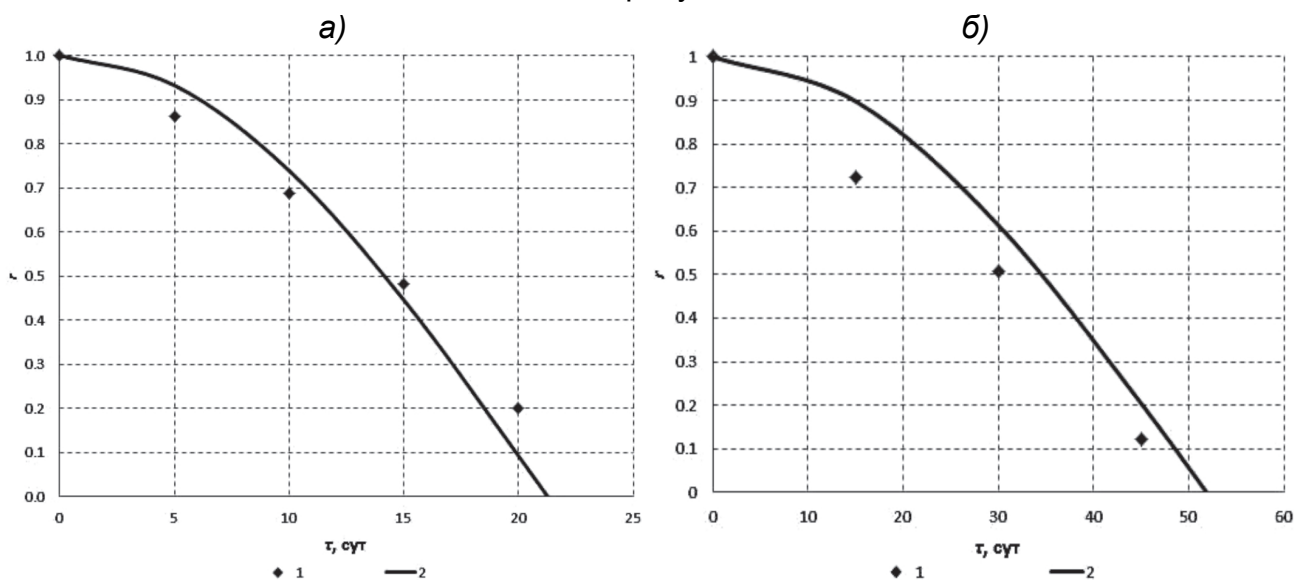
Рисунок 7.1 – Хронологические графики относительных отклонений \tilde{q} для разных периодов

Нормированная автокорреляционная функция (АКФ) при таком представлении также выражается тригонометрической функцией

$$r = \cos(2\pi\tau/T_H), \quad (7.2)$$

где r – значение нормированной автокорреляционной функции при времени запаздывания τ .

АКФ для тригонометрической функции (7.2) выражается функцией того же вида, что и сам случайный процесс; это облегчает ее определение без проведения специальных учащенных измерений. Такую возможность подтверждает непосредственное сопоставление АКФ, рассчитанных по (7.2) и полученных по данным наблюдений, ка это показано на рисунке 7.2.



а) – период неустановившегося движения потока (ГП р. Кас – пос. Александровский Шлюз, 2017 год, $T_H = 85$ сут); б) – период зарастания (ГП р. Воронеж – г. Липецк, 2013 год, $T_H = 207$ сут);
1 – эмпирическая; 2 – теоретическая

Рисунок 7.2 – Автокорреляционные функции относительных отклонений \tilde{q} для разных периодов

Теоретическая АКФ служит огибающей для натуральных реализаций: действительные изменения пропускной способности русла более случайны, чем ее строго периодические вариации. На практике АКФ следует использовать в достаточно ограниченных значениях параметра сдвига $0 \leq \tau \leq 0,25 T_H$.

7.1.4 При нарушении однозначности связи $Q(H)$ временной ряд относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ включает в себя две составляющие:

- сигнал $\tilde{q}_s(t)$, отражающую изменения гидравлико-морфологических условий протекания потока;

- белый шум \tilde{q}_N , обусловленную случайными погрешностями измерения расходов воды.

При вычислении ЕРВ должна учитываться лишь первая составляющая случайного процесса \tilde{q}_S – сигнал, вторую составляющую необходимо исключить. Это осуществляется с использованием методов фильтрации (выравнивания) временного ряда $\tilde{q}(t)$, иными словами, сглаживания случайных погрешностей измерения расходов воды [13]. Одним из методов, позволяющих сглаживать случайные погрешности измерения, является метод оптимальной интерполяции (экстраполяции) [14]. В формулы для вычисления весовых коэффициентов оптимальной интерполяции входит величина η , называемая мерой погрешности.

$$\eta = \frac{\tilde{\sigma}_i^2}{\sigma_{\tilde{q}}^2 - \tilde{\sigma}_i^2}, \quad (7.3)$$

где $\tilde{\sigma}_i^2 = \tilde{D}_i$ – относительное значение дисперсии погрешности измерения расходов воды;

$\sigma_{\tilde{q}}^2$ – дисперсия случайного процесса относительных отклонений \tilde{q} .

7.1.5 Для применения метода оптимальной интерполяции требуется надежная оценка статистических характеристик процесса $\tilde{q}(t)$ (АКФ и дисперсии). Оценка АКФ может быть выполнена по данным учащенных измерений расходов воды или, при их отсутствии, по формуле (7.2).

Имея хронологическую последовательность $\tilde{q}(t)$, полученную на основе учащенных измерений автокорреляционная функция $r_{\tilde{q}}(\tau)$ рассчитывается по формуле

$$r_{\tilde{q}}(\tau) = \frac{\Sigma(\tilde{q}(t) - m_{\tilde{q}})(\tilde{q}(t + \tau) - m_{\tilde{q}})}{D_{\tilde{q}}}, \quad (7.4)$$

где $m_{\tilde{q}}$ – оценка математического ожидания ряда $\tilde{q}(t)$;

$D_{\tilde{q}} = \sigma_{\tilde{q}}^2$ – дисперсия процесса $\tilde{q}(t)$.

Выражение (7.1) позволяет получить необходимые статистические параметры случайного процесса $\tilde{q}(t)$ без учащенных измерений по формуле (7.2). При этом, следует помнить, что получаемые таким способом оценки АКФ приближены и зависят от того, насколько близко выбранная периодическая функция отражает

хронологическую последовательность относительных отклонений (временного ряда) $\tilde{q}(t)$.

7.1.6 При использовании метода оптимальной интерполяции значение \tilde{q}_t на любую дату в интервале между измерениями представляется в виде суммы взвешенных результатов измерений по формуле

$$\tilde{q}_t = \sum_{i=1}^l p_i \tilde{q}_i + (1 - \sum_{i=1}^l p_i) m_{\tilde{q}}, \quad (7.5)$$

где p_i – весовые коэффициенты;

$m_{\tilde{q}}$ – оценка математического ожидания элементов \tilde{q}_i .

Весовые коэффициенты p_i вычисляются из системы уравнений

$$\sum_{j=1}^N r_{ij} p_j + p_i \eta = r_{0j} \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (7.6)$$

где r_{ij} и r_{0j} – значения нормированных автокорреляционных функций при времени запаздывания τ , равном интервалу между моментами измерений t_i и t_j или t_j и t_0 между моментом и расчетным днем, для которого производится интерполяция.

7.1.7 Значения p_i , обеспечивающие наилучшее (оптимальное) приближение к рассматриваемой величине, зависят от степени коррелированности результатов измерений, в нашем случае \tilde{q}_i . Количество значений \tilde{q}_i , включаемых в сумму (7.5), теоретически неограниченно, но на практике при интерполяции элементов \tilde{q}_i в интервале $\tau_{\text{и}}$ между измерениями часто приходится использовать лишь ограничивающие его значения \tilde{q}_i и \tilde{q}_{i+1} . В этом случае весовые коэффициенты p_i вычисляются по формулам

$$p_1 = \frac{(1+\eta)r(\tau_{01}) - r(\tau_{02}) \cdot r(\tau_{12})}{(1+\eta)^2 - [r(\tau_{12})]^2}, \quad (7.7)$$

$$p_2 = \frac{(1+\eta)r(\tau_{02}) - r(\tau_{01}) \cdot r(\tau_{12})}{(1+\eta)^2 - [r(\tau_{12})]^2}. \quad (7.8)$$

7.1.8 В интервале между измерениями в даты t_i и t_{i+1} любую дату t относительные отклонения \tilde{q}_t вычисляются по формуле

$$\tilde{q}_t = p_1 \tilde{q}_1 + p_2 \tilde{q}_2 + (1 - p_1 - p_2) m_{\tilde{q}}. \quad (7.9)$$

7.1.9 Значения АКФ, входящие в формулы (7.7), (7.8), определяются для интервалов запаздывания

$$\begin{aligned}\tau_{01} &= t_0 - t_1; \\ \tau_{02} &= t_2 - t_0; \\ \tau_{12} &= t_2 - t_1,\end{aligned}\tag{7.10}$$

где t_0 – дата, на которую производится расчет ЕРВ;

t_1, t_2 – даты ИРВ, ограничивающие интервал;

τ_{01} – интервал между расчетной датой и датой предшествующего ИРВ t_1 , сут;

τ_{02} – интервал между расчетной датой и датой последующего ИРВ t_2 , сут;

τ_{12} – интервал между датами t_1 и t_2 , сут.

Схема, наглядно поясняющая обозначения в формулах (7.7) – (7.10) представлена на рисунке 7.3.

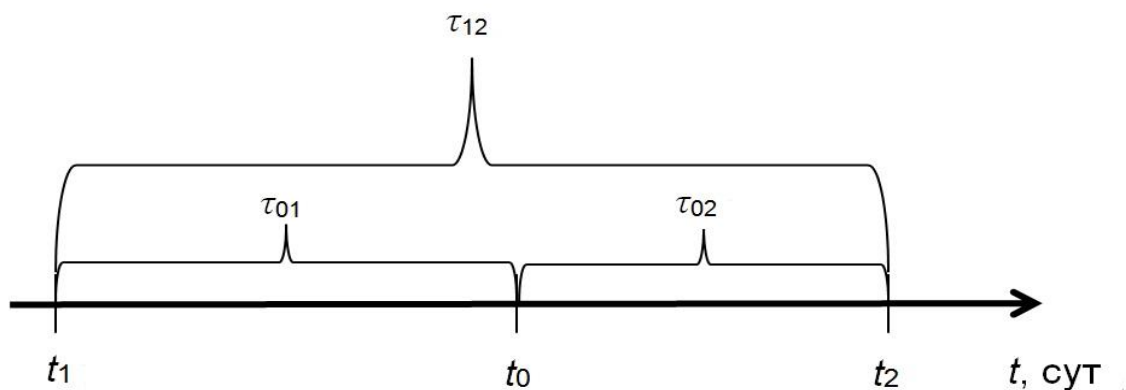


Рисунок 7.3 – Схема индексных обозначений для расчета по формулам оптимальной интерполяции

7.1.10 На дату измерения t_0 сглаженные значения относительных отклонений вычисляются по формуле

$$\tilde{q}_{t_0} = p_1 \tilde{q}_1 + p_0 \tilde{q}_0 + p_2 \tilde{q}_2 + (1 - \sum_{i=1}^3 p_i) m_{\tilde{q}},\tag{7.11}$$

где весовые коэффициенты вычисляются по формулам

$$\rho_0 = \frac{(1+\eta)^2 - (1+\eta)[r(\tau_{02})^2 + r(\tau_{01})^2] + r(\tau_{12})[r(\tau_{02}) \cdot r(\tau_{01}) + r(\tau_{02}) \cdot r(\tau_{01})r(\tau_{02}) - r(\tau_{12})]}{(1+\eta)^3 - (1+\eta)[r(\tau_{12})^2 + r(\tau_{02})^2 + r(\tau_{01})^2] + 2r(\tau_{01})r(\tau_{12})r(\tau_{02})}, \quad (7.12)$$

$$\rho_1 = \frac{(1+\eta)^2 \cdot r(\tau_{01}) - (1+\eta)[r(\tau_{12}) \cdot r(\tau_{02}) + r(\tau_{01})] + r(\tau_{12})r(\tau_{02})}{(1+\eta)^3 - (1+\eta)[r(\tau_{12})^2 + r(\tau_{02})^2 + r(\tau_{01})^2] + 2r(\tau_{01})r(\tau_{12})r(\tau_{02})}, \quad (7.13)$$

$$\rho_2 = \frac{(1+\eta)^2 \cdot r(\tau_{02}) - (1+\eta)[r(\tau_{12}) \cdot r(\tau_{01}) + r(\tau_{02})] + r(\tau_{12})r(\tau_{01})}{(1+\eta)^3 - (1+\eta)[r(\tau_{12})^2 + r(\tau_{02})^2 + r(\tau_{01})^2] + 2r(\tau_{01})r(\tau_{12})r(\tau_{02})}, \quad (7.14)$$

где $r(\tau_{01})$ – значение АКФ, соответствующее сдвигу τ_{01} , равному интервалу времени между датой ИРВ t_0 и датой предыдущего ИРВ t_1 ;

$r(\tau_{02})$ – значение АКФ, соответствующее сдвигу τ_{01} , равному интервалу времени между датой ИРВ t_0 и датой последующего ИРВ t_2 ;

$r(\tau_{12})$ – значение АКФ, соответствующее сдвигу τ_{12} , равному интервалу времени между датами предыдущего ИРВ t_1 последующего ИРВ t_2 .

7.1.11 При отсутствии данных об АКФ для сглаживания случайных погрешностей измерения расходов воды перед выполнением интерполяции характеристик ПСР (элементов ряда $\tilde{q}(t)$) в интервалах между измерениями расходов воды необходимо предварительно провести процедуру выравнивания (сглаживания) исходного временного ряда $\tilde{q}(t)$ на основе скользящего представления его элементов полиномом первой или второй степени по времени t

$$\begin{aligned} \tilde{q}^{\wedge}(t) &= a_0 + a_1 t, \\ \tilde{q}^{\wedge}(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2. \end{aligned} \quad (7.15)$$

Сглаживание осуществляется уравнением регрессии относительных отклонений \tilde{q} по времени t . Эта процедура эквивалентна представлению элемента ряда \tilde{q} линейной комбинацией соседних с ним элементов. Подбирается полином к первой группе, например, из первых трех членов ряда ($2m+1=3$, при $m=1$) и затем этот полином используется для определения значения оцениваемого выравненного ряда во второй ($m+1$) средней точке группы. Затем полином того же порядка подбирается к группе из второго, третьего и четвертого элементов ряда и оценивается значение в точке ($m+2=3$).

Полином можно подбирать и к группе, состоящей из четного числа членов ряда, тогда оцениваемые значения элементов ряда будут отнесены к серединам интервалов между измерениями. Выбор степени сглаживающего полинома и радиуса сглаживающего фильтра (числа точек, к которым подбирается полином) осуществляется путем численных экспериментов на основе анализа ряда расхождений значений исходного $\tilde{q}(t)$ и выравненного $\tilde{q}^{\wedge}(t)$ рядов $\delta\tilde{q}(t)$

$$\delta\tilde{q}(t) = \tilde{q}_i(t) - \tilde{q}_i^{\wedge}(t). \quad (7.16)$$

О том, что в ходе выравнивания отсечена составляющая, обусловленная случайными погрешностями измерения расходов воды, свидетельствуют следующие характеристики ряда расхождений $\delta\tilde{q}(t)$:

- ряд $\delta\tilde{q}(t)$ должен быть случаен;
- среднее значение элементов ряда должно быть близко к нулю ($m_{\delta\tilde{q}(t)} \cong 0$);
- дисперсия элементов ряда должна быть близка к относительному значению случайной погрешности измерения ($\sigma_{\delta\tilde{q}(t)}^2 \cong \tilde{\sigma}_и^2$).

После сглаживания для определения значений поправок \tilde{q}_t в формуле (5.1) в интервале между измерениями выполняется линейная интерполяция элементов выравненного ряда $\tilde{q}^{\wedge}(t)$.

7.2 Алгоритм вычисления ежедневных расходов воды при отсутствии однозначной зависимости расходов от уровней воды

7.2.1 Основой вычисления ЕРВ в периоды, когда зависимость $Q(H)$ оказывается неоднозначной, остается осредняющая поле ИРВ КР или ее аналитическое представление УР. Это может быть кривая, полученная по данными ИРВ текущего года или многолетнего периода (МКР или УРМ), поэтому первый шаг в алгоритме расчета ЕРВ – аппроксимация опорной (базовой) зависимости расходов от уровней воды, которая выполняется по алгоритму, изложенному в 5.4, и принятие решения о выборе опорной КР.

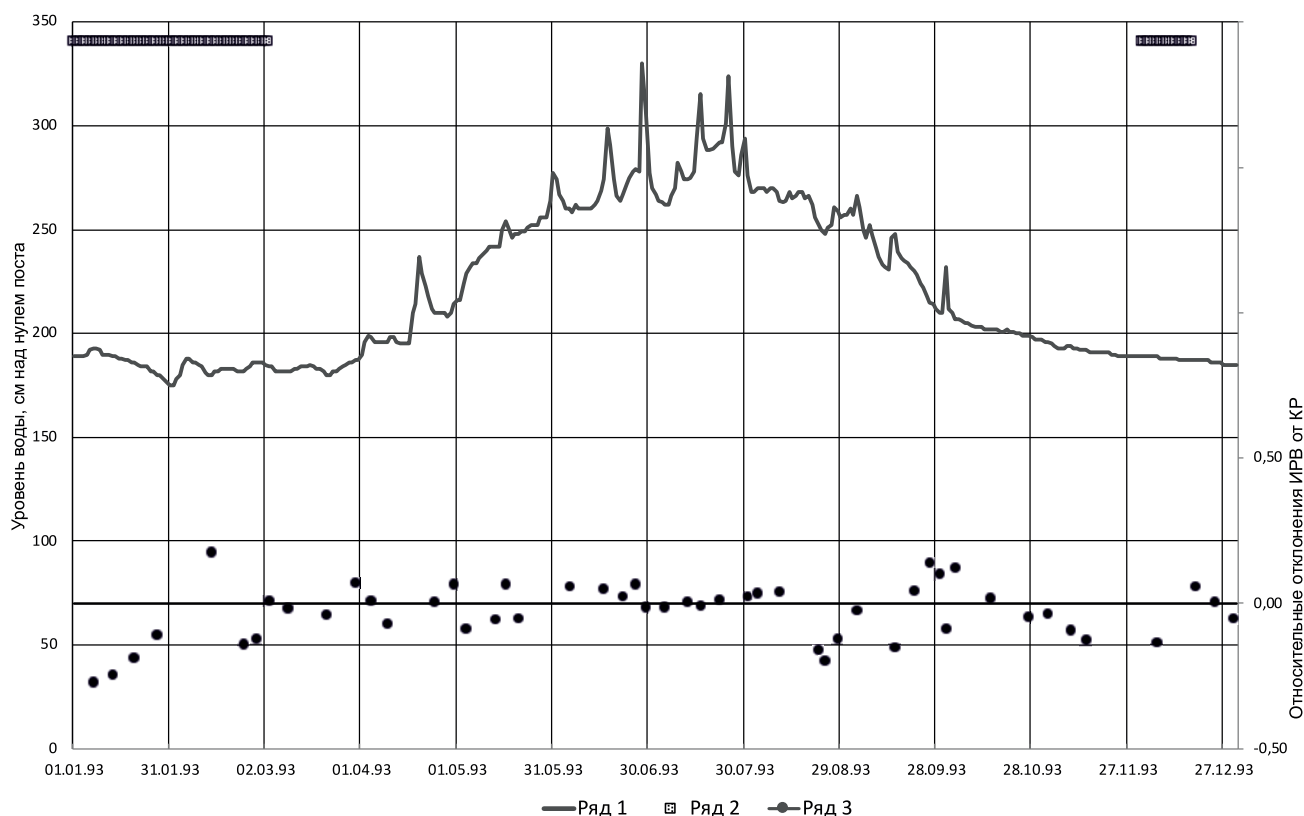
7.2.2 Далее по совокупности ИРВ расчетного года по формуле (5.2) вычисляются их относительные отклонения от принятой КР (расчетного года или МКР).

7.2.3 Полученный ряд относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ расчетного года

необходимо дополнить стыковочными значениями предшествующего и последующего годов. Предполагается, что ЕРВ предыдущего года рассчитаны верно, поэтому слева к ряду $\tilde{q}(t)$ расчетного года добавляется значение относительного отклонения от принятой базовой КР среднесуточного расхода воды за 31 декабря предыдущего года. Справа ряд $\tilde{q}(t)$ расчетного года дополняется значениями относительных отклонений двух первых ИРВ, состоявшихся в первой декаде января следующего года. Если в первой декаде января следующего года измерений расхода воды не было, данные следующего года в расчет не принимаются.

7.2.4 Для выравнивания и интерполяции рядов $\tilde{q}(t)$ вычисляются значения узлов исходного ряда отклонений, которые соответствуют порядковому номеру в году дат ИРВ. Узел первого относительного отклонения, принимаемого для расчета (31 декабря предыдущего года), равен «0».

7.2.5 На основе анализа совмещенного хронологического графика ежедневных уровней воды $H(t)$ и относительных отклонений $\tilde{q}(t)$, пример которого представлен на рисунке 7.4, принимается решение о разбиении года на периоды в зависимости от принимаемого метода расчета ЕРВ.



Ряд 1 – уровни воды, Ряд 2 – относительные отклонения, Ряд 3 – СВО

Рисунок 7.4 – Совмещенный график ЕУВ и относительных отклонений ИРВ от КР

Для приведенного примера год должен быть разбит на следующие периоды:

1. (с 01.01 по 02.03) – ледовые явления, расчет ЕРВ с учетом отклонений $\tilde{q}(t)$;
2. (с 03.03 по 09.08) – свободное русло, расчет по КР;
3. (с 10.08 по 28.11) – деформации русла, расчет ЕРВ с учетом отклонений $\tilde{q}(t)$;
4. (с 29.11 по 17.12) – ледовые явления, расчет ЕРВ с учетом отклонений $\tilde{q}(t)$;
5. (с 18.12 по 31.12) – свободное русло, расчет по КР.

О том, что после прохождения половодья в августе 1993 года в русле произошли значительные деформации можно судить на основании анализа графиков совмещенных поперечных профилей в гидрометрическом створе, пример которого представлен на рисунке 7.5 графики свидетельствуют о том, что на спаде половодья произошло отложение наносов в гидрометрическом створе, что привело к повышению отметок дна и уменьшению пропускной способности русла после 10 августа 1993 года.

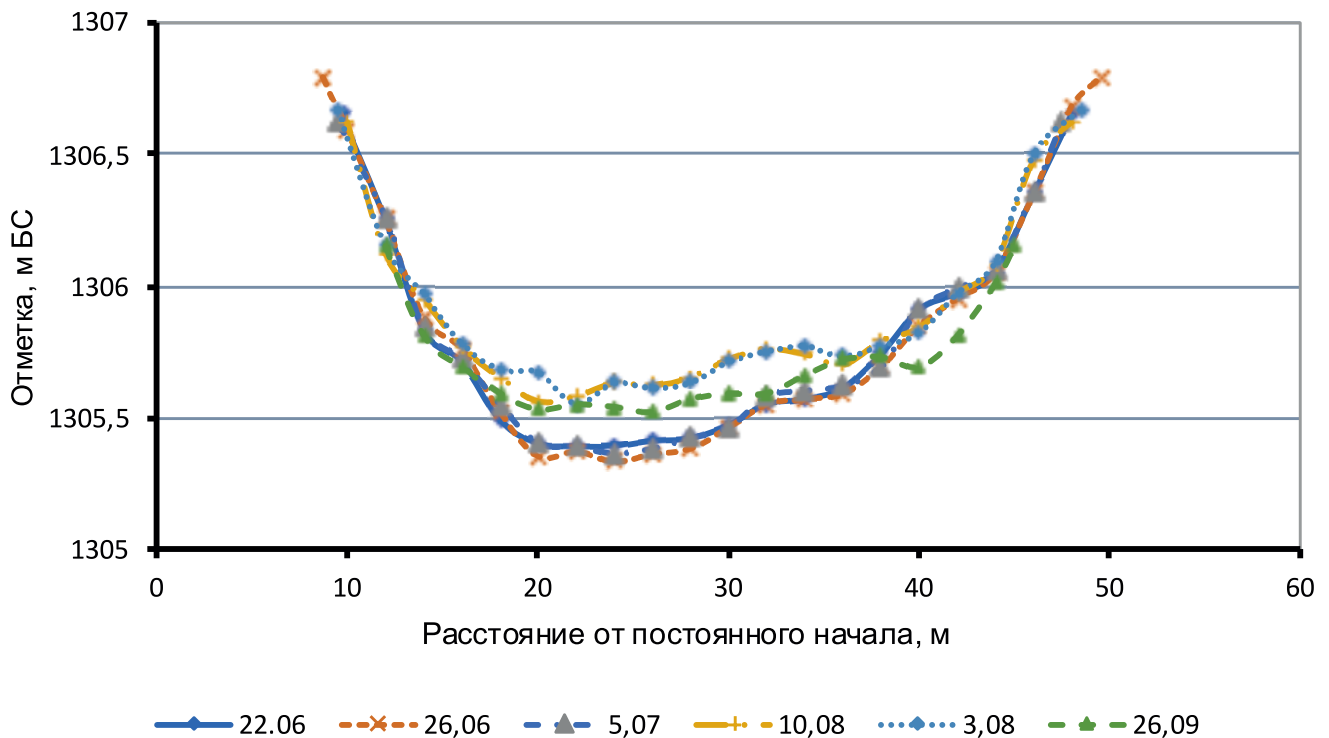


Рисунок 7.5 – Совмещенные профили поперечного сечения русла в гидрометрическом створе ГП р. Теберда – г. Теберда, 1993 год

7.2.6 Для каждого выбранного периода выбираются относительные отклонения ИРВ от базовой КР в интервале от начальной до конечной даты, вычисляется их количество N в расчетный период, среднее квадратическое и среднее значения. По результатам расчета формируется таблица 7.1.

Т а б л и ц а 7.1 – Границы периодов расчета ЕРВ и характеристики рядов относительных отклонений $\tilde{q}(t)$

Номер периода	Дата начала	Дата конца	Число дней	Метод расчета	Погрешность ИРВ, %	Число ИРВ	Среднее квадратическое значение \tilde{q}	Среднее значение \tilde{q}
1	01.01	02.03	61	С учетом $\tilde{q}(t)$	8	7	0,21	-0,085
2	03.03	09.08	161	КР	5	25	0,05	0,01
3	10.08	28.11	110	С учетом $\tilde{q}(t)$	5	16	0,12	0,06
4	29.11	13.12	15	С учетом $\tilde{q}(t)$	8	1	0,14	-0,14
5	14.12	31.12	18	КР	5	3	0,05	0,00

7.2.7 Ряды относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ дополняются приграничными значениями относительных отклонений справа и слева от выбранного расчетного периода. При этом может быть два случая:

- а) сток за весь год вычисляется с учетом относительных отклонений;
- б) год разбит на периоды (см. 7.2.5).

Случай а): слева (на дату 31.12 предшествующего года) добавляется относительное отклонение ЕРВ от КР, узел отклонения равен 0,00; справа – если измерено 2 расхода воды в 1-й декаде января следующего года, к исходному ряду добавляются их относительные отклонения от выбранной кривой; узлы этих отклонений рассчитываются как 365 или 366 плюс порядковый номер даты измерения расхода воды в следующем году; если измерен всего один расход воды в первой декаде следующего года, к исходному ряду добавляется его относительное отклонение.

Случай б): для первого в году периода: слева (на дату 31.12 предшествующего года) добавляется относительное отклонение ЕРВ от КР, узел относительного отклонения равен 0; справа – следует период вычисления ЕРВ по КР, следовательно, добавляется относительное отклонение, равное 0,00 с соответствующим ему рассчитанным узлом, полученным по дате его измерения. ЕРВ для второго периода вычисляются по КР. Для третьего периода и слева и справа добавляются по одному относительному отклонению, равному 0,00 с соответствующими им узлами.

В результате размер массива исходных относительных отклонений для периодов расчета увеличивается на 2 элемента; для периода в конце года ряд может увеличиться на 3 элемента.

7.2.8 Далее необходимо получить ежедневные поправки \tilde{q}_i , входящие в формулу (5.1). Они могут быть рассчитаны методом оптимальной интерполяции

исходных рядов отклонений $\tilde{q}(t)$ с использованием формул (7.9) и (7.11). Для этого необходимо рассчитать АКФ ряда $\tilde{q}(t)$. Предпочтительным является получение АКФ по данным учащенных измерений расходов воды прошлых лет с использованием формулы (7.4). При отсутствии учащенных измерений необходимо выполнить аппроксимацию временного ряда $\tilde{q}(t)$ согласно уравнению (7.1) (см. рисунок 7.1) и рассчитать АКФ по уравнению (7.2).

7.2.9 Если цикличность временного ряда $\tilde{q}(t)$ выражена неявно и возникают затруднения с его представлением в виде косинусоиды, необходимо сначала выполнить выравнивание (сглаживание) исходного ряда отклонений $\tilde{q}(t)$ с использованием алгоритма, описанного в 7.1.11, а затем – линейную интерполяцию элементов сглаженного ряда. В этом случае ежедневные поправки \tilde{q}_t , входящие в формулу (5.1), вычисляются посредством линейной интерполяции между элементами выравненного ряда отклонений $\tilde{q}^{\wedge}(t)$.

7.2.10 Значения срочных и ежедневных расходов воды в периоды нарушения однозначной зависимости расходов от уровней воды вычисляются по формуле (5.1).

7.2.11 Вычисление расходов воды при подготовке таблиц справочников ВК допускается выполнять также по формуле (5.3) с использованием переходных коэффициентов $K_{\text{пер}}$, которые вычисляются по формуле (5.4).

По вычисленным на даты измерения значениям $K_{\text{пер}}$ строятся хронологические графики. Линия графика проводится как плавная кривая, проходящая непосредственно по точкам значений $K_{\text{пер}}$. При очень частых измерениях линию графика проводят осредненно. Для периодов ледостава и зарастания могут быть использованы осредненные за многолетие хронологические графики $K_{\text{пер}}$. В интервалах между измерениями для расчета расхода воды по формуле (5.3) $K_{\text{пер}}$ снимается с хронологического графика или определяются методом линейной интерполяции.

7.3 Гидрометрический учет стока в условиях неустановившегося движения речного потока

7.3.1 Одной из причин нарушения однозначности зависимости $Q(H)$ является неустановившееся движение потока, когда связь между расходом и уровнем в створе ГП нарушается при прохождении волн паводков, половодий или попусков из водохранилища.

При движении паводочной волны уклоны водной поверхности на подъеме и спаде паводка могут существенно различаться. За счет различия в уклонах расходы воды на подъеме паводка при одном и том же уровне оказываются больше, чем на спаде паводка, в результате чего на подъеме точки (Q, H) на графике отклоняются вправо от КР установившегося движения, а на спаде – влево, образуя в совокупности петлеобразную зависимость, именуемую «паводочной петлей». При прохождении нескольких подряд волн половодья/паводка петли могут накладываться друг на друга, что делает невозможной аналитическую аппроксимацию отдельно ветвей подъема и спада. На рисунке 7.6 представлена зависимость $Q(H)$ р. Яна в гидростворе ГП г. Верхоянск за 2016 год. Из рисунка видно, что для реки характерно ярко выраженное неустановившееся движение при прохождении волн половодья и паводков с образованием паводочных петель.

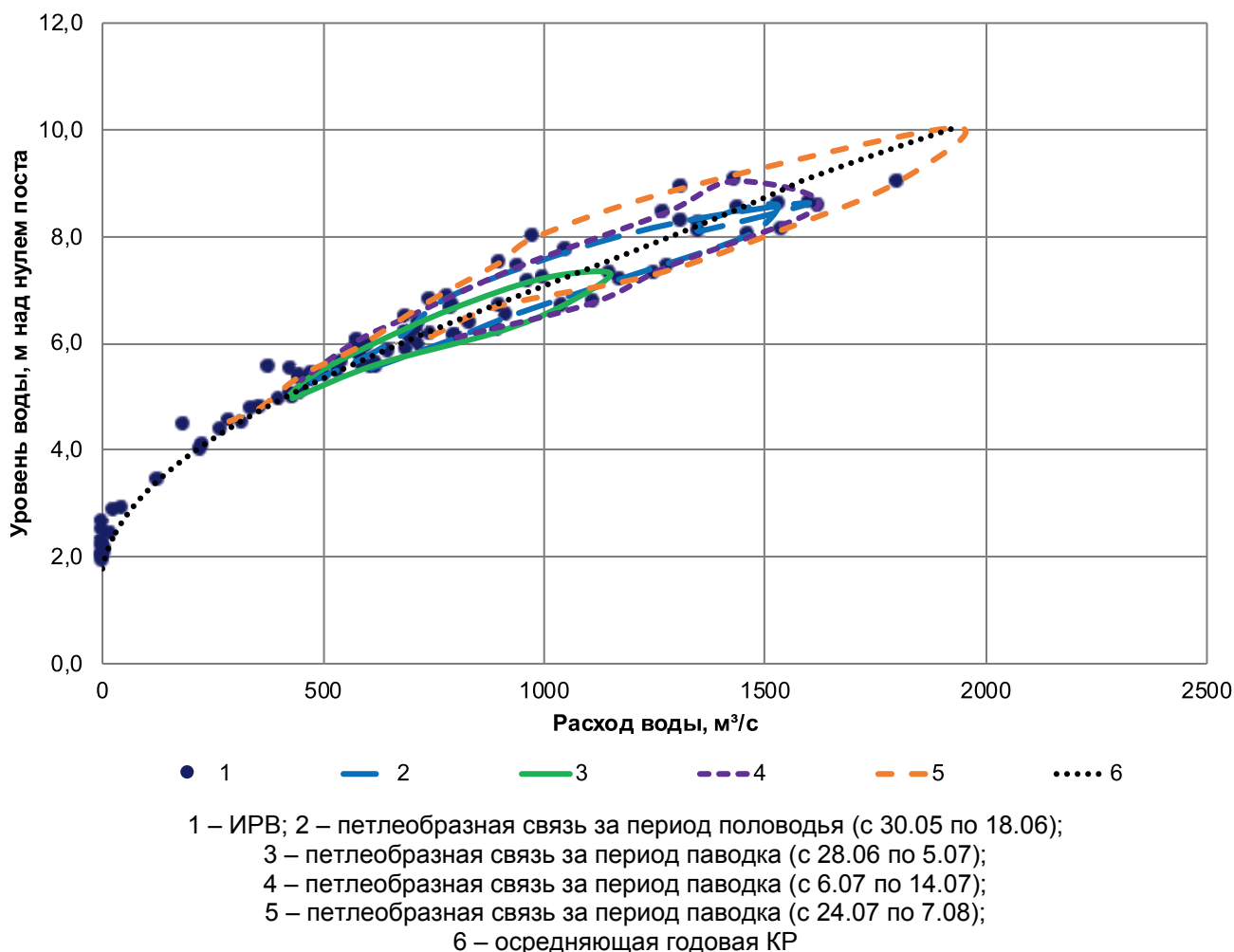


Рисунок 7.6 – Зависимость расходов от уровней воды
 ГП р. Яна – г. Верхоянск, 2016 год

Руководство по гидрологической практике ВМО [9] для расчета расходов воды при неустановившемся движении потока рекомендует использовать формулу Джонса

$$Q_n = Q_y \sqrt{1 + \frac{1}{iV_d} \frac{dH}{dt}}, \quad (7.17)$$

где Q_n – расход воды при неустановившемся движении потока, м³/с;

Q_y – расход воды при установившемся движении потока, м³/с;

i – уклон свободной поверхности воды при установившемся движении потока;

dH/dt – интенсивность изменения уровня воды за принятый интервал времени, м/сут;

V_d – скорость добегания расхода установившегося движения (скорость, с которой распространяется граница установившегося движения с данным расходом Q_y).

В ряде зарубежных исследований [15], [16] рассматриваются различные способы определения параметров формулы (7.17).

7.3.2 Для расчета ЕРВ в период неустановившегося движения следует использовать алгоритм оптимальной интерполяции, изложенный в 7.1.

7.3.2.1 Согласно алгоритмам, подробно описанным в приложении А, выполняется аппроксимация зависимости $Q(H)$, являющейся осредняющей для поля точек (Q, H) . Если диапазон наблюдаемых уровней воды превышает диапазон уровней, освещенных ИРВ, выполняется экстраполяция расходов воды в верхней части согласно методике, изложенной в 5.6. Пример экстраполяции расходов воды в верхней части приведен в приложении Б.1.

7.3.2.2 На основе каждого ИРВ определяются относительные отклонения \tilde{q}_i по формуле (5.2).

7.3.2.3 Определяется период (периоды), в течение которых зависимость $Q(H)$ может быть неоднозначной T_n . Такими периодами могут быть половодье, паводки, прохождение волн попусков из водохранилища, поэтому в качестве T_n принимается продолжительность каждого периода в отдельности (в сут).

7.3.2.4 Для каждого из периодов, определенных согласно 7.3.2.3, производится оценка однозначности связи расходов и уровней по критериям, приведенным в 5.7. Пример оценки однозначности зависимости расходов от уровней воды представлен в приложении В.

Если связь $Q(H)$ в выбранном периоде удовлетворяет критериям (5.23), (5.25) и (5.26), то, как правило, такое движение потока может считаться квазиустановившимся,

и использование алгоритма оптимальной интерполяции нецелесообразно. В этом случае расчет ЕРВ может осуществляться непосредственно по уравнению КР или согласно алгоритму линейного сглаживания, изложенному в 7.1.11.

7.3.2.5 В случае, когда связь $Q(H)$ для выбранного периода не удовлетворяет критериям (5.23), (5.25) и (5.26), алгоритм оптимальной интерполяции может быть использован для расчета ЕРВ. Например, для ГП р. Яна – г. Верхоянск за 2016 год было определено четыре таких периода (см. рисунок 7.6).

С целью применения метода оптимальной интерполяции для каждого периода, когда связь $Q(H)$ признана неоднозначной, определяются статистические характеристики ряда $\tilde{q}(t)$ – АКФ и дисперсия, мера погрешности измерения по формуле (7.3).

7.3.2.6 В соответствии со схемой на рисунке 7.3 определяются интервалы τ_{01} , τ_{02} и τ_{12} .

7.3.2.7 Вычисляются значения $r(\tau_{01})$, $r(\tau_{02})$ и $r(\tau_{12})$ для соответствующих интервалов.

7.3.2.8 Вычисляются значения весовых коэффициентов:

- на даты ИРВ по формулам (7.12), (7.13) и (7.14);
- на даты между ИРВ по формулам (7.7) и (7.8).

7.3.2.9 Вычисляются сглаженные значения относительных отклонений на даты ИРВ по формуле (7.11).

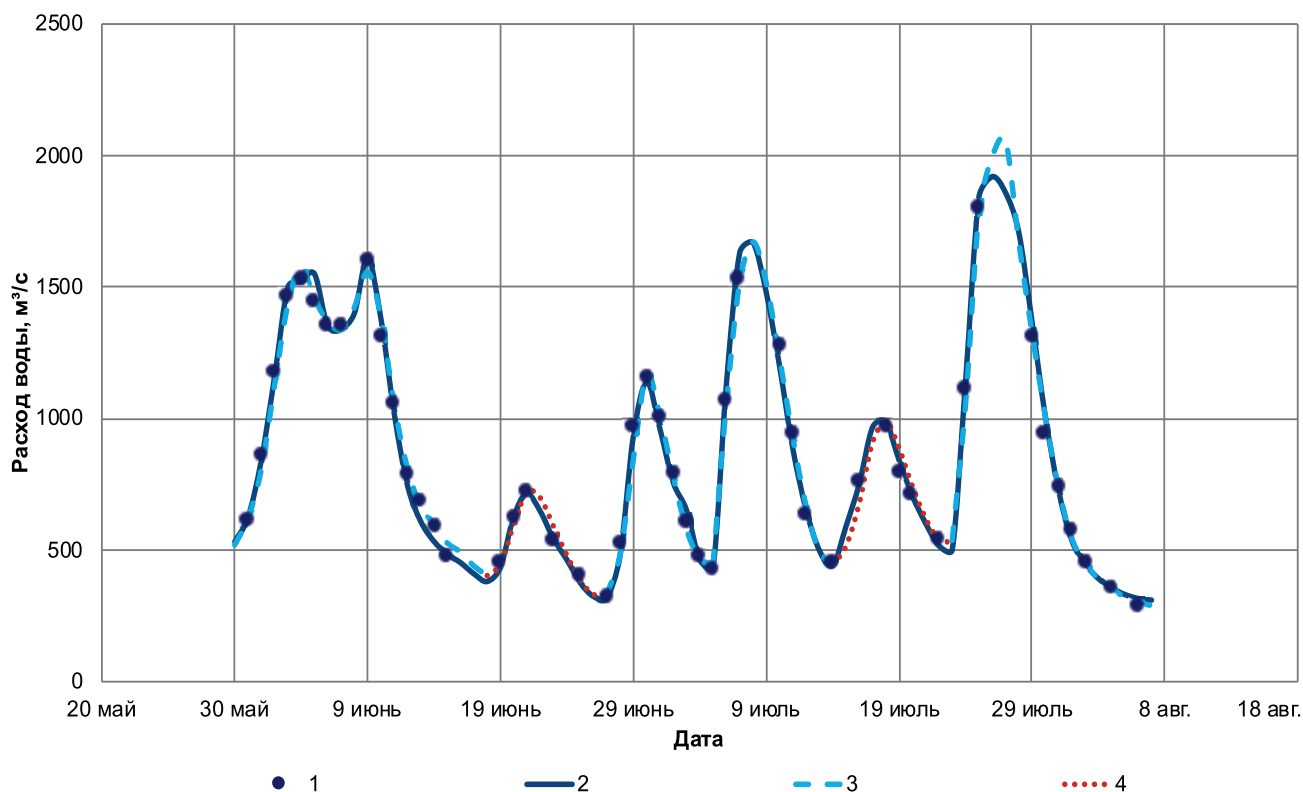
7.3.2.10 Вычисляются интерполированные значения относительных отклонений на даты между ИРВ по формуле (7.9).

7.3.2.11 При вычислении относительных отклонений по формулам (7.9) и (7.11) следует учитывать смену фаз водного режима. Если расчетная дата находится на подъеме или спаде паводочной волны, то для расчета сглаженного или интерполированного значения \tilde{q}_t могут быть использованы только те значения относительных отклонений ИРВ, которые находятся в той же фазе, что и расчетная дата. Если расчетная дата приходится на дату максимума паводочной волны, для расчета используется относительное отклонение ближайшего ИРВ.

7.3.2.12 По формуле (5.1) вычисляются значения ЕРВ.

На рисунке 7.7 представлен гидрограф паводочного периода р. Яна в гидростворе ГП г. Верхоянск. ЕРВ периода половодья и трех наибольших паводков были вычислены согласно алгоритму оптимальной интерполяции. ЕРВ за периоды двух невысоких паводков были вычислены с использованием алгоритма линейного

сглаживания, изложенного в 7.1.11, т.к. связь $Q(H)$ в эти периоды была близка к однозначной.



1 – ИРВ; 2 – ЕРВ по данным ЕДС; 3 – ЕРВ, вычисленные на основе метода оптимальной интерполяции: за период половодья с 30.05 по 18.06 и за периоды паводков с 28.06 по 05.07, с 06.07 по 14.07, с 24.07 по 07.08; 4 – ЕРВ, вычисленные на основе метода линейной интерполяции за периоды паводков с 19.06 по 27.06 и с 15.07 по 23.07

Рисунок 7.7 – Гидрографы стока р. Яна в гидростворе ГП г. Верхоянск в период с 30.05 по 07.08.2016

7.3.3 Подробный алгоритм с примером расчета ЕРВ в период неустановившегося движения потока представлен в приложении И.

7.4 Гидрометрический учет стока в условиях переменного подпора

7.4.1 При наличии переменного подпора связь между расходом и уровнем в гидростворе ГП нарушается вследствие изменений отметки уровня (не связанных с изменениями расхода) в некотором нижележащем регулирующем сечении.

7.4.2 Переменный подпор в гидростворе ГП может быть вызван следующими причинами:

а) изменения отметки уровня в створе нижележащего гидротехнического сооружения в результате искусственного регулирования уровня;

б) подпор от водоприёмника (реки, озера, моря), в том числе при сгонно-нагонных явлениях;

в) подпор, возникающий в результате паводка на впадающем ниже притоке (или притоках);

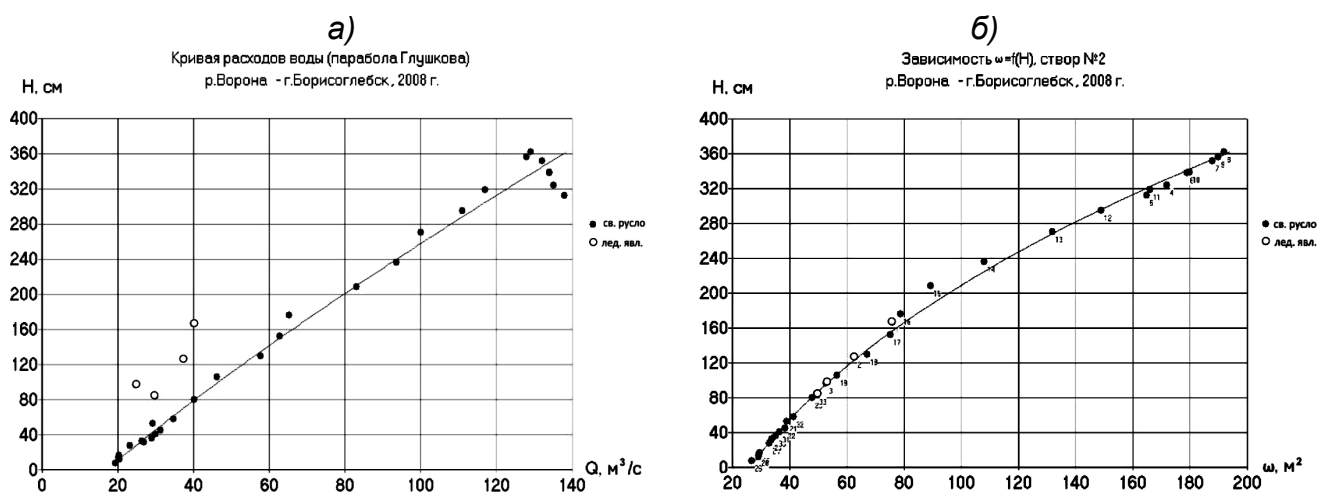
г) подпор, возникающий при намыве или размыве гребня нижележащего переката;

д) заломы сплавного леса;

е) строительные, дноуглубительные и выправительные работы, производимые в русле ниже створа поста.

7.4.3 По характеру переменный подпор может быть резким (при сгонно-нагонных явлениях, изменениях работы нижерасположенного ГТС, заторах сплавного леса) и постепенным (в результате паводка на главной реке или впадающем ниже притоке, весеннего повышения уровня водоприёмника, изменении отметок гребня нижележащего переката).

7.4.4 Основным признаком переменного подпора является разброс точек измеренных расходов (Q , H) (рисунок 7.8а) и средних скоростей (v , H), не вызванных ледяными образованиями или зарастанием, при сохранении однозначной связи между площадью водного сечения и уровнем (рисунок 7.8б). Дополнительным признаком являются сведения о причинах, вызывающих переменный подпор, но они зачастую отсутствуют.



а) – зависимость расходов от уровней воды;
б) – зависимость площади живого сечения от уровней воды

Рисунок 7.8 – Гидравлические характеристики, ГП р. Ворона – г. Борисоглебск, 2008 год

7.4.5 Для выявления переменного подпора производится анализ графика хода уровня исследуемого ГП и совмещённых графиков хода уровня при наличии на реке нескольких ГП. Пример таких графиков представлен на рисунке 7.9. Как видно из рисунка 7.9, ход уровней воды в гидростворе ГП г. Уварово отмечается тремя пиками, в то время как в створе ГП г. Борисоглебск второй и третий пики (15 марта – 18 апреля) сглажены, что обусловлено прохождением пика половодья на реке Хопер, притоком которого является р. Ворона. ГП Борисоглебск находится в зоне влияния переменного подпора от р. Хопер в периоды прохождения на нем половодья.

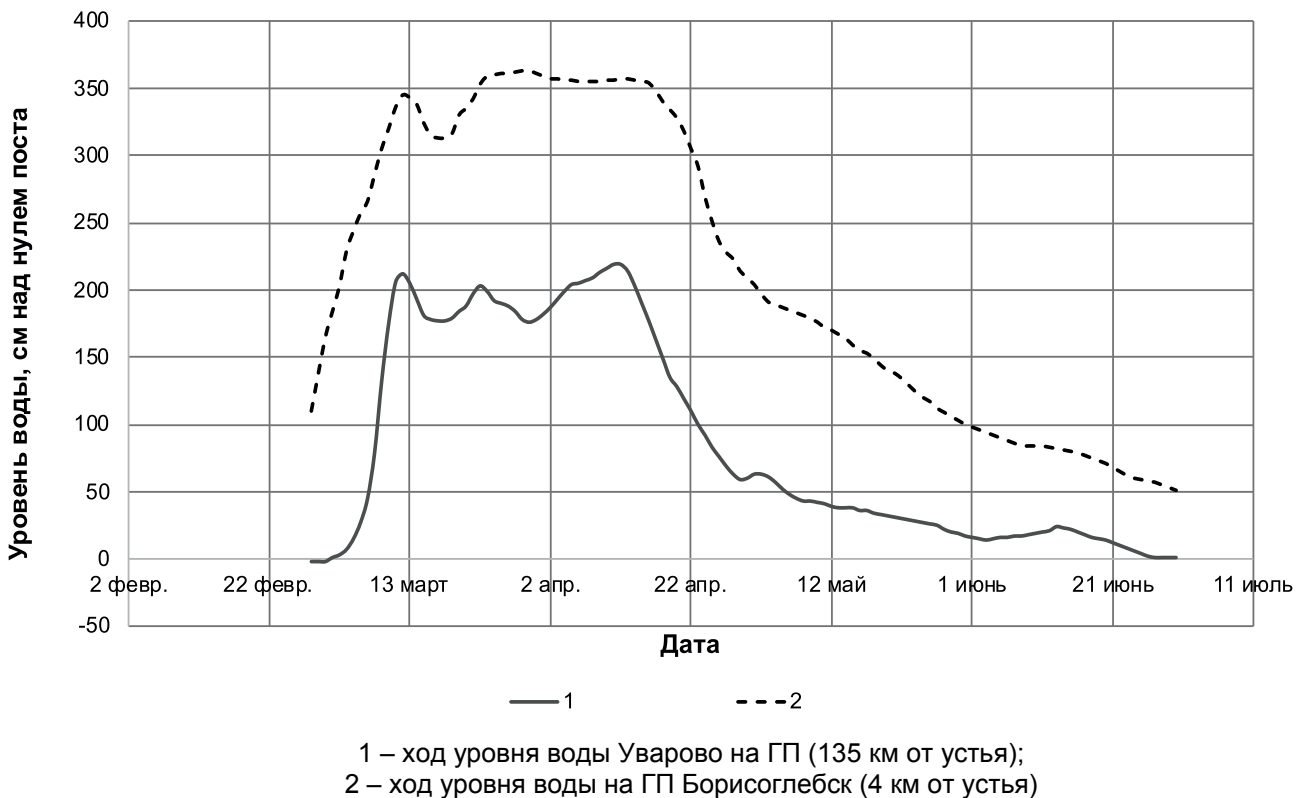


Рисунок 7.9 – Совмещенные графики хода уровней воды р. Ворона

7.4.6 Традиционными методами учета стока при переменном подпоре являются интерполяция между измеренными расходами, построение КР неустойчивой связи и срезка подпорных уровней [1].

7.4.7 При переменном подпоре пропускная способность русла, отнесенная к одному и тому же фиксированному уровню H , при подпоре снижается, а при спаде увеличивается на величину ΔQ , которая связана сложной зависимостью с гидравлическими факторами. В их число входят такие трудноопределяемые элементы, как уклон трения и коэффициент шероховатости русла. В то же время все характеристики пропускной способности русла определяются положением уровня в

двух смежных створах – верхнем H_v и нижнем H_n . Уровни H_v и H_n принимаются в качестве аргументов зависимости для расхода воды, которая может быть представлена в виде уравнения

$$Q = a_0 + a_1 H_v + a_2 H_v^2 + a_3 H_n, \quad (7.18)$$

где a_0 , a_1 , a_3 – коэффициенты, определяемые методом множественной регрессии.

Нижний (сопряженный) створ должен находиться вне зоны влияния переменного подпора [6].

7.4.8 Подробный алгоритм расчета ЕРВ в условиях переменного подпора представлен в приложении К.

7.5 Гидрометрический учет стока на реках с деформирующимися руслами

7.5.1 Реки с деформирующимися руслами приурочены как правило к горным и предгорным районам. Основной чертой режима стока таких рек являются частые паводки, имеющие острые пики, которые в ряде случаев накладываются на постепенный подъем уровня, достигающий максимума к середине лета.

Деформации русла в зависимости от сочетания различных факторов могут быть периодическими или непрерывными. Периодические деформации связаны обычно с прохождением наиболее высоких паводков, а при незначительных паводках и в период межени они могут быть несущественными. В легко-деформирующихся руслах деформации могут происходить непрерывно, и лишь отличаться своей интенсивностью в различные фазы режима.

7.5.2 К ограниченным деформациям русла следует отнести периодические и однонаправленные деформации, происходящие в течение длительного времени (сезона, года). С точки зрения влияния на пропускную способность русла периодическими деформациями принято считать такие деформации по глубине и ширине русла, когда отклонения измеренных расходов воды от осредненной КР или зависимости $Q(H)$ сбалансированы по знакам и величинам; а однонаправленными – такие переформирования русла, которые ведут к полному изменению зависимости $Q(H)$, а отклонения ИРВ от ранее существовавших КР принимают устойчиво однозначный характер.

Для гидрометрических створов с ограниченными деформациями традиционно для учета стока используется метод временных кривых расходов (ВКР). В течение года допустимо строить 2-3 фазовые КР. С этой целью совокупность ИРВ разбивается по соответствующим периодам, внутри которых осуществляется аппроксимация зависимостей $Q(H)$, как показано на рисунке 7.10. По полученным уравнениям вычисляются ЕРВ в соответствующие периоды года.

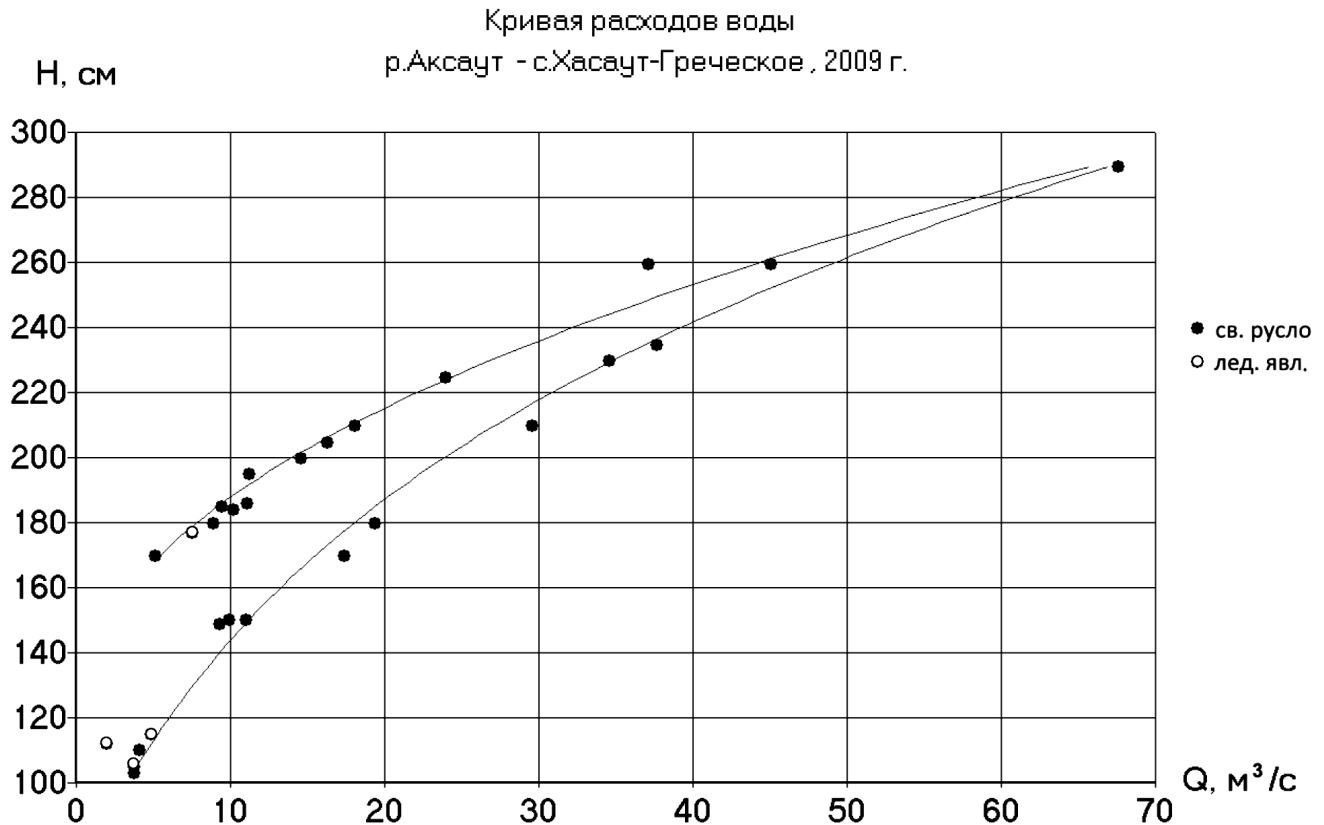


Рисунок 7.10 – Временные кривые расходов воды, ГП р. Аксаут – с. Хасаут-Греческое, 2009 год

Для приведенного на рисунке 7.10 примера получены следующие уравнения фазовых кривых расходов воды. При выполнении аппроксимации расходы воды приняты в кубических метрах в секунду, уровни воды – в метрах над «0» поста.

Для фазы подъема с 30.01 по 15.07 2009 года оптимальная аппроксимация получена при использовании метода полиномиальной регрессии с ограничениями в нижнем диапазоне уровней воды:

$$Q(H) = -9,185 + 15,537 \cdot H - 6,6914 \cdot H^2 + 3,5795 \cdot H^3, \quad (7.19)$$

при заданных ограничениях $H_n = 1,02$ м над «0» поста, $Q_n = 3,50$ м³/с, среднее квадратическое рассеяние связи составило 9,7 %.

Для фазы спада с 15.07.2009 по 26.12.2009 оптимальная аппроксимация выполнена в виде полинома:

$$Q(H) = 40,656 - 62,327 \cdot H + 24,466 \cdot H^2, \quad (7.20)$$

при заданных ограничениях $H_n = 1,69$ м над «0» поста, $Q_n = 5,20$ м³/с, среднее квадратическое рассеяние связи составило 11,1 %.

7.5.3 В случае, если число ВКР превышает три, часто оказывается, что они проводятся непосредственно по точкам ИРВ. При этом на каждую КР попадает не более пяти точек, так что не происходит достаточного сглаживания случайных погрешностей измерения расходов воды. Совпадение двух-трех случайных погрешностей ИРВ переводит их в разряд систематических, что влечет за собой завышение или занижение вычисленных ЕРВ.

7.5.4 В таких случаях для учета стока на реках с ограниченными деформациями русла следует опираться на алгоритм, описанный в 7.2. За основу гидрометрического учета стока принимается опорная КР или УР, аппроксимирующее зависимость $Q(H)$ за многолетие или за расчетный год. Оценка изменения пропускной способности русла в интервалах между измерениями осуществляется с учетом относительных отклонений (\bar{q}) ИРВ от связи $Q(H)$. Хронологическая последовательность относительных отклонений рассматривается как случайный временной ряд $\bar{q}(t)$, и к нему применяются методы выравнивания (сглаживания) и интерполяции, описанные в 7.1. Этот же способ следует использовать для расчета ЕРВ на реках с легко-деформирующимися руслами и частыми чередованиями паводков [14].

7.5.5 Для случаев, когда непрерывные деформации русла связаны с частым чередованием паводков, допускается применение способа Стаута.

При вычислении ЕРВ с использованием способа Стаута выполняются следующие операции:

1) по совокупности ИРВ рассчитывается осредняющая КР, которая аппроксимируется одним из способов, описанных в 5.1;

2) для каждого ИРВ определяется отклонение уровня ΔH как разность ординаты измеренного расхода и ординаты расхода, рассчитанного по осредняющей КР (разность между значением уровня при измерении расхода и значением уровня на осредняющей КР при таком же значении расхода).

3) последовательность отклонений ΔH наносится на хронологический график. По горизонтальной оси – даты ИРВ, по вертикальной оси – отклонения ΔH_i . Отклонение откладывается вниз (со знаком минус), если измеренный расход расположен на графике выше осредняющей КР, и вверх (со знаком плюс) в противоположном случае.

4) в интервалах между ИРВ отклонения ΔH_i определяются методом линейной интерполяции. Найденное значение ежедневной, а при необходимости и срочной, поправки ΔH_i алгебраически складывается с соответствующим среднесуточным (срочным) уровнем H_i ;

5) по исправленным среднесуточным уровням и по УР осредняющей КР определяются ежедневные расходы воды.

Следует иметь в виду, что при определении наибольших и наименьших месячных и годовых расходов воды наблюдаемые экстремальные уровни могут не отвечать экстремальным расходам, так как после исправлений указанные уровни могут утратить свое экстремальное значение.

7.5.6 Исследования показали, что наилучшие расчеты ЕРВ для рек с деформациями русла получаются при использовании метода оптимальной интерполяции относительных отклонений \tilde{q} или линейной интерполяции предварительно выравненных посредством скользящего сглаживания исходных относительных отклонений ИРВ от связи $Q(H)$. Оба указанных алгоритма интерполяции позволяют существенно снизить влияние случайных погрешностей измерения расходов воды.

В приложении Л представлена последовательность расчета ЕРВ в условиях русловых деформаций.

7.5.7 При непрерывных и интенсивных деформациях русла, приводящих к его блужданию и исчезновению видимой связи между расходом и уровнем воды и при достаточной частоте измерения расходов воды, позволяющей осветить все характерные переломы гидрографа, единственно целесообразным способом вычисления стока является интерполяция между измеренными расходами.

При том же режиме деформаций, но недостаточной частоте измерения расходов, способ интерполяции между измеренными расходами также остается единственно возможным, но результаты будут получены с заведомо пониженной точностью и могут быть представлены лишь в виде средних декадных или средних месячных значений.

7.6 Гидрометрический учет стока рек в условиях ледообразования, ледостава и таяния льда

7.6.1 Алгоритм учета стока с использованием данных о температуре воздуха

7.6.1.1 Наибольшие сложности возникают при расчете ЕРВ в весенний и осенний переходные периоды, когда измерения расходов воды практически не выполняются по соображениям техники безопасности.

7.6.1.2 К переходным периодам относятся фазы предледоставного (осеннего) ледообразования и вскрытия реки ото льда весеннего ледохода. С гидрологической точки зрения для них характерна неопределенность характеристик ПСР. С появлением ледяных образований гидравлическая система «поток – открытое русло» теряет определенность таких элементов как смоченный периметр, гидравлический радиус, шероховатость обтекаемых поверхностей и уклон свободной поверхности потока – градиент потерь энергии. При ледоходе тормозящее действие на поток оказывают забереги и льдины, остановившиеся на отмелях участках русла. Особенно сложная картина складывается при заторах, когда оценка ПСР становится крайне затрудненной. В связи с этим в эти периоды особенно необходимы измерения расходов воды, но они, как правило, не выполняются по техническим причинам и условиям безопасности.

7.6.1.3 Для вычисления стока в зимний период могут быть использованы переходные коэффициенты $K_{\text{зим}}$, как это описано в 5.2. Переходные коэффициенты для зимнего периода обозначаются $K_{\text{зим}}$ и определяются по формуле

$$K_{\text{зим}} = Q_{\text{зим}} / Q(H_{\text{и}}), \quad (7.21)$$

где $Q_{\text{зим}}$ – расход воды, измеренный при ледоставе, м³/с;

$Q(H_{\text{и}})$ – расход воды, полученный на основе КР или УР $Q(H)$ для свободного состояния русла при уровне, зафиксированном при измерении расхода воды, м³/с.

Как уже отмечалось в 5.2 переходные коэффициенты связаны с отклонениями \tilde{q} очевидным соотношением (5.5), поэтому для зимнего и переходных периодов вместо $K_{\text{зим}}$ могут быть использованы алгоритмы учета стока с использованием сглаживания и интерполяции временных рядов относительных отклонений $\tilde{q}(t)$, описанные в 7.1.

7.6.1.4 При использовании $K_{\text{зим}}$ для учета стока в зимний и переходные периоды начальное значение $K_{\text{пн}}$ (для предледоставного периода) и конечное – $K_{\text{вк}}$ (для периода вскрытия и очищения реки ото льда) при открытом русле принимаются равными единице. В граничные даты ледостава значения $K_{\text{п}}$ и $K_{\text{в}}$ устанавливаются на основе некоторых качественных соображений и даже «импровизаций», как это отмечено в работе [17].

По аналогии с коэффициентами $K_{\text{пер}}$ значения относительных отклонений (начальное $\tilde{q}_{\text{пн}}$ – для предледоставного периода и конечное $\tilde{q}_{\text{вк}}$ – для периода вскрытия и очищения реки ото льда) в режимном варианте учета стока при открытом русле принимаются равными нулю.

Промежуточные значения \tilde{q}_t в интервале от начала ледообразования до момента начала устойчивого ледостава рекомендуется оценивать с привлечением данных о дополнительном факторе – среднесуточной температуре воздуха. С физической точки зрения интенсивность ледообразования и нарастания льда в осенне-зимний период зависит от содержания в воде ледяных образований (шуги, сала, льдин). Можно принять, что их масса $\delta_{\text{н}}$ нарастает, как и толщина льда, пропорционально корню квадратному из модуля суммы отрицательных температур воздуха от начала ледообразования [18]:

$$\delta_{\text{н}} \sim (|\sum t_i|)^{0,5}. \quad (7.22)$$

В период стаивания льда этот процесс по аналогии со стаиванием наледей [19] развивается более интенсивно: уменьшение массы ледяных образований $\delta_{\text{ст}}$ происходит пропорционально сумме положительных температур воздуха

$$\delta_{\text{ст}} \sim \sum t_i. \quad (7.23)$$

7.6.1.5 Таким образом для осенне-зимнего переходного периода по данным наблюдений за температурой воздуха следует построить график связи $\tilde{q}_t = f(|\sum t_i|)^{0,5}$, а для весеннего периода стаивания график связи $\tilde{q}_t = f(\sum t_i)$.

В этом случае для расчета ЕРВ используются аналитические зависимости

$$\tilde{q}_n = \tilde{q}_{пн} - a_n \left(\left| \sum_1^{\tau} t_i \right| \right)^{0,5}, \quad (7.24)$$

$$\tilde{q}_в = \tilde{q}_{вн} + a_в \left(\sum_1^{\tau} t_i \right), \quad (7.25)$$

где \tilde{q}_n – относительное отклонение в предледоставном переходном периоде;

$\tilde{q}_{пн}$ – относительное отклонение от опорной КР последнего расхода, измеренного в период, предшествующий появлению ледяных образований;

$a_n, a_в$ – коэффициенты, полученные для зависимостей (7.24) и (7.25);

t_i – температура воздуха в i -тый день после перехода ее через нулевое значение осенью или весной;

$\tilde{q}_в$ – относительное отклонение в период весеннего стаивания;

$\tilde{q}_{вн}$ – относительное отклонение от опорной КР последнего расхода, измеренного при устойчивом ледоставе.

Для расчетов используется данные о средних суточных температурах воздуха в весенний или осенний переходные периоды.

На следующем этапе для расчета ЕРВ в переходные периоды используется формула (5.1).

7.6.2 Модель учета стока, основанная на закономерности спада зимних расходов и истощения стока

7.6.2.1 Одна из особенностей гидрографа в устойчивые зимы без оттепелей – спад расходов воды по мере убывания запасов влаги в бассейне реки. На основе этой физической тенденции построена одна из моделей гидрометрического учета стока.

7.6.2.2 Уменьшение расходов воды с наступлением межени, в том числе и зимней, происходит по экспоненциальному закону, который впервые был установлен Буссинеском как частное решение линеаризованного уравнения неустановившегося движения грунтовых вод при большой мощности водоносного пласта. В действительности же подземное питание рассредоточено по различным водоносным горизонтам, располагающимся на разных высотах (ярусах). Применительно к этим условиям кривая спада гидрографа стока эффективно описывается формулой, выведенной Буссинеском как решение нелинейного дифференциального уравнения фильтрации [20]

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + \alpha_0 T)^2}, \quad (7.26)$$

где α_0 – константа истощения грунтового питания;

T – время от начала ледовых явлений до момента расчета, сут.

7.6.2.3 На самом деле уравнение (7.26) относится к отдельному водоносному горизонту, при этом в качестве Q_0 принимается расход, при котором река переходит на подземное питание. Исследованиями ГГИ [21] на основе анализа 1500 кривых спада для 60 гидрометрических створов на реках Сибири и Дальнего Востока установлено, что величины α_0 весьма близки для различных водосборов и составляет от 0,020 до 0,040. При построении модели учета стока в качестве Q_0 принимается расход, измеренный в период открытого русла за несколько дней до появления ледяных образований. В случае если измерения не были произведены, за Q_0 следует принимать среднесуточный (ежедневный) расход воды, вычисленный по КР в день, предшествующий наступлению ледовых явлений. На практике, параметр α_0 для каждого гидрометрического створа определяется по данным прошлых лет по формуле

$$\alpha_0 = \frac{\sqrt{Q_0/Q_T} - 1}{T}, \quad (7.27)$$

где Q_0 – значение расхода в последний день открытого русла перед началом ледообразования, м³/с;

Q_T – первый ИРВ при ледоставе, м³/с;

T – время от последнего дня при свободном состоянии русла до даты первого измерения расхода воды при ледоставе, сут.

7.6.2.4 В случаях, когда в осенний переходный период удастся выполнить измерения расходов воды методом поверхностных поплавков с помощью плывущих льдин, данные измерений используются для уточнения константы истощения грунтового питания α_0 и используются для расчета ЕРВ вплоть до следующего измерения расхода воды.

Примеры расчета ЕРВ в условиях различных фаз развития ледяных образований представлены в приложении М.

7.7 Гидрометрический учет стока рек в условиях зарастания русла

7.7.1 Факторы, определяющие пропускную способность зарастающего русла

7.7.1.1 Зарастание, как фактор, влияющий на изменение ПСР – одно из наиболее распространенных явлений почти во всех климатических зонах. На территории Северо-Запада, например, около 40 % рек относятся к зарастающим.

Влияние зарастания русла водной растительностью на гидравлический режим потока сводится к тому, что развивающиеся в воде растения уменьшают площадь живого сечения потока и увеличивают местные сопротивления движению воды. При одном и том же уровне пропускная способность русла при зарастании будет меньше, чем при свободном состоянии, следовательно, точки (Q , H) измеренных при зарастании расходов будут ложиться влево относительно КР свободного русла.

Сезон зарастания (вегетации водной растительности) можно подразделить на три периода:

а) период интенсивного роста водной растительности, в течение которого влияние ее на связь между расходом и уровнем постепенно увеличивается – ПСР уменьшается;

б) период приблизительно стабильного состояния водной растительности (обычно наиболее продолжительный), в течение которого влияние ее на связь между расходом и уровнем в большинстве случаев сохраняет устойчивость, которая нарушается только при прохождении значительных паводков, когда под действием увеличившейся скорости течения растительность пригибается или укладывается на дно, а иногда может быть частично вымыта (вырвана), что приводит к увеличению ПСР;

в) период отмирания водной растительности, в течение которого влияние ее на связь между расходом и уровнем постепенно уменьшается.

Начало и конец вегетации водной растительности зависят в основном от хода температуры воды и воздуха. Как правило, начало вегетации приходится на конец спада весеннего половодья или на начало летней межени. Полное отмирание водной растительности обычно предшествует появлению первых ледообразований, а в ряде случаев завершается даже в условиях ледового режима.

Типичными для зарастающих рек (обычно малых и средних равнинных рек в районах с умеренным климатом) в сезон вегетации являются незначительные колебания расхода, нарушаемые отдельными дождевыми паводками или попусками воды из вышерасположенных водохранилищ. Величина паводков и степень их частоты могут значительно различаться в разные годы, а в отдельные годы дождевые паводки вообще могут не наблюдаться.

7.7.1.2 Традиционным и основным методом учета стока в условиях зарастающего русла является использование хронологических графиков переходных коэффициентов, как это описано в 5.2. Переходным коэффициентом при зарастании русла является, $K_{зар}$ который определяется по формуле

$$K_{зар} = Q_{зар} / Q_0(H_{и}), \quad (7.28)$$

где $Q_{зар}$ – расход воды, измеренный при ледоставе, м³/с;

$Q_0(H_{и})$ – расход воды, полученный на основе КР или УР $Q_0(H)$ для свободного состояния русла при уровне, зафиксированном при измерении расхода воды, м³/с.

Коэффициенту $K_{зар}$ приписывается роль основной характеристики ПСР, причем заведомо считается, что она снижается при зарастании, имеется в виду, что значения $K_{зар}$ при этом становятся меньше единицы ($K_{зар} < 1$). Это условие и предопределяет положение КР свободного русла $Q_0(H)$ правее точек измеренных при зарастании расходов воды.

На самом же деле положение КР $Q_0(H)$ в этой зоне всегда остается неопределенным, так как именно при зарастании русла оно не бывает свободным. КР в зоне низких уровней, при которых, собственно, и наблюдается развитие водной растительности, строят, экстраполируя верхнюю ее ветвь, полученную до начала зарастания, и она может не отражать истинных характеристик пропускной способности свободного русла. Таким образом, $K_{зар}$ в действительности является искусственной характеристикой, не отражающей реальные условия движения потока в зарастающем русле.

При большой частоте измерений расходов в период зарастания, когда все дождевые паводки освещены полностью или почти по всей амплитуде расходами, измеренными на подъеме и на спаде, и измерения в периоды длительного стояния низких уровней и малых их колебаний достаточно часты, вычисление стока производится по интерполяции между измеренными расходами.

7.7.2 Алгоритм учета стока с использованием выравнивания и интерполяции временных рядов относительных отклонений

7.7.2.1 Для расчета ЕРВ в условиях зарастания русла предпочтительным способом является метод, описанный в 7.1, когда ЕРВ рассчитываются по формуле (5.1). Для его применения необходимо получить аппроксимацию КР свободного состояния русла и аппроксимирующее ее УР по всему диапазону уровней воды. Затем по формуле (5.2) рассчитать ряд относительных отклонений ИРВ от этого УР. На рисунке 7.11 представлена зависимость расходов от уровней воды 2010 года для ГП р. Матыра – с. Крутое. Зеленым цветом на рисунке 7.11 выделены (Q, H) , измеренные в период зарастания. Годовая КР получена по данным ИРВ при свободном состоянии русла с использованием ограничений в нижнем диапазоне уровней воды, обеспечивающих ее положение правее точек ИРВ, измеренных при ледоставе и зарастании.

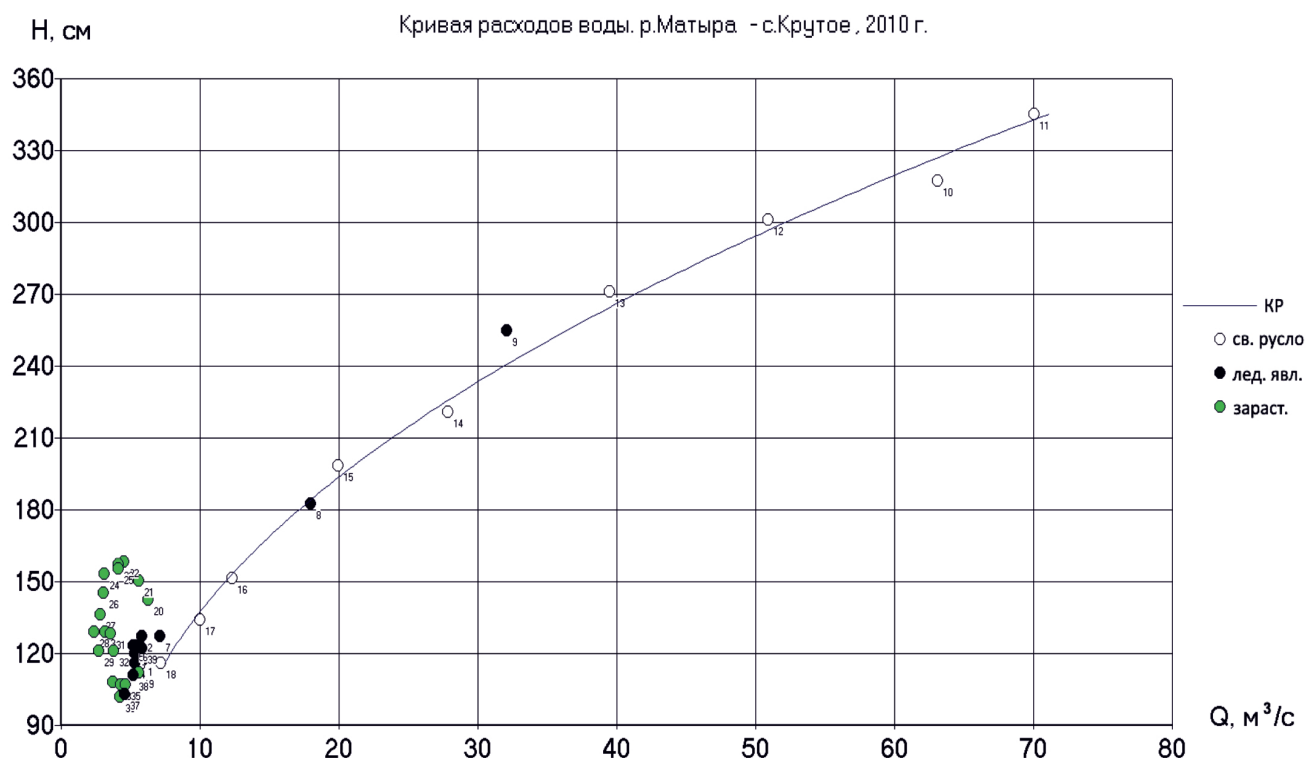
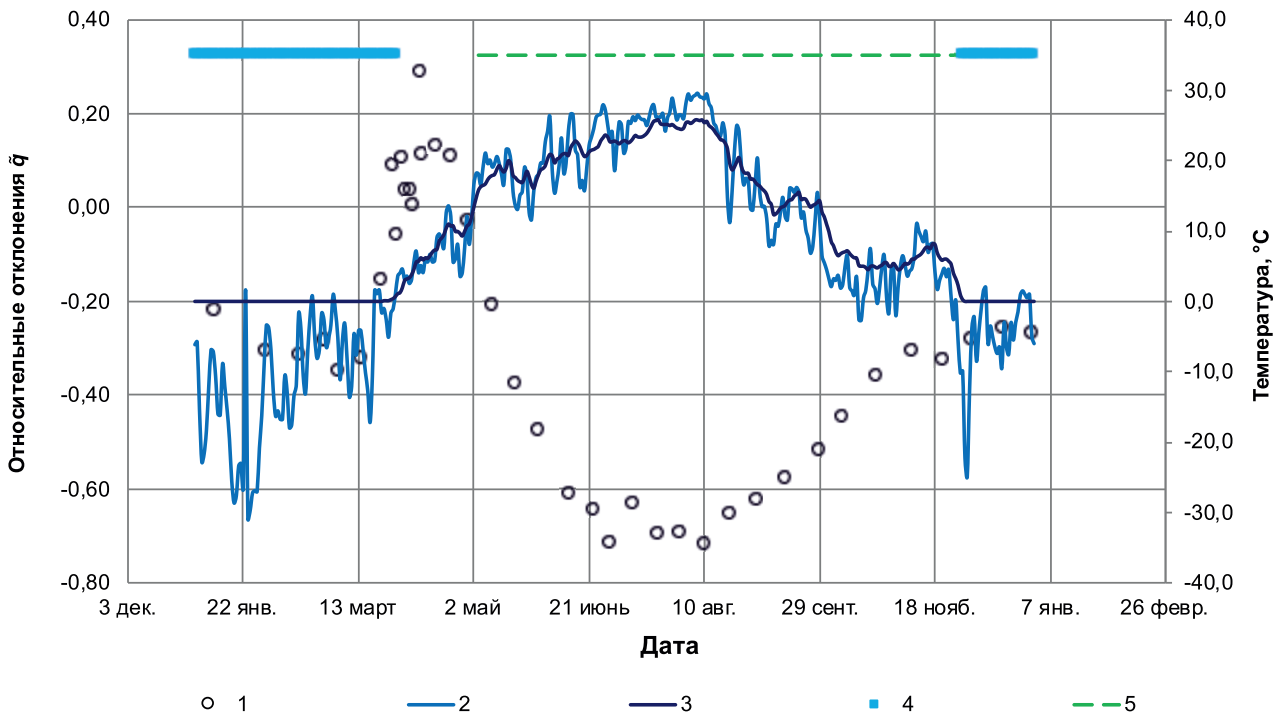


Рисунок 7.11 – Зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Матыра – с. Крутое

7.7.2.2 На рисунке 7.12 представлен совмещенный хронологический график характеристик состояния русла, хода температур воздуха и воды и характеристик изменения ПСР, выраженных относительными отклонениями $\tilde{q}(t)$ ИРВ от КР свободного состояния русла.



1 – относительные отклонения ИПВ от КР свободного русла 2010 года;
 2 – температура воздуха; 3 – температура воды; 4 – ледовые явления; 5 – зарастание русла

Рисунок 7.12 – Совмещенный хронологический график гидрометеорологических факторов и характеристик изменения ПСР, ГП р. Матыра – с. Крутое, 2010 год

Ход характеристик изменения ПСР имеет выраженный циклический характер.

Из графика на рисунке 7.12 видно, что в период с 30 апреля по 21 июня отмечается интенсивный рост водной растительности, обуславливающий уменьшение ПСР, как это описано в перечислении а) 7.7.1.1, в период с 22 июня по 21 августа наблюдается период относительной стабильности состояния водной растительности и ПСР (перечисление б) 7.7.1.1, в период с 22 августа по 18 ноября растительность постепенно отмирает (перечисление в) 7.7.1.1).

В периоды роста и отмирания растительности ряды относительных отклонений $\bar{q}(t)$ легко можно аппроксимировать с использованием формулы косинусоиды 7.1. На рисунке 7.13 показан хронологический ход относительных отклонений ИПВ от опорной КР, аппроксимированный двумя отрезками косинусоид (для периодов роста и отмирания растительности).

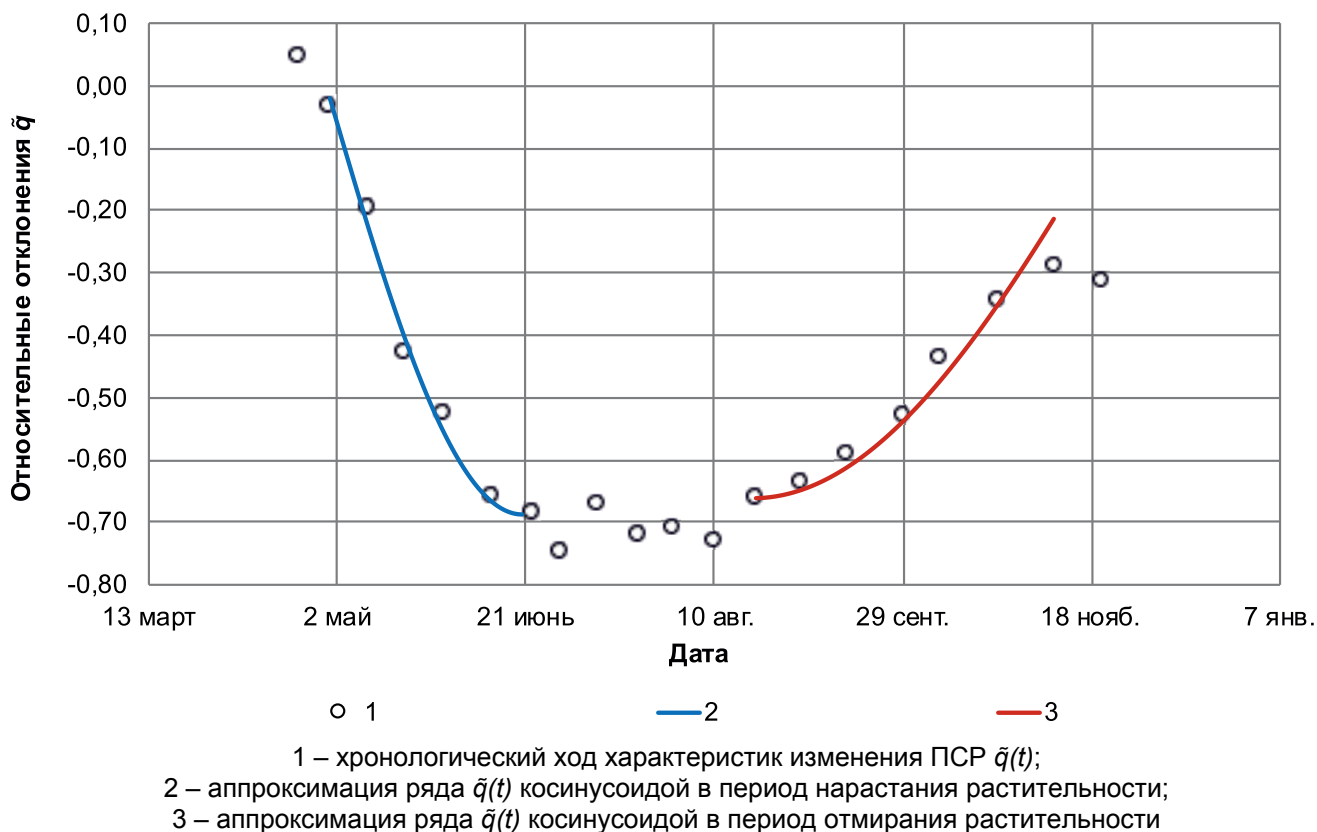


Рисунок 7.13 – Хронологический ход относительных отклонений \tilde{q} за период зарастания русла, аппроксимированный двумя отрезками косинусоид (для периодов нарастания и отмирания растительности)

По формуле (7.2) может быть вычислена АКФ для периодов роста и отмирания растительности, что позволяет использовать для расчета поправок \tilde{q}_t метод оптимальной интерполяции, изложенный в 7.1. Для периода стабильного состояния растительности поправки \tilde{q}_t вычисляются с использованием линейной интерполяции предварительно сглаженного ряда отклонений $\tilde{q}^{\wedge}(t)$. Пример расчета ЕРВ с использованием описанного алгоритма приведен в приложении Н.

7.7.3 Алгоритм учета стока в условиях зарастания русла с использованием интерполяционно-гидравлической модели

7.7.3.1 Другой способ учета речного стока в условиях зарастания русла основан на использовании интерполяционно-гидравлической модели [22], в которой в качестве характеристики изменения пропускной способности русла используется параметр Великанова m_z , который определяется непосредственно по данным совокупности ИРВ периода зарастания русла

$$m_3 = \frac{Q_3 B_3^{2/3}}{\omega_3^{5/3}}, \quad (7.29)$$

где Q_3 – расход воды, измеренный в период зарастания русла, м³/с;

B_3 – ширина русла, соответствующая измеренному расходу воды, м;

ω_3 – площадь живого сечения русла, соответствующая измеренному расходу воды, м²;

7.7.3.2 При разработке этого метода гидрометрического учета стока было использовано свойство параметра Великанова сохранять относительное постоянство при однородной шероховатости русла и малых изменениях уклонов водной поверхности независимо от колебаний расходов воды. В режимном варианте учета стока выполняется интерполяция значений «параметра Великанова» в интервалах между измерениями расходов воды.

Для расчета расхода воды Q_t в м³/с на момент времени t используется формула

$$Q_t = m_{3t} \frac{\omega_{3t}^{5/3}}{B_{3t}^{2/3}}, \quad (7.30)$$

где m_{3t} – параметр Великанова, экстраполированный на момент времени t ;

ω_{3t} – площадь поперечного сечения русла в м², полученная по зависимости $\omega_3(H)$ заросшего русла для значения уровня воды H на момент времени t ;

B_{3t} – ширина русла в м, полученная по зависимости $B_3(H)$ заросшего русла для значения уровня воды H на момент времени t .

Пример расчета ЕРВ на основе изложенной методики приведен в приложении Н.

7.8 Линейная интерполяция между измеренными расходами воды по времени

7.8.1 В отдельные периоды, когда зависимость расхода от уровня воды невозможно установить, например: в блуждающих руслах предгорных рек; в зарастающих руслах при невозможности установить закономерности изменения ПСР, в зимний и переходные периоды, когда изменения уровня не связаны с изменением водности реки, а обусловлены изменением ледовой обстановки на реке, ЕРВ $Q(T)$

вычисляются методом линейной интерполяции во времени между измеренными расходами.

7.8.2 При линейной интерполяции значение расхода на дату T , находящуюся между узлами (датами) T_i и $T_{(i+1)}$, в которые были измерены смежные расходы воды $Q_{и}(T_i)$ и $Q_{и}(T_{(i+1)})$, определяется по формуле прямой линии, соединяющей эти два соседних ИРВ

$$Q(T) = Q_{и}(T_i) + \frac{Q_{и}(T_{(i+1)}) - Q_{и}(T_i)}{T_{(i+1)} - T_i} (T - T_i). \quad (7.31)$$

7.9 Интерполяция между измеренными расходами воды с учетом хода уровня воды

7.9.1 Для каждого промежутка времени между измеренными расходами воды T_i и $T_{(i+1)}$, вычисляется параметр освещенности колебаний уровня R измерениями расхода

$$R = | (H_{(i+1)} - H_i) | / A, \quad (7.32)$$

где $H_{(i+1)}$, H_i – значения уровня воды, полученные при измерении расхода воды в дни T_i и $T_{(i+1)}$, м;

A – амплитуда колебания уровня воды в период между измерениями $Q_{и}(T_i)$ и $Q_{и}(T_{(i+1)})$, м.

7.9.2 Если полученное значение параметра освещенности уровня воды $R \geq 0,7$, ЕРВ вычисляются по формуле

$$Q(T, H_t) = Q_{и}(T_i) + \frac{Q_{и}(T_{(i+1)}) - Q_{и}(T_i)}{H_{и}(T_{(i+1)}) - H_{и}(T_i)} (H_t - H_{и}(T_i)). \quad (7.33)$$

7.10 Срезка расходов воды, рассчитанных по данным подпорных уровней воды

7.10.1 В периоды, когда наблюдались подпорные (фиктивные) уровни воды и ЕРВ рассчитаны с их использованием, необходимо выполнить срезку (корректировку)

ошибочно рассчитанных расходов воды. Срезка может быть выполнена для любого метода расчета, кроме линейной интерполяции ИРВ.

7.10.2 Для осуществления срезки необходимо выбрать срок и дату начала и срок и дату конца каждого периода, когда необходимо выполнить срезку. Предполагается, что в выбранные сроки и даты подпора уровня воды не наблюдалось.

7.10.3 Для каждого из периодов срезки производится вычисление значений срочных расходов воды методом линейной интерполяции между расходами на начало и конец заданного периода срезки.

7.10.4 Для каждого дня периода срезки значение ЕРВ вычисляется как среднее арифметическое из срочных расходов воды при двухсрочных наблюдениях за уровнем воды, или как среднее взвешенное по времени значение при многосрочных наблюдениях за уровнем воды в расчетный день.

8 Определение средних расходов воды за отчетный год

8.1 Общие положения

8.1.1 Для определения средних и характерных расходов воды используется следующая исходная информация:

- данные срочных наблюдений за уровнями воды, полученные ручным или автоматизированным способом;
- таблица ежедневных уровней воды в форме «Таблица 1.2. Уровень воды», полученная в соответствии с требованиями РД 52.08.887;
- таблица «Периоды расчета стока воды».

8.1.2 В таблицу «Периоды расчета стока воды» записываются данные о методах расчета ежедневных расходов воды в данном году, а также о периодах отсутствия стока или сведений о стоке воды. Для каждого периода указываются даты его начала и конца и метод вычисления расхода воды. Все периоды записываются в хронологическом порядке от начала до конца календарного года.

При автоматизированной обработке данных каждому методу расчета присваивается цифровой код. Пример расчета ежедневных расходов воды за весь год при использовании различных способов расчета приведен в приложении П.

Если в течение одних суток расходы подсчитывались разными способами, то дату начала и конца периодов необходимо указывать в виде месяца, числа и часа, с которого и до которого принят данный способ расчета расхода воды.

8.2 Помесячная обработка данных о расходах воды

8.2.1 В соответствии с требованиями наставлений и применяемой автоматизированной технологией обработка данных ежедневных наблюдений за стоком воды выполняется ежемесячно. По совокупности прошедших первичную обработку и рассчитанных данных о расходах воды в течение каждого месяца расчетного года должны быть определены следующие характеристики:

- средний суточный расход воды;
- наименьший расход за сутки;
- наибольший расход за сутки;
- средний декадный расход воды;
- средний месячный расход воды;
- наибольший расход за месяц, даты и число случаев его наблюдения;
- наименьший расход за месяц, даты и число случаев его наблюдения;

8.2.2 Исходной информацией для определения указанных характеристик служит таблица «Ежедневные расходы воды» в форме ТГ-3М в соответствии с РД 52.19.857. При автоматизированном расчете расходов воды, помимо таблицы ТГ-3М, для каждых суток формируются сведения о срочных расходах воды.

8.2.3 Расход может быть равен: реальному числовому значению, отсутствию стока или пропуску наблюдений, отмечаемых соответственно символами наклонная черта (/) или прочерк (–).

8.2.4 Вычисляются средние декадные, средние месячные расходы воды, средний годовой расход воды, а также объем, модуль и слой годового стока воды.

8.3 Вычисление срочных расходов воды

8.3.1 Срочные расходы воды вычисляются для всех моментов времени (в сутках), в которые был измерен уровень воды, с использованием различных, выбранных для разных расчетных периодов методов расчета стока воды.

8.3.2 При ручных измерениях уровня воды срочные значения расходов воды вычисляются для всех стандартных и учащенных сроков наблюдения за уровнем

воды или по данным об уровнях воды, снятым с ленты самописца уровня воды (СУВ); при автоматизированных – для всех сроков, измеренных с использованием АГК.

8.3.3 Срочному расходу воды присваивается признак пониженной точности, если уровень воды, по которому рассчитан срочный расход воды, имел признак пониженной точности.

8.3.4 При отсутствии стока в расчетный срок или пропуске наблюдений срочному расходу воды присваивается соответственно признак отсутствия стока или пропуска наблюдений, которые отмечаются в таблице: символами: приотсутствии стока – наклонная черта (/), при пропуске наблюдений – прочерк (–).

8.4 Вычисление средних суточных расходов воды

8.4.1 Средние суточные значения расходов воды при плавных колебаниях и отсутствии суточного хода вычисляются по средним суточным значениям уровня воды, с использованием различных, выбранных для разных расчетных периодов методов расчета стока воды.

8.4.2 При значительных суточных колебаниях среднее суточное значение расхода воды вычисляется как среднее арифметическое взвешенное по времени значение, полученное из срочных значений расходов воды по формуле

$$Q_{\text{СУТ}} = [(Q_1+Q_2)(T_2 - T_1)/2 + (Q_2+Q_3)(T_3-T_2)/2 + \dots + (Q_{(n-1)}+Q_n)(T_n - T_{(n-1)})/2]/(T_n - T_1), \quad (8.1)$$

где T_1, T_2, \dots, T_n – сроки, для которых вычислены срочные расходы воды, следующие в течение суток в хронологически возрастающем порядке;

Q_1, Q_2, \dots, Q_n – значения расхода воды в сроки T_1, T_2, \dots, T_n , м³/с.

8.4.3 При наличии для рассматриваемых суток срочных расходов, равных реальным числовым значениям и отсутствию стока, средний суточный расход вычисляется как среднее арифметическое, взвешенное по времени, по формуле (8.1). При этом срочные расходы воды в сроки с отсутствием стока, в том числе при пересыхании и промерзании, принимаются равными нулевым значениям («0»).

8.4.4 В случае, когда все срочные расходы воды равны отсутствию стока, средний суточный расход воды принимается равным отсутствию стока (пересыхание или промерзание русла соответственно).

8.4.5 Значения средних суточных расходов воды должны быть оценены по точности их расчета. Приближенными считаются такие значения расходов воды,

которые по оценке точности всех исходных данных (точности отдельных единичных измерений уровней и расходов воды, степени освещенности кривой расходов, показателей связей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$ по 6.1.8) вероятно отличаются от истинных более, чем на 10 %, но менее, чем на 20 %. Грубо приближенными значениями считаются такие, которые отклоняются от истинных, вероятно, более, чем на 20 %.

Приближенным значениям средних суточных расходов воды присваивается признак пониженной точности, Решение о том, помещать или нет в таблице ЕРВ значения расходов воды, оцененные, как грубо приближенные, принимает ответственный редактор справочника ВК. Грубо приближенные значения расходов воды в справочники ВК не помещаются, но должны обязательно сохраняться в архивах УГМС. В пояснениях к таблице «Таблица 1.3. Расход воды» приводятся сведения о расходах воды пониженной точности.

8.4.6 При автоматизированной обработке данных гидрологических наблюдений формируются таблицы наибольших и наименьших срочных расходов воды за сутки. Для среднего суточного расхода формируется признак месячного экстремума (наличия максимума или минимума) с привлечением срочных расходов воды при их наличии, при их отсутствии – по данным дат наблюдения соответственно наибольшего и наименьшего месячных расходов воды.

8.5 Вычисление средних декадных расходов воды

8.5.1 Средний декадный расход воды вычисляется как среднее арифметическое значение из суммы средних суточных расходов, деленной на число дней в декаде. Вычисление производится только при наличии для всех дней декады числовых значений среднего суточного расхода воды. При этом средние суточные расходы воды в дни с отсутствием стока, в том числе при пересыхании и промерзании, принимаются равными нулевым значениям («0»).

8.5.2 В случаях, когда для всех дней декады средний суточный расход равен признаку отсутствия стока воды (пересыхание или промерзание русла), средний декадный расход принимается равным признаку отсутствия стока воды (пересыхание или промерзание русла соответственно).

8.5.3 При наличии для дней рассматриваемой декады средних суточных расходов, равных реальным числовым значениям и отсутствию стока, средний декадный расход вычисляется как среднее арифметическое из суммы реальных

числовых значений средних суточных расходов, деленной на общее количество дней в обрабатываемой декаде.

8.5.4 Средний декадный расход воды считается пониженной точности, если более чем для трех дней декады среднесуточный расход имеет признак пониженной точности.

8.5.5 При наличии хотя бы для одного дня декады среднего суточного расхода воды, равного пропуску наблюдений, средний декадный расход принимается равным пропуску наблюдений.

8.6 Вычисление средних месячных расходов воды

8.6.1 Средний месячный расход воды вычисляется как среднее арифметическое значение из суммы средних суточных расходов, деленной на число дней в месяце. Вычисление производится только при наличии для всех дней месяца числовых значений среднего суточного расхода.

8.6.2 Когда для всех декад месяца средний декадный расход равен отсутствию стока, средний месячный расход принимается равным отсутствию стока (пересыхание или промерзание русла соответственно).

8.6.3 При наличии для дней рассматриваемого месяца средних суточных расходов, равных реальным числовым значениям и отсутствию стока, средний месячный расход вычисляется как среднее арифметическое из суммы реальных числовых значений средних суточных расходов, деленной на общее количество дней в обрабатываемом месяце.

8.6.4 При наличии хотя бы для одной из декад месяца среднего декадного расхода, равного пропуску наблюдений, средний месячный расход принимается равным пропуску наблюдений.

8.6.5 Средний месячный расход воды считается пониженной точности, если более чем для 10 % дней месяца средние суточные расходы имеют признак пониженной точности.

8.7 Вычисление среднего годового расхода воды

8.7.1 Вычисление среднего годового расхода воды производится по данным средних суточных расходов, с учетом значений средних месячных расходов воды.

8.7.2 Когда хотя бы для одного месяца средний месячный расход равен пропуску наблюдений, средний годовой расход принимается равным пропуску наблюдений.

8.7.3 Иначе средний годовой расход вычисляется как среднее арифметическое из суммы реальных числовых значений средних суточных расходов, деленной на общее количество дней в году. При этом средние суточные расходы воды в дни с отсутствием стока, в том числе при пересыхании и промерзании, принимаются равными нулевым значениям («0»).

8.7.4 Среднему годовому расходу присваивается признак пониженной точности, если 4 мес. и более средние месячные расходы имеют этот признак.

9 Формирование «Пояснений» к таблице «Расходы воды»

9.1 После таблицы «Расход вод» по постам выпуска могут быть даны «Пояснения», в которых должны быть представлены сведения о наиболее существенных особенностях водного режима рек на участках ГП в отчетном году. В «Пояснении» могут быть даны сведения для отдельных ГП или обобщены по группам постов.

9.2 «Пояснения» могут включать два раздела:

- «Краткое описание условий формирования стока»;
- «Заключение о полноте и точности учета стока».

В разделе «Краткое описание условий формирования стока» приводятся сведения о происшедших в отчетном году изменениях формирования стока и водности рек в результате хозяйственной деятельности или естественных процессов.

В разделе «Заключение о полноте и точности учета стока» приводятся сведения о неполноте учета и пониженной точности стока.

9.3 Рекомендации по подготовке материалов для «Пояснений» приведены в документе [3]. Пояснения формируются в УГМС, отвечающем за подготовку выпуска справочника ВК, на основе материалов, поступивших с ГП.

10 Гидрологический анализ сведений о стоке воды

10.1 Гидрологический анализ сведений о стоке воды (далее – анализ) выполняется после того, как будет проведен анализ сведений об уровне воды. Анализ имеет целью выявление ошибок, допущенных в процессе учета стока, которые могли бы существенно исказить естественные изменения расходов воды. Результаты анализа могут быть использованы для составления обзора режима стока воды за расчетный год и для разработки мероприятий по усовершенствованию работы сети гидрологических станций и постов, а именно, для выявления мест, в которых необходимо вновь организовать регулярный учет речного стока, и выявления малоэффективных постов, подлежащих закрытию.

Самой простой формой текущего анализа результатов гидрологических наблюдений одного поста является сопоставление и анализ хронологических графиков уровней и расходов воды, а также метеоэлементов (температуры воздуха и атмосферных осадков), состояния водного объекта и толщины льда в зимний период, представленных на комплексном графике (см. рисунок 5.3). Следующим этапом является анализ результатов вычисления стока для нескольких постов совместно за один расчетный год по данным полученных таблиц ЕРВ.

10.2 Заключительным этапом является анализ многолетнего ряда сведений о стоке воды для одного поста и для нескольких постов совместно по данным таблиц ОГХ. Заключительный анализ выполняется, как правило, редактором справочника водного кадастра в отделе гидрологии УГМС, но может быть поручен и специалисту-гидрологу сетевого подразделения гидрологической сети, выполняющему расчет стока воды при подготовке таблиц справочников водного кадастра.

Для выполнения анализа необходимо иметь в распоряжении, по возможности, достаточно подробные и последние сведения по гидрографии бассейнов, сведения, освещающие водное хозяйство и вообще использование вод, географические характеристики водосборов – сведения о почвах, рельефе, растительности и т. п.

Особое внимание следует уделять сбору и ежегодному пополнению сведений о водохозяйственном использовании рек в данном бассейне, характере и интенсивности этого использования с точки зрения его влияния на природный режим.

10.3 Анализ сведений о стоке воды в связи с составлением таблицы ЕРВ рекомендуется начать с построения гидрографов. В первую очередь следует построить гидрографы для постов, расположенных на одной реке. Гидрографы

строятся для каждых 3–5 постов совмещенно, т. е. на одной общей оси времени и в одном масштабе расхода воды по оси ординат. Бывает полезно на совмещенные гидрографы нанести в том же масштабе значения измеренных расходов воды [1], как показано на рисунке 10.1.

При большой амплитуде расходов воды для удобства анализа масштаб расходов воды может быть принят разным: более мелким – для периода половодья и более крупным – для зимней и летней межени. На рисунке 10.2 показаны совмещенные гидрографы р. Кубань с разными масштабами для периодов пониженной и повышенной водности. При выполнении анализа совмещенных гидрографов по постам следует обращать внимание на случаи несогласованности хода расходов воды, которые дают первую ориентировку для выявления ошибок, допущенных в процессе учета стока, и позволяют выявить характерные черты режима отдельных рек.

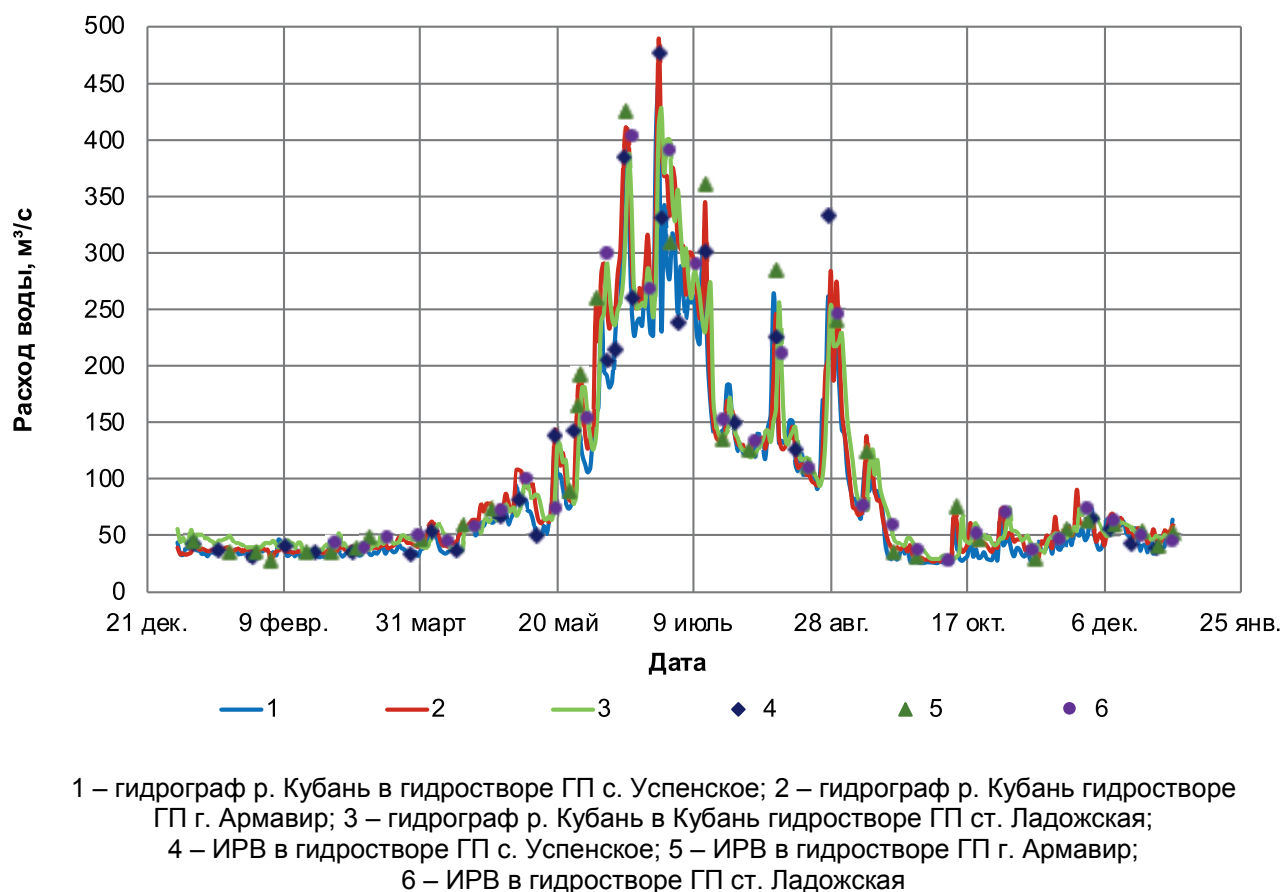
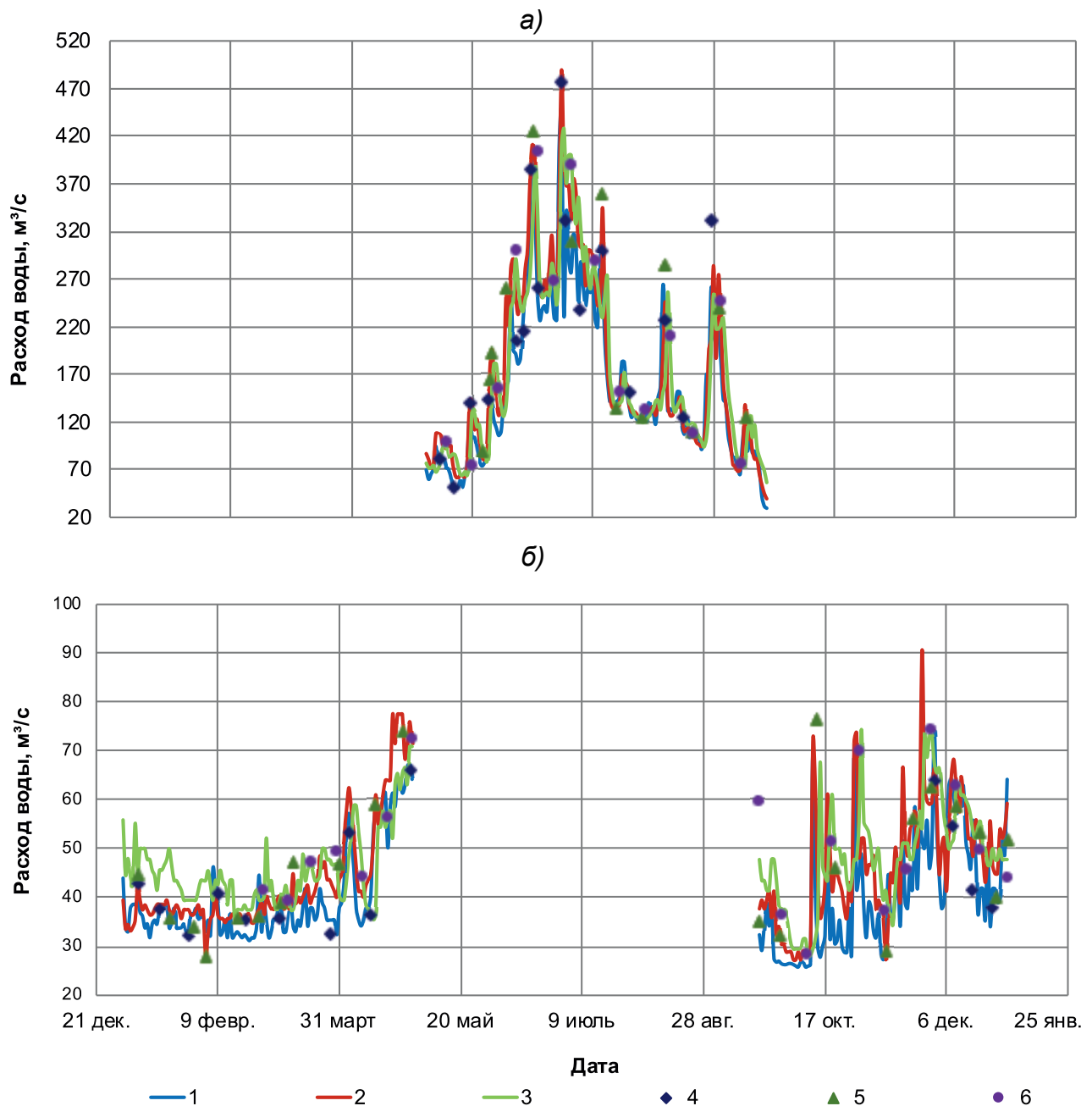


Рисунок 10.1 – Совмещенные гидрографы р. Кубань в гидропостях ГП Успенское, Армавир и Ладожская с нанесенными ИРВ, 1999 год



а) – Совмещенные гидрографы периода повышенной водности (с 01.05 по 19.09);

б) – Совмещенные гидрографы периодов пониженной водности

- 1 – гидрограф р. Кубань в гидростворе ГП с. Успенское; 2 – гидрограф р. Кубань гидростворе ГП г. Армавир; 3 – гидрограф р. Кубань в Кубань гидростворе ГП ст. Ладожская;
 4 – ИРВ в гидростворе ГП с. Успенское; 5 – ИРВ в гидростворе ГП г. Армавир;
 6 – ИРВ в гидростворе ГП ст. Ладожская (с 01.01 по 30.04, с 20.09 по 31.12)

Рисунок 10.2 – Совмещенные гидрографы р. Кубань в гидростворах ГП Успенское, Армавир и Ладожская с нанесенными ИРВ и разными масштабами для периодов пониженной и повышенной водности, 1999 год

10.4 Для контроля надёжности данных о стоке воды следует осуществлять его увязку по длине рек, т.е. сопоставление осреднённых за определённые расчётные периоды расходов воды на смежных гидрологических постах (в смежных гидростворах). В результате увязки устанавливается соответствие данных расчета стока воды в этих гидростворах с учётом различных факторов, обуславливающих изменение водности по длине реки.

10.4.1 При достаточно полном и надёжном учёте потерь и приращений стока на расчетном участке увязка месячных и годовых расходов воды выполняется на основе русловых водных балансов (РВБ). Под РВБ понимается количественное соотношение между поступлением воды в русло и потерями (изъятиями) её на участках рек, ограниченных ГП, на которых учитывается сток [23].

Составление РВБ позволяет выявить невязки стока между гидростворами и оценить надёжность его учёта. В случае, если невязки стока превышают допустимые значения, данные расчета стока воды необходимо провести дополнительный анализ, а именно: проверить достоверность исходных данных об уровнях и расходах воды и оценить правильность выбора расчётного метода.

РВБ составляется за декадные, месячные и годовые интервалы времени.

10.4.2 При составлении РВБ должен быть учтён полный комплекс его приходных и расходных составляющих – гидрометрических, гидрогеологических и гидрофизических, т.е. использовано уравнение детального РВБ. К основным его элементам относятся (в м³/с):

- приток и отток воды в ограничивающих створах (верхнем – Q_v и нижнем – Q_n);
- поступление воды из боковых притоков (по гидрометрическим данным – $Q_{бп.г}$ и неизученных рек, т.е. расчётный боковой приток $Q_{бп.р}$);
- расходы водозаборов и сбросов ($Q_{вз}$, $Q_{сб}$);
- отток воды из русла и приток подземных вод ($Q_{бр}$ – береговое регулирование, $Q_{ф}$ – фоновый отток или приток);
- водообмен между земной поверхностью и атмосферой (поступление воды от осадков – $Q_{ос}$);
- испарение с водного зеркала и транспирация воды растительностью в пределах поймы ($Q_{ит}$);
- накопление и расходование воды в русле при подъёме и спаде уровня ($Q_{р.р}$).

С учётом всех указанных элементов уравнение РВБ имеет вид

$$Q_o = Q_n - Q_v - Q_{бп.г} - Q_{бп.р} + Q_{вз} - Q_{сб} + Q_{ит} - Q_{ос} \pm Q_{рр} \pm Q_{бр} \pm Q_{ф}, \quad (10.1)$$

где Q_0 – остаточный член уравнения, являющийся совокупным выражением погрешности расчёта всех известных элементов и недоучёта неизвестных составляющих РВБ, м³/с.

В ряде случаев при отсутствии гидрофизической и гидрогеологической информации или при пренебрежимо малых значениях соответствующих элементов можно ограничиться гидрометрическим РВБ, составляемым по уравнению

$$Q_0 = Q_n - Q_v - Q_{\text{бп.г}} - Q_{\text{бп.р}} + Q_{\text{вз}} - Q_{\text{сб}} \pm Q_{\text{рр}}. \quad (10.2)$$

10.4.2.1 В качестве Q_v и Q_n принимаются осредненные за расчетные интервалы (декада, месяц, год) значения расходов воды соответственно в верхнем и нижнем створах, ограничивающих расчетный участок (см. 8.5, 8.6, 8.7).

10.4.2.2 Расчет естественного бокового притока при наличии гидрометрических наблюдений производится по формуле

$$Q_{\text{бп.г}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i, \quad (10.3)$$

где Q_i – средние за принятый интервал времени расходы воды на приустьевых участках отдельных притоков – рек, ручьев и логов, полученные по данным измерений.

Точность расчета $Q_{\text{бп.г}}$ по формуле (10.3) зависит от точности определения суммируемых расходов воды и вычисляется по формуле

$$\delta_{\text{бп.г}} = \frac{1}{Q_{\text{бп.г}}} \sqrt{(\delta_1 Q_1)^2 + (\delta_2 Q_2)^2 + \dots + (\delta_n Q_n)^2} = \frac{1}{Q_{\text{бп.г}}} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i Q_i)^2}, \quad (10.4)$$

где δ_i – относительные средние квадратические погрешности определения соответствующих расходов.

10.4.2.3 В случае отсутствия гидрометрических наблюдений на отдельных притоках расчет естественного бокового притока $Q_{\text{бп.р}}$ осуществляется с использованием среднего арифметического модуля расходов рек-аналогов

$$Q_{\text{бп.р}} = \frac{1}{n} \left(\frac{Q_1}{F_1} + \frac{Q_2}{F_2} + \dots + \frac{Q_n}{F_n} \right) F, \quad (10.5)$$

где Q_1, Q_2, Q_n – средние расходы рек-аналогов за расчетные интервалы времени, м³/с;

F_1, F_2, F_n – площади водосборов этих рек до расчетных гидрометрических створов, км²;

n – число рек-аналогов;

F – суммарная площадь водосборов неизученных боковых притоков на рассматриваемом участке реки, км².

10.4.2.4 При наличии в пределах расчетного участка водозаборов и сбросов воды для их учета применяются следующие способы:

а) гидравлические, основанные на определении пропускной способности регулирующих, водозаборных и сбросных сооружений по данным расчета или тарировки для различных схем истечения из отверстий или через водосливы и лотки, в том числе через расходомеры и контрольные сечения;

б) приборные, с установкой различных расходомеров в трубопроводах насосных станций;

в) русловые, с использованием кривых расходов воды или поправок к уровню;

г) расчетные, по производительности насосных станций и удельным затратам электроэнергии, по затратам воды на единицу выпускаемой продукции.

Относительные средние квадратические погрешности определения суммарных величин водозабора $Q_{вз}$ и сброса $Q_{сб}$ вычисляются по формулам

$$\bar{\delta}_{вз} = \frac{1}{Q_{вз}} \sqrt{\sum_{k=1}^{k=n} (\bar{\delta}_{вз.к}, Q_{вз.к})^2}, \quad (10.6)$$

$$\bar{\delta}_{сб} = \frac{1}{Q_{сб}} \sqrt{\sum_{k=1}^{k=n} (\bar{\delta}_{сб.к}, Q_{сб.к})^2}, \quad (10.7)$$

где $Q_{вз.к}, Q_{сб.к}$ – соответственно расходы водозаборов и сбросов воды по отдельным каналам (коллекторам), м³/с, определяемые с относительными погрешностями $\bar{\delta}_{вз.к}, \bar{\delta}_{сб.к}$;

n – число каналов (коллекторов).

10.4.2.5 В балансе речных вод при прохождении паводков существенную роль играет русловое регулирование – накопление воды в русле и на пойме, а также в водохранилищах при подъеме уровня и отдача ее при спаде. С удлинением расчетного периода до года величины руслового регулирования приближаются к нулю.

Расчет руслового регулирования $Q_{р.р}$, м³/с, производится по формуле

$$Q_{p.p.} = -\frac{\Delta W}{86400 \cdot T}, \quad (10.8)$$

где ΔW – изменение объема на участке реки, м³;

T – расчетный интервал времени, сут.

Изменение объема воды ΔW на участке вычисляется по формуле

$$\Delta W = \frac{\Delta\omega_{\text{в}} + \Delta\omega_{\text{н}}}{2} \cdot L, \quad (10.9)$$

где $\Delta\omega_{\text{в}}$ и $\Delta\omega_{\text{н}}$ – изменения площадей водных сечений соответственно в верхнем и нижнем створах участка, м²;

L – длина участка, м.

Относительную среднюю квадратическую погрешность расчета руслового регулирования следует принимать равной 20 %.

10.4.3 Случайные погрешности вычисления Q_0 за расчетный период (декада или месяц отдельно взятого года, год) оцениваются методом частных погрешностей.

Суммарная погрешность определения учтенных элементов при этом равна

$$\sigma_{oi} = \sqrt{\sum_{k=1}^n \sigma_k^2}, \quad (10.10)$$

где $\sum_{k=1}^n \sigma_k^2$ – суммарная дисперсия погрешностей определения учтенных элементов, включая и сток воды.

Случайные погрешности определения стока воды в замыкающих створах оцениваются по данным о частоте и точности измерения расходов воды в гидростворе. Однако в практике гидрометрии встречаются систематические погрешности учёта стока, значительно превышающие случайные. Выявление именно этих погрешностей и может быть осуществлено с помощью РВБ.

До последующего анализа назначается доверительный интервал для предельного значения погрешности определения остаточного члена Q_0 с вероятностью непревышения $P = 95\%$.

$$m_{oi} = \pm 1,96 \sigma_{oi} \quad (10.11)$$

Значения σ_{oi} и m_{oi} определяются за каждый i -тый интервал и сравниваются с Q_{oi} .

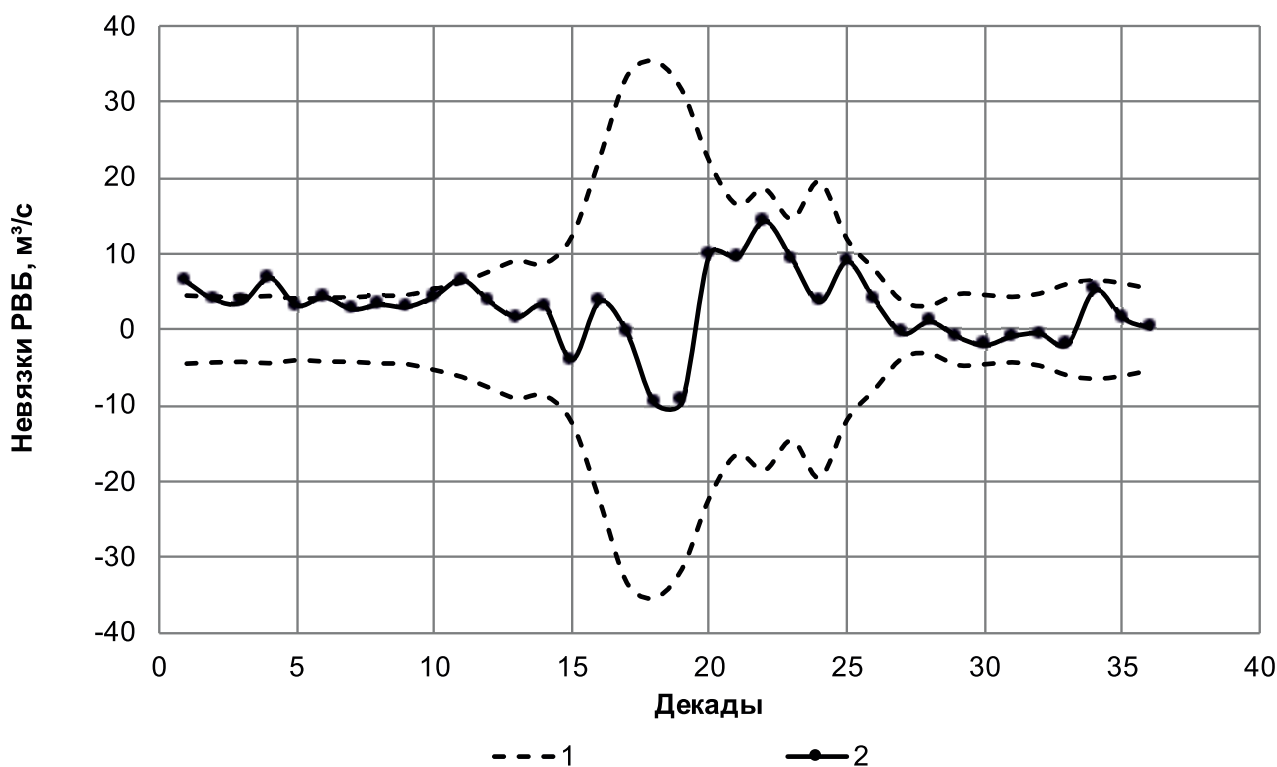
Если справедливо соотношение

$$Q_{oi} \leq m_{oi}, \quad (10.12)$$

невязка РВБ не значима, т. е. соизмерима с погрешностью расчёта [23].

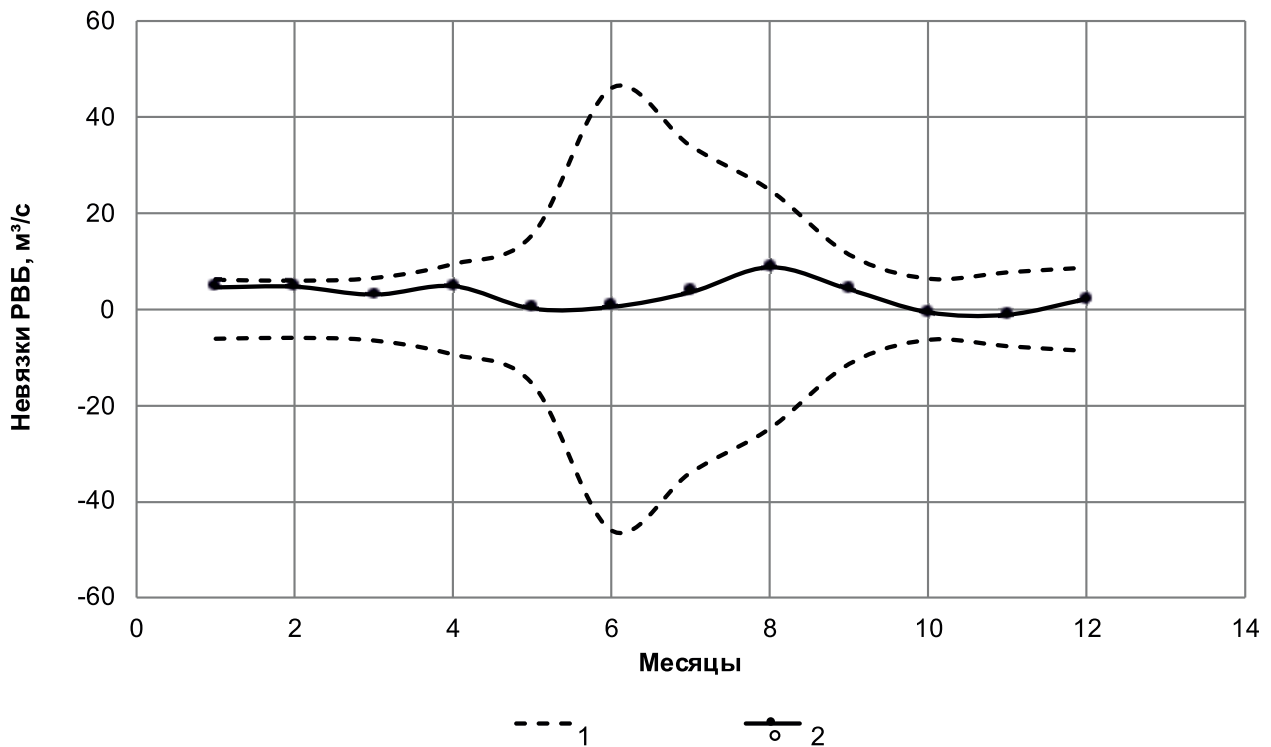
На рисунках 10.3 и 10.4 представлены графики хронологического хода невязок РВБ на участке р. Кубань от ГП с. Успенское до ГП г. Армавир за 1999 год за декадные и месячные интервалы, соответственно. Линией 1 на рисунках 10.3 и 10.4 показан доверительный интервал для предельного значения погрешности определения остаточного члена Q_o . Ход невязки РВБ Q_o показан линией 2.

Графическое представление невязок РВБ позволяет выявить периоды, когда критерий (10.12) нарушался. Из графика 10.3 видно, что значение остаточного члена РВБ превышает допустимую невязку в первой и четвертой декадах 1999 года.



1 – допустимая невязка РВБ; 2 – остаточные члены декадных РВБ

Рисунок 10.3 – Хронологический ход невязок декадных РВБ на участке р. Кубань от ГП с. Успенское до ГП г. Армавир за 1999 год



1 – допустимая невязка РВБ; 2 – остаточные члены декадных РВБ

Рисунок 10.4 – Хронологический ход невязок месячных РВБ на участке р. Кубань от ГП с. Успенское до ГП г. Армавир за 1999 год

При несоблюдении критерия (10.12) могут быть сделаны два предположения:

а) невязка РВБ объясняется физическими причинами, т. е. недоучётом одного или нескольких элементов. В этом случае производится анализ Q_{oi} путём сопоставления графиков его хода по месяцам Q_{ot} за весь расчётный период, включая и осреднённый. На графики наносятся все элементы РВБ. Если окажется, что изменение невязки РВБ в течение года имеет определённую тенденцию, сохраняющуюся в течение ряда лет, и соответствует изменению какого-либо элемента РВБ, в этом случае устанавливаются связи $Q_o(x)$, т.е. неучтённого элемента РВБ от определяющего его фактора. Например, неучтённый боковой приток может быть получен по связи со стоком изученных лет. Указанные зависимости могут быть представлены как в графической, так и в аналитической форме. При их достаточной надёжности элемент, не входящий ранее в баланс, должен быть определён за весь расчётный период и введён в уравнение РВБ. Если, например, невозможно построить связи с элементами РВБ антропогенного характера (заборы, сбросы воды) и известно, что при неполных и малонадёжных данных вариации $Q_{вз}$ и $Q_{сб}$ по годам невелика, целесообразно вычислить осреднение по месяцам или фазам за весь расчётный период n лет значения Q_x ,

включающие и неучтённое водопотребление. Вычисленные таким образом значения Q_x учитываются за каждый месяц. Уточнённые остаточные члены уравнения РВБ вновь сравниваются с предельной погрешностью их расчёта m_{oi} ;

б) если после детализации уравнения РВБ в отдельные интервалы времени вновь не соблюдается критерий (10.12), делается вывод о пониженной точности учёта стока в указанные интервалы и необходимости его корректировки.

Заключение о ненадёжности данных о стоке в ограничивающих или замыкающих створах крупных боковых притоков правомерно лишь в том случае, если учтены все основные составляющие РВБ.

Выявление конкретного гидроствора с пониженной точностью учёта стока возможно при последовательном сопоставлении Q_0 по нескольким участкам на одной реке [19].

10.4.4 Пример анализа надёжности гидрометрического учета стока на основе составления РВБ приведен в приложении Р.

Приложение А
(обязательное)

**Алгоритмы аппроксимации зависимостей расходов
и элементов руслового потока от уровней воды**

А.1 Алгоритм I. Аппроксимация зависимости $Q(H)$ параболой Глушкова

А.1.1 Предложенная В. Г. Глушковым аналитическая форма аппроксимации КР имеет вид

$$Q(H) = a (H - H_0)^b, \quad (\text{A.1})$$

где Q – расход воды, м³/с;

H – наблюдаемый уровень воды, м;

H_0 – уровень, при котором расход воды в исследуемом гидростворе равен нулю, м;

a и b – параметры УР, определяемые по данным измерений.

А.1.2 Для получения параметров a и b выражение (А.1) преобразуется к логарифмическому виду

$$\ln(Q) = \ln(a) + b \ln(H - H_0). \quad (\text{A.2})$$

А.1.3 Параметры $\ln(a)$ и b уравнения (А.2) получают методом наименьших квадратов (МНК) на основе совокупности ИРВ. К преобразованным переменным $Y = \ln(Q)$ и $X = (H - H_0)$ подбирается аппроксимирующий полином первой степени в виде

$$Y = a_0 + a_1 X. \quad (\text{A.3})$$

Затем уравнение вновь преобразуют к виду (А.1), в котором параметр $a = \exp(a_0)$, а показатель степени $b = a_1$. Здесь a_0 и a_1 – коэффициенты уравнения (А.3), полученные с использованием МНК.

А.1.4 Установление уровня нулевого расхода H_0 затруднено и требует дополнительных морфометрических данных, поэтому величина H_0 на практике определяется методом решения оптимизационной задачи, т. е. принимается такое значение H_0 , при котором рассеяние связи $Q(H)$ наименьшее. При расчетах следует задавать диапазон изменения H_0

$$H_{\text{низш}} - h_{\text{макс}} \leq H_0 \leq H_{\text{низш}}, \quad (\text{A.4})$$

где $H_{\text{низш}}$ – значение низшего наблюдаемого уровня воды, м;

$h_{\text{макс}}$ – значение максимальной глубины потока, м.

Выбирается значение H_0 , отвечающее лучшим характеристикам аппроксимации связи $Q(H)$: наименьшему стандарту рассеяния и наибольшему значению множественного коэффициента корреляции. Значения параметров УР оцениваются при использовании МНК.

А.1.5 Парабола Глушкова не всегда пригодна для аппроксимации КР во всем диапазоне изменения уровня воды. Но в отдельных гидрометрических створах с правильной параболической формой поперечного сечения при отсутствии выраженного изменения крутизны боковых склонов русла по всей амплитуде колебания уровней воды аппроксимация $Q(H)$ в виде уравнения (А.1) может давать хорошие результаты.

А.2 Алгоритм II. Аппроксимация методом полиномиальной регрессии

А.2.1 В соответствии с алгоритмом II КР представляется в виде уравнения

$$Q = a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_mH^m, \quad (\text{А.5})$$

где a_0, \dots, a_m – параметры УР, определяемые по данным измерений.

Использование при аппроксимации КР степеней полинома вида (А.4) выше 4-ой приводит, как правило, к плохой обусловленности матрицы (H, H^m) , что многократно увеличивает погрешности расчета параметров УР.

А.2.2 Параметры УР вида (А.4) определяются с использованием МНК для полиномов 2, 3, 4-й степени, а также неполных многочленов, например:

$$\begin{aligned} Q &= a_0 + a_1H^2 + a_2H^3; \\ Q &= a_0 + a_1H + a_2H^3 \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (\text{А.6})$$

Для аппроксимации выбирается уравнение, удовлетворяющее критериям качества, приведенным в 5.4.5, 5.4.7.

А.2.3 Исследования показывают, что уравнение вида (А.5) применимо для аппроксимации связи $Q(H)$ лишь в ограниченном числе случаев (например, в маловодные годы). В случаях, когда не удастся получить приемлемую аппроксимацию КР методом обычной полиномиальной регрессии, следует использовать другие способы, например, полиномиальную регрессию с ограничениями или кусочно-полиномиальную регрессию.

А.3 Алгоритм III. Аппроксимация зависимости $Q(H)$ методом полиномиальной регрессии с введением ограничений в экстремальных точках амплитуды уровня воды

А.3.1 В некоторых случаях полиномиальная регрессия в любом виде оказывается неудовлетворительной для представления связи $Q(H)$, что обнаруживается при анализе остатков регрессии. Известно, что измерения расходов воды распределены, как правило, более или менее равномерно во времени. Более частые измерения проводятся лишь при прохождении паводков и весеннего половодья. Поэтому оказывается, что большая часть измерений приурочена к срединной и нижней частям диапазона изменения уровня. При использовании метода взвешенной регрессии расходам воды, измеренным в средней и нижней частях амплитуды уровня, придается больший вес при недооценке расходов, измеренных при высоких уровнях. Это приводит к тому, что аппроксимирующая кривая в верхней части может вообще пройти мимо точек измерения, и метод взвешенной регрессии оказывается неприемлемым.

А.3.2 Для того, чтобы получить удовлетворительную аппроксимацию во всем диапазоне изменения уровней воды, а также для выполнения условия выпуклости кривой $dQ/dH > 0$ предлагается использовать метод кусочно-полиномиальной регрессии и его частный случай – метод полиномиальной регрессии с заданием ограничений на значение функции и ее производных в точке одного из экстремумов аргумента. В соответствии с этим способом расчеты выполняются по следующему алгоритму.

Первоначально для аппроксимирующей функции задаются ограничения в точке одного из наблюдаемых экстремумов уровня воды (для КР расходов – в точке низшего наблюдаемого уровня воды, для кривых площадей и средних скоростей течения – наивысшего наблюдаемого уровня воды). Для этого необходимо установить положение кривой расходов в нижней, а кривых площадей и средних скоростей течения в верхней частях диапазона изменения уровня воды. Это может быть выполнено посредством графической или аналитической аппроксимации (с использованием МНК) данных ИРВ в ограниченном диапазоне изменения уровней воды. Оценку граничных значений рекомендуется производить по данным многолетних измерений. Чем больше ИРВ в нижней части КР будет использовано для определения граничного условия, тем с меньшей погрешностью будет определено положение КР при $H_{\text{низш}}$.

Для оценки $Q_{\text{гр}}$ желательно получить уравнение аппроксимирующей кривой в виде алгебраического полинома, что облегчает вычисление граничных условий: значений расхода воды и производных функции $Q(H)$ в точке низшего наблюдаемого уровня воды. Аппроксимирующая функция, удовлетворяющая заданным ограничениям, записывается в следующем виде

$$Q(H - H_{\text{низш}}) = \mu(H) + \nu(H) g(H - H_{\text{низш}}), \quad (\text{A.7})$$

где $\mu(H)$ – полином, отвечающий заданным ограничениям;

$\nu(H)$ – зануляющий полином, гарантирующий выполнение заданных ограничений;

$g(H)$ – полином, подбираемый методом наименьших квадратов.

В порядке первого приближения первым двум полиномам придается вид

$$\mu(H) = Q(H_{\text{низш}}) = \text{const}, \quad (\text{A.8})$$

$$\nu(H) = H - H_{\text{низш}}. \quad (\text{A.9})$$

А.3.3 Подбор аналитической формы полинома $g(H)$ производится на основе МНК с учетом тех же критериев качества, которые описаны выше. При этом предварительно осуществляется преобразование исходных данных об ИПВ следующим образом

$$Y_i = \frac{Q_{\text{и}i} - Q(H_{\text{низш}})}{H_{\text{и}i} - H_{\text{низш}}}, \quad (\text{A.10})$$

где $Q_{\text{и}i}$ – i -тый измеренный расход воды;

$H_{\text{и}i}$ – соответствующий ему уровень воды.

Таким образом, в ЭВМ вводится совокупность исходных данных в виде Y_i и соответствующих им переменных $X = (H_{\text{и}i} - H_{\text{низш}})$.

А.3.4 После подбора полином $g(H)$ приобретает окончательный вид уравнения для всего диапазона уровней воды

$$Q(H) = Q(H_{\text{низш}}) + (H - H_{\text{низш}})(a_0 + a_1(H - H_{\text{низш}}) + a_2(H - H_{\text{низш}})^2 + \dots + a_m(H - H_{\text{низш}})^m). \quad (\text{A.11})$$

А.3.5 Расчет коэффициентов уравнения при использовании метода полиномиальной регрессии с ограничениями выполняется по следующим алгоритмам:

а) расчет коэффициентов аппроксимирующего уравнения при подборе по МНК полинома первой степени выполняется по формулам, приведенным ниже.

По совокупности преобразованных по формуле (А.10) переменных Y_i совокупности переменных $X_i = (H_{\text{и}i} - H_{\text{низш}})$ с использованием МНК подбирается полином в виде

$$Y_i(H) = a_0 + a_1 X_i. \quad (\text{A.12})$$

Дисперсии коэффициентов уравнения регрессии (А.12) $\sigma_{a_i}^2$, $\sigma_{a_j}^2$ вычисляются по формулам МНК [8].

Расчетное уравнение для $Q(H)$ записывается в виде

$$Q(H) = Q(H_{\text{низш}}) + (H - H_{\text{низш}})(a_0 + a_1(H - H_{\text{низш}})) \quad (\text{A.13})$$

или

$$Q(H) = b_0 + b_1H + b_2H^2, \quad (\text{A.14})$$

где

$$b_0 = Q(H_{\text{низш}}) - a_0 H_{\text{низш}} + a_1 H_{\text{низш}}^2; \quad (\text{A.15})$$

$$b_1 = a_0 - 2a_1 H_{\text{низш}}; \quad (\text{A.16})$$

$$b_2 = a_1. \quad (\text{A.17})$$

Дисперсии коэффициентов расчетного уравнения (A.14) вычисляются по формулам (A.18) – (A.20).

$$\sigma_{b_0}^2 = H_{\text{низш}}^2 \sigma_{a_0}^2 + H_{\text{низш}}^4 \sigma_{a_1}^2; \quad (\text{A.18})$$

$$\sigma_{b_1}^2 = \sigma_{a_0}^2 + 2H_{\text{низш}}^2 \sigma_{a_1}^2; \quad (\text{A.19})$$

$$\sigma_{b_2}^2 = \sigma_{a_1}^2. \quad (\text{A.20})$$

б) расчет коэффициентов аппроксимирующего уравнения при подборе по МНК полинома второй степени выполняется по формулам, приведенным ниже.

По совокупности преобразованных по формуле (A.10) переменных Y_i совокупности переменных $X_i = (H_{i_i} - H_{\text{низш}})$ с использованием МНК подбирается полином в виде

$$Y_i(H) = a_0 + a_1 X_i + a_2 X_i^2. \quad (\text{A.21})$$

Окончательно расчетное уравнение для $Q(H)$ записывается в виде

$$Q(H) = Q(H_{\text{низш}}) + (H - H_{\text{низш}})(a_0 + a_1(H - H_{\text{низш}}) + a_2(H - H_{\text{низш}})^2) \quad (\text{A.22})$$

или

$$Q(H) = b_0 + b_1H + b_2H^2 + b_3H^3, \quad (\text{A.23})$$

где

$$b_0 = Q(H_{\text{низш}}) - a_0 H_{\text{низш}} + a_1 H_{\text{низш}}^2 - a_2 H_{\text{низш}}^3; \quad (\text{A.24})$$

$$b_1 = a_0 - 2a_1 H_{\text{низш}} + 3a_2 H_{\text{низш}}^2; \quad (\text{A.25})$$

$$b_2 = a_1 - 3a_2 H_{\text{низш}}; \quad (\text{A.26})$$

$$b_3 = a_2. \quad (\text{A.27})$$

Дисперсии коэффициентов расчетного уравнения (A.23) вычисляются по формулам (A.28) – (A.31).

$$\sigma_{b_0}^2 = H_{\text{низш}}^2 \sigma_{a_0}^2 + H_{\text{низш}}^4 \sigma_{a_1}^2 + H_{\text{низш}}^9 \sigma_{a_2}^2; \quad (\text{A.28})$$

$$\sigma_{b_1}^2 = \sigma_{a_0}^2 + 2H_{\text{низш}}^2 \sigma_{a_1}^2 + 3H_{\text{низш}}^4 \sigma_{a_2}^2; \quad (\text{A.29})$$

$$\sigma_{b_2}^2 = \sigma_{a_1}^2 + 3H_{\text{низш}}^2 \sigma_{a_2}^2; \quad (\text{A.30})$$

$$\sigma_{b_3}^2 = \sigma_{a_2}^2. \quad (\text{A.31})$$

А.3.6 Дополнительно качество аппроксимации $Q(H)$, $V(H)$, $\omega(H)$ оценивается на основе анализа графиков остатков регрессии, показанных на рисунке А.1.

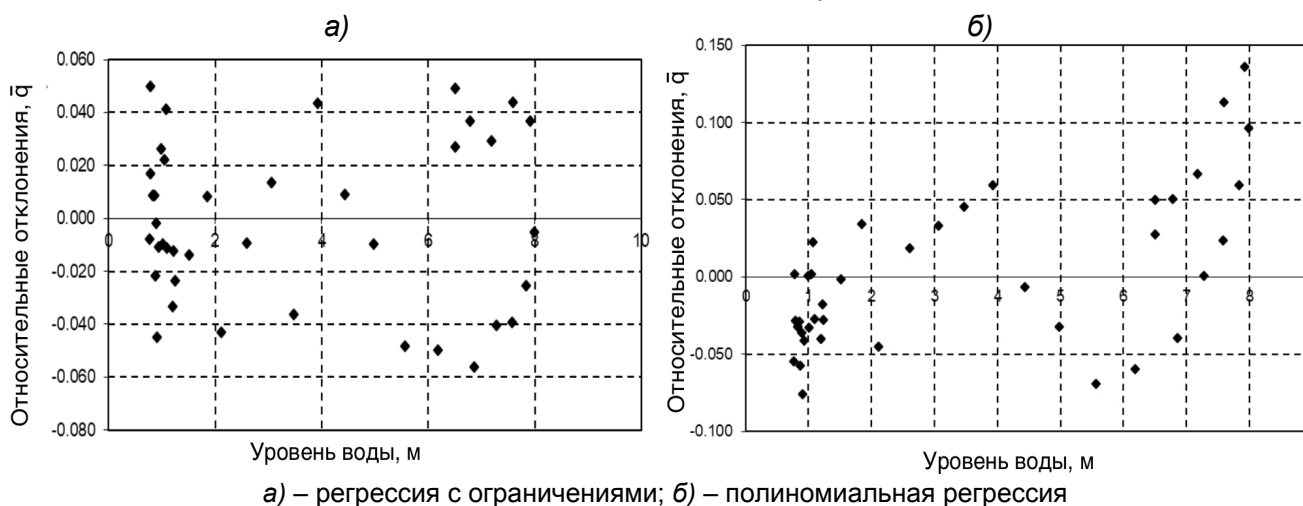


Рисунок А.1 – График остатков регрессии $\tilde{q} = f(H)$, ГП р. Обь – г. Колпашево, 2008-2010 гг.

Относительные остатки уравнения регрессии должны располагаться полосой примерно равной ширины по всей амплитуде уровня воды (рисунок А.1а), симметрично по отношению к линии нулевого значения.

Если полученное уравнение связи удовлетворяет критериям качества, приведенным в 5.4.5, 5.4.7, вычислительная процедура на этом заканчивается. Однако известно, что для сложных форм поперечного сечения русла не всегда удается получить удовлетворительную аппроксимацию связи $Q(H)$ посредством одного уравнения для всего диапазона изменения уровня воды.

Если анализ показывает, что в каком-либо диапазоне уровней воды отклонение остатков приобретает систематический характер (например, все они оказываются одного знака, рисунок А.1б), это свидетельствует о неудовлетворительной аппроксимации связи $Q(H)$ в данном интервале значений (Q, H) .

Такая картина может наблюдаться из-за резкого изменения пропускной способности русла в некоторых диапазонах уровней воды, например, при выходе воды на пойму. В практике гидрологических исследований в таких случаях выделяются как минимум две фазовые кривые (меженная и паводочная). При этом неизбежно возникает вопрос об их сопряжении. При использовании метода кусочно-полиномиальной регрессии эта задача решается на основе алгоритма III. Зависимости (A.6) или (A.10), полученные на первом шаге аппроксимации, принимаются для представления связи расходов и уровней в нижней части, где связь $Q(H)$ можно считать удовлетворительной. Далее, вышележащую амплитуду уровня воды следует разбить на отрезки для кусочного представления аппроксимирующей функции. Эти отрезки должны соответствовать морфометрии русла. Однако, в этом случае необходимо было бы иметь наибольшее количество ИРВ именно в окрестности точек, ограничивающих заданные отрезки, т. е. при переходе уровня воды через точки резкого изменения формы поперечного сечения русла. Но на практике именно в эти моменты измерения произвести не удается. Поэтому разбиение на отрезки рекомендуется выполнять в точках с наименьшей дисперсией погрешности аппроксимации. Известно, что при использовании МНК точка с наименьшей дисперсией погрешности аппроксимации расположена в центре тяжести совокупности исходных данных ИРВ, т. е. примерно в точке $Q = \bar{Q}_{ИРВ}$. Для зависимости, полученной на первом этапе аппроксимации, определяется значение H , отвечающее наименьшей дисперсии аппроксимирующей функции, которая определяется по формуле

$$\sigma_{Q_p(H_i)}^2 = \sigma_Q^2 / (n - p) + \sum_{i,j=1}^m \sigma_{a_i}^2 \sigma_{a_j}^2 (H_{it} - \bar{H}_i)^2 (H_{jt} - \bar{H}_j)^2, \quad (A.32)$$

где $H_1 = H$;

$H_2 = H^2$;

$H_3 = H^3$ и т. д.;

p – число степеней свободы уравнения регрессии;

$\sigma_{a_i}^2, \sigma_{a_j}^2$ – дисперсии коэффициентов уравнения регрессии соответственно: a_i и a_j .

Точку с наименьшей дисперсией аппроксимирующей функции можно определять, рассчитывая значения дисперсии непосредственно по формуле (A.11) для различных уровней среднего диапазона. При этом следует выбирать H , которому соответствует наименьшее значение функции (A.11). Допустимо приближенно в качестве фазово-граничного принимать уровень $H_{гр}$, который соответствует на графике $Q(H)$ значению $\bar{Q}_{ИРВ}$.

Далее в этой точке задаются ограничения согласно алгоритму III. Затем по данным ИРВ, попадающим в диапазон, расположенный выше граничной точки $H_{гр}$, подбирается аппроксимирующий полином. Для получения удовлетворительной аппроксимации связи $Q(H)$ по всей амплитуде уровня воды может быть сделано несколько таких разбиений в

соответствии с морфометрическими особенностями русла или поймы при их различных наполнениях (изменения крутизны берегов, рельефа русла, характера растительности).

А.3.7 При аппроксимации зависимостей $\omega(H)$ и $V(H)$ используется тот же алгоритм задания ограничений, но при этом имеются свои особенности. Так, если кривые строятся для годовых совокупностей ИРВ, ограничения на функцию $\omega(H)$ следует задавать так же, как и для кривой расходов в точке низшего (минимального) наблюдаемого уровня воды. При необходимости получения аппроксимации связи $\omega(H)$ за многолетний период целесообразно задавать ограничения в точке максимального наблюдаемого уровня воды, так как в многолетнем разрезе меженное русло, даже относительно устойчивое, может подвергаться значительным переформированиям.

При аппроксимации зависимостей средней скорости течения от уровня воды $V(H)$, как годовых, так и многолетних, целесообразнее ограничения на функцию задавать в точке $H_{\text{высш.}}$. Это объясняется тем, что малые скорости течения измеряются с более низкой точностью, что снижает надежность оценки положения кривой $V(H)$ в ее нижней части.

А.3.8 Пример использования алгоритма кусочно-полиномиальной аппроксимации приводится в приложении Г.

А.4 Выбор оптимального алгоритма аппроксимации

А.4.1 Одна и та же кривая на каком-то конкретном отрезке может быть описана самыми различными аналитическими выражениями. Рациональный выбор того или иного уравнения должен опираться не только на статистические оценки и критерии, но еще учитывать и другие характеристики вычислительного алгоритма. Решение об окончательном выборе алгоритма вычисления ЕРВ должен принимать специалист-гидролог на основе аттестации выбранного алгоритма учета стока.

А.4.2 Применительно к условиям каждого конкретного гидроствора выбор оптимального алгоритма аппроксимации зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$, $V(H)$ должен опираться на три группы характеристик: точность, устойчивость, сложность его аналитической структуры. Кроме того, следует учитывать и такую характеристику как содержательность, т. е. физическую интерпретируемость алгоритма, его компактность и удобство использования.

Характеристики точности предназначены для оценивания погрешностей результатов, получаемых при использовании выбранного алгоритма. Они содержат как методические, так и трансформированные погрешности, т. е. обусловленные неточностью исходных данных и погрешностями алгоритмов. Такие характеристики являются традиционными для метрологии. К основным характеристикам точности относятся:

а) статистические показатели для случайных погрешностей (среднее квадратическое отклонение – СКО; смещение оценок – математическое ожидание отклонений);

б) границы погрешностей, как случайных, так и систематических, которые могут быть

доверительными или детерминированными.

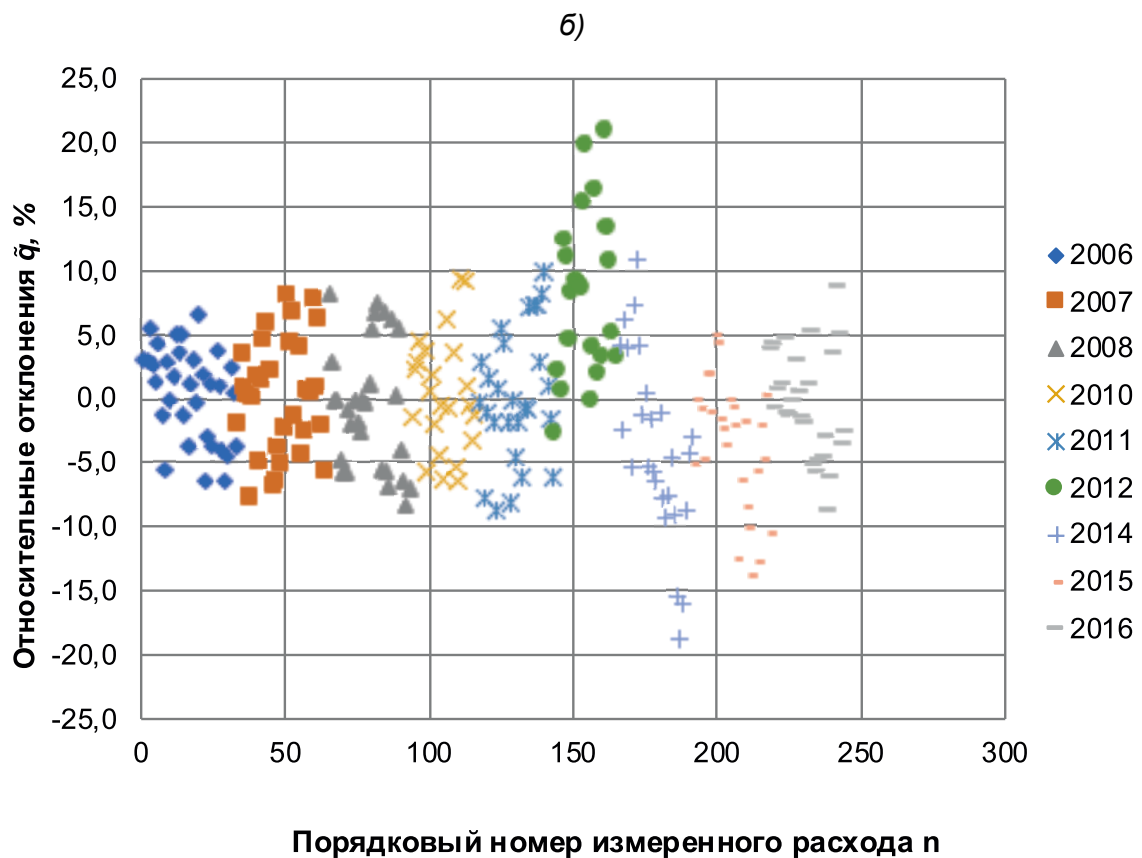
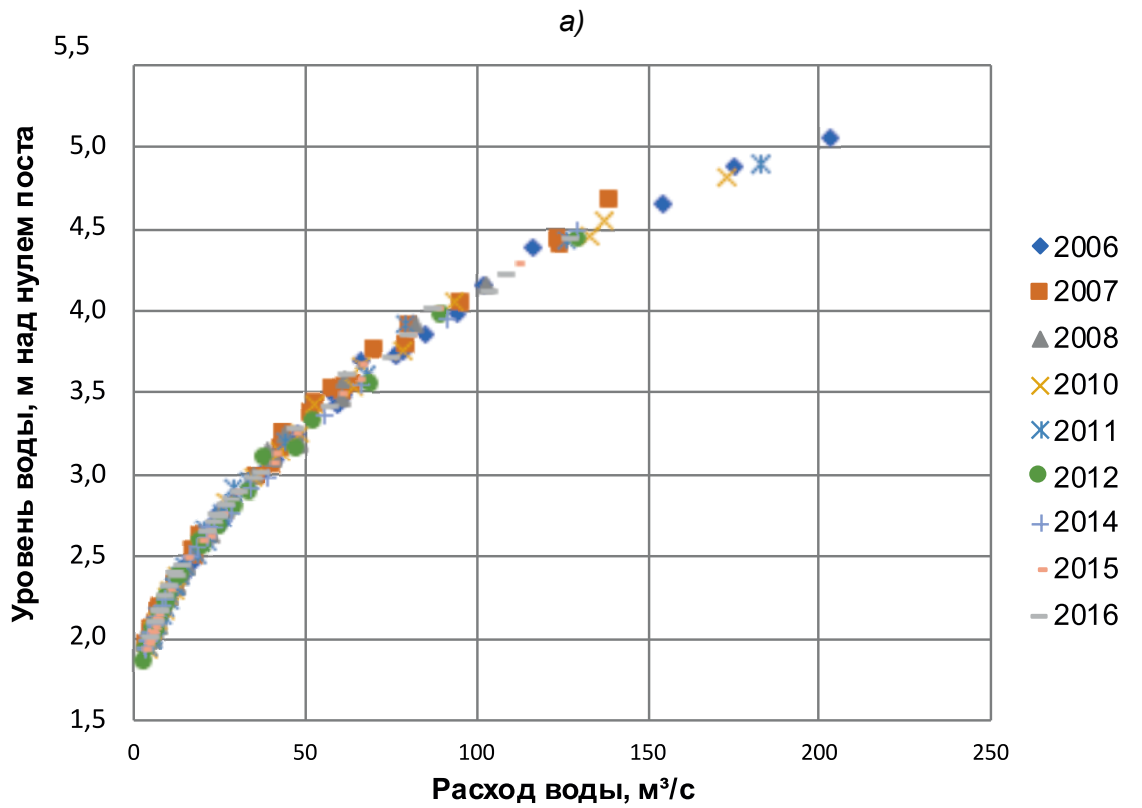
А.4.3 Перечень характеристик, которыми следует руководствоваться при выборе оптимальной аппроксимирующей функции $Q(H)$:

- множественный коэффициент корреляции должен быть наибольшим;
- дисперсия и СКО абсолютных остатков регрессии D_q и σ_q должны быть наименьшими;
- дисперсия и СКО относительных остатков регрессии $D_{\tilde{q}}$ и $\sigma_{\tilde{q}}$ должны быть наименьшими;
- значения математического ожидания остатков регрессии, как абсолютных, так и относительных должны быть близки к нулю ($m_q \cong 0$; $m_{\tilde{q}} \cong 0$).

Кроме того, адекватность полученной аппроксимирующей модели исходным данным проверяется на основании графиков остатков регрессии, показанных на рисунке А.1. При этом могут быть обнаружены следующие типы отклонений

- наличие выделяющихся измерений;
- систематические отклонения остатков на отдельных отрезках;
- непостоянство дисперсии по амплитуде изменения расходов и уровней воды.

При оптимальной аппроксимации связи $Q(H)$ относительные остатки регрессии на графике зависимости от H или $Q_{\text{расч}}$ должны располагаться симметричными полосами по обе стороны от ординаты H или Q , как показано на рисунке А.1а. Рекомендуется анализировать поведение остатков в различные фазы режима, т. е. в зависимости от времени t , для многолетней зависимости от порядкового номера измеренного расхода воды n . Подобный анализ позволит выявить периоды или фазы режима, в которые нарушается однозначность связи $Q(H)$. На рисунке А.1б приведен пример, для которого в верхнем диапазоне уровней воды все отклонения \tilde{q} от годовой зависимости $Q(H)$ имеют один знак. Такую аппроксимацию связи $Q(H)$ нельзя признать удовлетворительной. Для р. Копь в гидростворе ГП д. Черепановка при аппроксимации многолетней связи выявлены систематические отклонения от УРМ данных 2012 и 2014 годов (рисунок А.2б). Пример для многолетней зависимости $Q(H)$ представлен на рисунке А.2. Из рисунка А.2б видно, что наблюдаются систематические отклонения от УРМ данных 2012 и 2014 годов.



а) – многолетняя зависимость $Q(H)$;
 б) – график относительных остатков регрессии $\tilde{q}(n)$

Рисунок А.2 – Аппроксимация многолетней зависимости $Q(H)$, ГП р. Копь – д. Черепановка, 2006–2016 годы

Устойчивость полученной зависимости проверяется посредством сравнения кривых, полученных на основе полных и неполных совокупностей данных. С этой целью исходная совокупность ИРВ сокращается в два, затем в три раза, и по данным сокращенных совокупностей находятся новые уравнения регрессии. Результаты вычисления расходов воды по этим УР сравниваются с данными, полученными по основной аппроксимирующей зависимости во всем диапазоне изменения уровня воды (амплитуда H делится примерно на 50-70 отрезков). Вычисляются средние и средние квадратические значения расхождений. Выбранный алгоритм можно считать устойчивым, если среднее квадратическое значение расхождения данных УР, полученных по полной и неполным совокупностям, не превышает среднего квадратического рассеяния основного УР. Такая процедура позволяет объективно определить оптимальное число измерений расходов воды в данном гидростворе, необходимое для получения надежной связи $Q(H)$. При сокращении исходной совокупности данные ИРВ отбрасываются равномерно по всей амплитуде уровня воды за исключением его экстремальных диапазонов.

А.4.4 Все описанные алгоритмы могут быть использованы для получения УР КР по данным координат МКР. Координаты могут быть заданы как в виде подробной таблицы координат, так и в виде опорных точек таблицы (H, Q) .

А.4.5 По степени сложности все описанные выше алгоритмы (I – III) достаточно близки и физически обоснованы, а вот что касается физической интерпретируемости, то вопреки ранее существовавшему представлению, парабола Глушкова в большинстве случаев не заслуживает предпочтения из-за неопределенности уровня нулевого расхода H_0 .

Приложение Б

(обязательное)

Примеры экстраполяции расходов воды за пределы диапазона их измерений

Б.1 Пример экстраполяции расходов воды выше диапазона их измерения

Б.1.1 В таблице Б.1 приведены измеренные расходы воды за период свободного русла 2005 года р. Хопер в гидростворе ГП г. Балашов. Предположим, что при прохождении пика половодья с 12 апреля по 03 мая измерений расходов воды не было (исключенные ИРВ выделены в таблице Б.1 серым цветом). Следовательно, в диапазоне изменения уровней от 7,90 до 8,48 м над «0» поста необходимо выполнить экстраполяцию расходов воды. Диапазон экстраполяции составляет 13 % от полной амплитуды изменения уровня воды (от 3,89 до 8,48 м над «0» поста).

Т а б л и ц а Б.1 – ИРВ, ГП р. Хопер – г. Балашов, 2005 год

№ ИРВ	Дата ИРВ	СВО	$H_{и, см}$	$H_{и, м}$	$Q_{и, м^3/с}$	$\omega_{ж.с., м^2}$	$Q_{ур, м^3/с}$	$\omega_{ур, м^2}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11.04.05	Лдх	778	7,78	325	593	328	624
11	14.04.05	«	809	8,09	388	675	429	695
12	17.04.05	«	816	8,16	455	722	456	711
13	22.04.05	Св.	829	8,29	499	749	511	743
14	30.04.05	«	848	8,48	539	783	604	790
15	04.05.05	«	789	7,89	371	693	361	648
16	08.05.05	«	719	7,19	192	495	205	500
17	12.05.05	«	665	6,65	136	392	144	400
18	22.05.05	«	585	5,85	111	273	97,9	276
19	30.05.05	«	548	5,48	85,2	237	83,1	228
20	09.06.05	Раст. у бер.	504	5,04	72,2	193	65,8	179
21	19.06.05	«	485	4,85	58,9	164	58,2	160
22	29.06.05	«	482	4,82	55,7	151	57,0	157
23	08.07.05	«	474	4,74	50,1	155	53,7	150
24	18.07.05	«	453	4,53	42,2	127	45,3	132
25	30.07.05	«	448	4,48	44,6	123	43,3	128
26	10.08.05	«	450	4,5	40,3	127	44,1	130
27	18.08.05	«	441	4,41	37,5	120	40,6	123
28	31.08.05	«	411	4,11	29,9	101	29,9	102
29	09.09.05	«	394	3,94	25,2	92,7	25,1	92,3
30	20.09.05	«	394	3,94	23,9	92,2	25,1	92,3
31	29.09.05	«	398	3,98	26,9	94,9	26,1	94,5
32	10.10.05	Раст. по всему сеч.	393	3,93	24,3	93,0	24,9	91,7
33	20.10.05	«	401	4,01	28,4	94,3	27,0	96,2
34	31.10.05	Збрг	430	4,3	41,1	118	36,5	115
35	12.11.05	Св.	444	4,44	42	126	41,7	125
36	19.11.05	«	445	4,45	40,5	130	42,1	126
37	30.11.05	«	455	4,55	41	130	46,1	134
38	09.12.05	«	446	4,46	42,8	124	42,5	127

Б.1.2 Первоначально выполняется аппроксимация зависимости $Q(H)$ в диапазоне, освещенном измерениями расходов воды от 3,89 до 7,89 м над «0» поста. Для удобства записи коэффициентов УР уровни выражаем в метрах над «0» поста. В число ИРВ, используемых для аппроксимации $Q(H)$, были включены расходы, измеренные при ледоходе (№ 10), при наличии в русле водной растительности (№ 20 – № 33) и при наличии заберегов (№ 34). Лучшая аппроксимация получена при использовании метода полиномиальной регрессии с заданными ограничениями: при $H_{\text{низш}} = 3,80$ м, $Q_{\text{min}} = 22,0$ м³/с.

$$Q(H) = 1982,5 - 1644,4 \cdot H + 500,3 \cdot H^2 - 65,778 \cdot H^3 + 3,2296 \cdot H^4. \quad (\text{Б.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (Б.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,960$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 6,94$ %;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = -0,04$ %.

Б.1.3 Зависимость площадей поперечного сечения от уровней воды в диапазоне от 3,89 до 8,48 м $\omega(H)$ имеет вид:

$$\omega(H) = 215,43 - 117,25 \cdot \omega - 21,801 \cdot \omega^2. \quad (\text{Б.2})$$

Значения площадей поперечного сечения, полученные по УР (Б.2), представлены в графе 9 таблицы Б.1.

Б.1.4 Для оценки параметра m выберем пять пар расходов, вычисленных по УР (Б.1) в верхнем диапазоне уровней, освещенном измерениями расходов. Относительная разность между расходами в каждой паре должна быть не менее 20 %. Относительная разность вычисляется по формуле

$$\Delta Q_{\text{отн}} = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\left(\frac{Q_i + Q_{i-1}}{2}\right)} \cdot 100 \% , \quad (\text{Б.3})$$

где Q_i и Q_{i-1} – смежные во времени на фазе подъема в верхнем диапазоне уровней значения расходов воды, вычисленные по УР (Б.1).

В таблице Б.2 приведен расчет параметров m_i для нескольких пар расходов воды в пределах одной фазы водного режима по формуле (5.20).

Т а б л и ц а Б.2 – Расчет параметра m

H_i , м	Q_i , м ³ /с	ω_i , м ²	H_{i-1} , м	Q_{i-1} , м ³ /с	ω_{i-1} , м ²	ΔQ , %	m_i
1	2	3	4	5	6	7	8
7,89	361	648	7,65	294	595	20,3	2,382
7,88	357	646	7,64	292	593	20,3	2,375
7,87	354	644	7,63	289	591	20,3	2,367
7,86	351	641	7,62	287	589	20,2	2,360
7,85	348	639	7,61	284	586	20,2	2,353

Б.1.5 Рассмотрим алгоритм расчета параметра m_i .

Б.1.5.1 По УР (Б.1) вычисляются значения расходов воды для значений уровней воды в диапазоне, освещенном измерениями расходов (от 3,89 до 7,89 м).

Б.1.5.2 По уравнению (Б.2) вычисляются значения площадей поперечного сечения для значений уровней воды во всем диапазоне уровней воды за год (от 3,89 до 8,48 м).

Б.1.5.3 Выбирается значение уровня воды H_i и соответствующих ему значений расходов Q_i и площадей поперечного сечения русла ω_i , вычисленных по уравнениям (Б.1) и (Б.2). В качестве первого i -го значения уровня воды следует принимать максимальное значение диапазона уровней, освещенного измерениями расходов (в рассматриваемом примере 7,89 м).

Б.1.5.4 Вычисляется относительная разность значений i -го расхода воды и каждого из расходов, вычисленных по УР (Б.1) для значений уровней, начиная от $H_i - 0,01$ м и далее с шагом минус 0,01 до тех пор, пока относительная разность $\Delta Q_{\text{отн}}$ не превысит 20 %.

Б.1.5.5 Определяются значения нижних расходов Q_{i-1} и площадей поперечного сечения русла ω_{i-1} .

Б.1.5.6 Вычисляется значение параметра m_i по формуле (5.20).

Б.1.6 Рассмотрим пример расчета параметра m_i , соответствующего первой паре расходов.

Вычисляется значение i -го расхода воды, соответствующее уровню воды 7,89 м.

$$Q_{H=7,89} = 1982,5 - 1644,4 \cdot 7,89 + 500,3 \cdot 7,89^2 - 65,778 \cdot 7,89^3 + 3,2296 \cdot 7,89^4 = 361 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Б.4})$$

Вычисляются разности значения i -го расхода Q_i и значений расходов, соответствующих уровням воды, начиная от 7,88 м и далее с шагом минус 0,01.

$$\Delta Q_{\text{отн}} = \frac{361 - 294}{\left(\frac{361 + 294}{2}\right)} \cdot 100 \% = 20,3 \%. \quad (\text{Б.5})$$

Q_{i-1} оказалось равным 294 м³/с, т.к. его относительная разность с Q_i превысила 20 %.

Вычисляется значение m_i по формуле (5.20).

$$m_i = \frac{\lg(361) - \lg(294)}{\lg(648) - \lg(595)} = \frac{2,56-2,47}{2,81-2,77} = 2,382. \quad (\text{Б.6})$$

Б.1.7 Осредненное значение параметров m_i , вычисленных для нескольких пар расходов воды (графа 8 таблицы Б.2), составило 2,367. Это значение используется для расчета расходов воды в диапазоне экстраполяции (от 7,90 до 8,48 м)

Б.1.8 Экстраполируемые расходы определяем по формуле (5.19) для нескольких значений уровней воды через примерно равные интервалы. Например, для максимального уровня воды 8,48 м экстраполируемый расход вычисляется так:

$$Q_{эH=8,48} = Q_{H=7,89} \cdot \left(\frac{\omega_{H=8,48}}{\omega_{H=7,89}} \right)^m = 361 \cdot \left(\frac{790}{648} \right)^{2,367} = 575 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Б.7})$$

Б.7.9 В таблице Б.3 представлены вычисленные по формуле (5.19) значения расходов воды в диапазоне экстраполяции.

Т а б л и ц а Б.3 – Расчет расходов воды в диапазоне экстраполяции (от 7,90 до 8,48 м)

$H, \text{ м}$	$\omega_э, \text{ м}^2$	$Q_э, \text{ м}^3/\text{с}$
1	2	3
7,90	648	364
7,95	662	379
8,01	676	398
8,07	690	418
8,13	704	438
8,19	718	460
8,25	733	482
8,31	747	505
8,37	762	529
8,43	777	554
8,48	790	575

Б.1.10 Данные таблицы Б.3 используются для аппроксимации зависимости $Q(H)$ в диапазоне уровней от 7,90 до 8,48 м над «0» поста. В точке $H = 7,89$ м задается ограничение на значение расхода, полученное по УР (Б.1): $Q = 361 \text{ м}^3/\text{с}$. УР для диапазона экстраполяции получено в следующем виде:

$$Q(H)_э = 5161,11 - 1512,89 \cdot H + 114,6322 \cdot H^2 \quad (\text{Б.8})$$

Б.1.11 Результаты экстраполяции расходов воды за пределы их измерения представлены на рисунке Б.1.

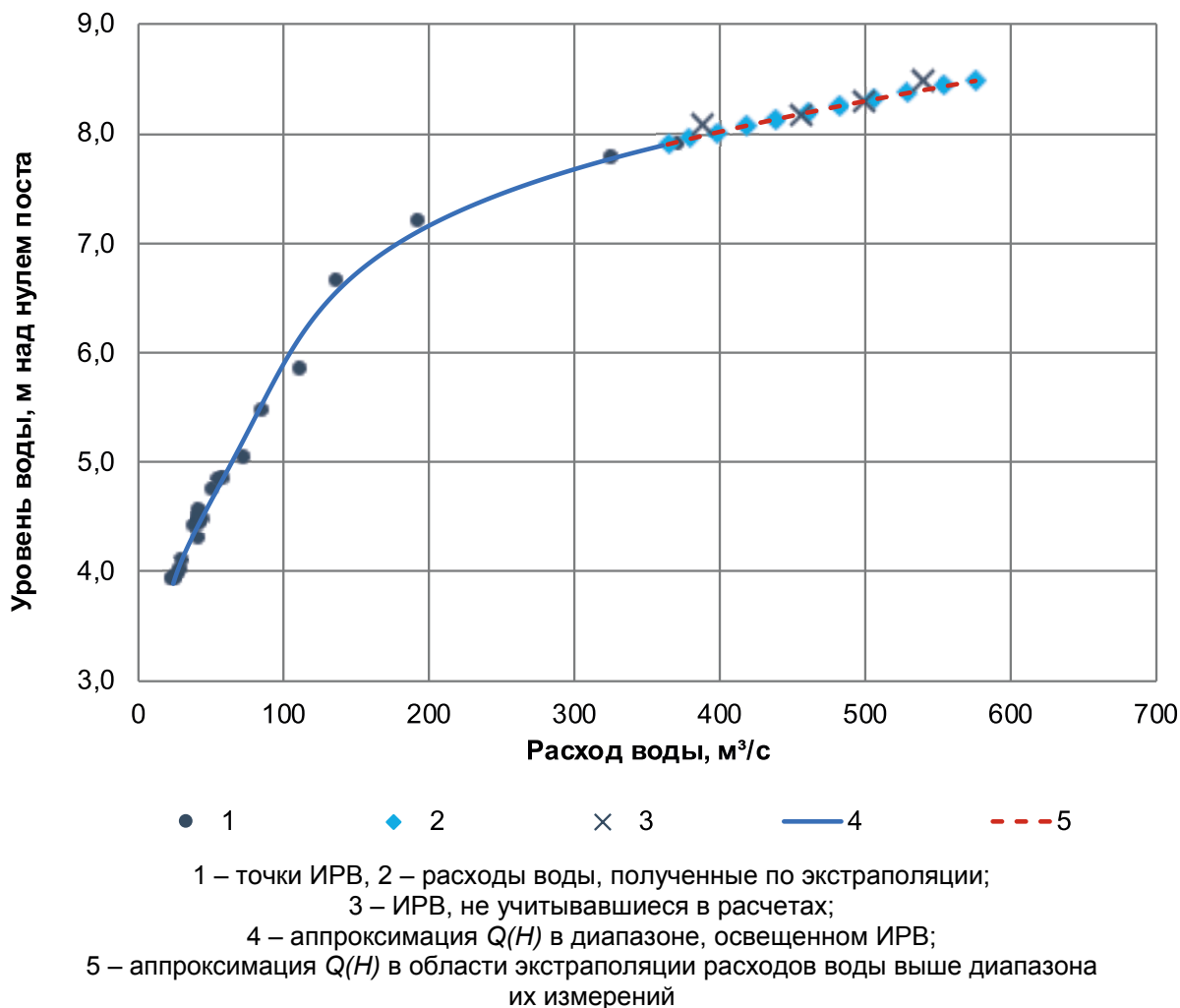


Рисунок Б.1 – Зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Хопер – г. Балашов, 2005 год

Б.1.12 Среднее квадратическое отклонение полученных посредством экстраполяции расходов воды от КР, построенной по точкам реальных ИРВ, составило 3,2 %, наибольшее отклонение – 3,5 %.

Б.2 Пример экстраполяции расходов воды ниже диапазона их измерения

Б.2.1 В таблице Б.3 приведены измеренные расходы воды за период свободного русла 2014 года по р. Копь в гидростворе ГП д. Черепановка. Предположим, что при минимальных уровнях воды ниже отметки 2,07 м над «0» поста измерений расходов воды не было (исключенные ИРВ выделены в таблице Б.3 серым цветом). Следовательно, в диапазоне изменения уровней от 1,93 до 2,06 м над «0» поста необходимо выполнить экстраполяцию расходов воды. Диапазон экстраполяции составляет 5,5 % от полной амплитуды изменения уровня воды (от 1,93 до 4,48 м над «0» поста).

Т а б л и ц а Б.3 – ИРВ, ГП р. Копь – д. Черепановка, 2014 год

№ ИРВ	Дата ИРВ	СВО	$H_{и, см}$	$H_{и, м}$	$Q_{и, м^3/с}$	$\omega_{ж.с., м^2}$	$Q_{ур, м^3/с}$	$\omega_{ур, м^2}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	03.04.14	Св.	394	3,94	91,3	89,4	90,9	89,9
10	05.04.14	«	448	4,48	129	106	130	106
11	12.04.14	«	354	3,54	66,4	76,7	65,5	76,5
12	13.04.14	«	337	3,37	55,4	72,0	55,8	70,6
13	21.04.14	«	268	2,68	22,0	46,8	23,4	46,6
14	26.04.14	«	277	2,77	28,5	50,8	26,9	49,7
15	02.05.14	«	298	2,98	38,8	56,9	36,0	56,9
16	03.05.14	«	292	2,92	33,8	55,2	33,3	54,9
17	14.05.14	«	262	2,62	20,9	44,3	21,1	44,6
18	24.05.14	«	267	2,67	23,0	45,2	23,0	46,2
19	09.06.14	«	281	2,81	26,6	49,0	28,5	51,0
20	14.06.14	«	255	2,55	18,5	41,7	18,7	42,2
21	23.06.14	«	224	2,24	9,36	31,1	9,46	32,2
22	30.06.14	«	213	2,13	6,93	29,1	6,89	28,8
23	07.07.14	«	219	2,19	8,64	28,6	8,24	30,6
24	19.07.14	«	209	2,09	6,08	26,5	6,05	27,5
25	23.07.14	«	194	1,94	3,62	24,0	3,35	23,1
26	14.08.14	«	203	2,03	5,04	25,9	4,88	25,8
27	19.08.14	«	207	2,07	5,92	26,3	5,64	26,9
28	31.08.14	«	198	1,98	4,19	24,8	4,00	24,3
29	08.09.14	«	193	1,93	3,25	23,9	3,20	22,9
30	17.09.14	«	198	1,98	3,74	23,9	4,00	24,3
31	27.09.14	«	201	2,01	4,29	24,7	4,52	25,2
32	04.10.14	«	231	2,31	10,7	36,8	11,3	34,4
33	20.10.14	«	249	2,49	16,2	41,9	16,7	40,2
34	28.10.14	«	264	2,64	21,2	45,1	21,9	45,2

Б.2.2 Выполним аппроксимацию зависимости $Q(H)$ в диапазоне, освещенном измерениями расходов воды от 2,07 до 4,48 м над «0» поста. Лучшая аппроксимация получена при использовании метода полиномиальной регрессии с заданными ограничениями: при $H_{\text{низш}} = 1,80$ м, $Q_{\text{min}} = 1,50$ м³/с.

$$Q(H) = 43,261 - 60,967 \cdot H + 23,03 \cdot H^2 - 1,1383 \cdot H^3. \quad (\text{Б.9})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (Б.9):

- коэффициент корреляции $R = 0,993$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 4,17$ %;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = -0,01$ %.

Б.2.3 Зависимость площадей поперечного сечения от уровней воды в диапазоне от 3,89 до 8,48 м $\omega(H)$ имеет вид:

$$\omega(H) = -1,9131 - 8,1275 \cdot \omega + 13,634 \cdot \omega^2 - 1,436 \cdot \omega^3. \quad (\text{Б.10})$$

Значения площадей поперечного сечения, полученные по УР (Б.10), представлены в графе 9 таблицы Б.4.

Б.2.4 Для оценки параметра m выберем пять пар расходов, вычисленных по УР (Б.9) в верхнем диапазоне уровней, освещенном измерениями расходов. Относительная разность между расходами в каждой паре должна быть не менее 20 %. Относительная разность вычисляется по формуле

$$\Delta Q_{\text{отн}} = \left| \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\left(\frac{Q_i + Q_{i-1}}{2}\right)} \cdot 100 \% \right|, \quad (\text{Б.11})$$

где Q_i и Q_{i-1} – смежные во времени в нижнем диапазоне уровней значения расходов воды, вычисленные по УР (Б.9).

В таблице Б.5 приведен расчет параметров m_i для нескольких пар расходов воды в пределах одной фазы водного режима по формуле (5.20).

Т а б л и ц а Б.5 – Расчет параметра m

H_i , м	Q_i , м ³ /с	ω_i , м ²	H_{i-1} , м	Q_{i-1} , м ³ /с	ω_{i-1} , м ²	ΔQ , %	m_i
1	2	3	4	5	6	7	8
2,07	5,64	26,9	2,14	7,10	29,1	22,9	3,048
2,08	5,84	27,2	2,15	7,33	29,4	22,5	3,018
2,09	6,05	27,5	2,16	7,55	29,7	22,1	2,990
2,10	6,25	27,8	2,17	7,78	30,0	21,8	2,962
2,11	6,46	28,1	2,18	8,01	30,3	21,4	2,935

Б.2.5 Рассмотрим алгоритм расчета параметра m_i .

Б.2.5.1 По УР (Б.9) вычисляются значения расходов воды для значений уровней воды в диапазоне, освещенном измерениями расходов (от 2,07 до 4,48 м).

Б.2.5.2 По уравнению (Б.10) вычисляются значения площадей поперечного сечения для значений уровней воды во всем диапазоне уровней воды за год (1,93 до 4,48).

Б.2.5.3 Выбирается значение уровня воды H_i и соответствующих ему значений расходов Q_i и площадей поперечного сечения русла ω_i , вычисленных по уравнениям (Б.9) и (Б.10). В качестве первого i -го значения уровня воды следует принимать минимальное значение диапазона уровней, освещенного измерениями расходов (в рассматриваемом примере 2,07 м).

Б.2.5.4 Вычисляется относительная разность значений i -го расхода воды и каждого из расходов, вычисленных по УР (Б.9) для значений уровней, начиная от $H_i + 0,01$ м и далее с шагом плюс 0,01 до тех пор, пока относительная разность $\Delta Q_{\text{отн}}$ не превысит 20 %.

Б.2.5.5 Определяются значения нижних расходов Q_{i-1} и площадей поперечного сечения русла ω_{i-1} .

Б.2.5.6 Вычисляется значение параметра m_i по формуле (5.20).

Б.2.6 Рассмотрим пример расчета параметра m_i , соответствующего первой паре расходов.

Вычисляется значение i -го расхода воды, соответствующее уровню воды 2,07 м.

$$Q_{H=2,07} = 43,261 - 60,967 \cdot 2,07 + 23,03 \cdot 2,07^2 - 1,1383 \cdot 20,07^3 = 5,64 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Б.12})$$

Вычисляются разности значения i -го расхода Q_i и значений расходов, соответствующих уровням воды, начиная от 2,06 м и далее с шагом плюс 0,01.

$$\Delta Q_{\text{отн}} = \left| \frac{5,64 - 6,89}{\left(\frac{5,64 + 6,89}{2}\right)} \cdot 100 \% \right| = 22,0 \%. \quad (\text{Б.13})$$

Q_{i-1} оказалось равным 7,10 м³/с, т.к. его относительная разность с Q_i превысила 20 %.

Вычисляется значение m_i по формуле (5.20).

$$m_i = \frac{\lg(5,64) - \lg(7,10)}{\lg(26,9) - \lg(29,1)} = \frac{0,75 - 0,85}{1,43 - 1,46} = 3,048. \quad (\text{Б.14})$$

Б.2.7 Осредненное значение параметров m_i , вычисленных для нескольких пар расходов воды (графа 8 таблицы Б.5), составило 2,991. Это значение используется для расчета расходов воды в диапазоне экстраполяции (от 1,93 до 2,06 м)

Б.2.8 Экстраполируемые расходы определяем по формуле (5.19) для нескольких значений уровней воды через примерно равные интервалы. Например, для минимального уровня воды 1,93 м экстраполируемый расход вычисляется так:

$$Q_{эH=1,93} = Q_{H=2,07} \cdot \left(\frac{\omega_{H=1,93}}{\omega_{H=2,07}}\right)^m = 5,64 \cdot \left(\frac{22,9}{26,9}\right)^{2,991} = 3,45 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Б.15})$$

Б.2.9 В таблице Б.6 представлены вычисленные по формуле (5.19) значения расходов воды в диапазоне экстраполяции (от 1,93 до 2,06 м).

Т а б л и ц а Б.6 – Расчет расходов воды в диапазоне экстраполяции (от 1,93 до 2,06 м)

H , м	$\omega_э$, м ²	$Q_э$, м ³ /с
1	2	3
2,06	26,6	5,46
2,04	26,1	5,10
2,01	25,2	4,60
1,98	24,3	4,14
1,95	23,4	3,72
1,93	22,9	3,45

Б.2.10 Данные таблицы Б.3 используются для аппроксимации зависимости $Q(H)$ в диапазоне уровней от 1,93 до 2,06 м над «0» поста. В точке $H = 2,07$ м задается ограничение на значение расхода, полученное по УР (Б.9): $Q = 5,64 \text{ м}^3/\text{с}$. УР для диапазона экстраполяции получено в следующем виде:

$$Q(H)_э = -5,87808 - 5,65541 \cdot H + 5,421106 \cdot H^2 \quad (\text{Б.16})$$

Б.2.11 Результаты экстраполяции расходов воды за пределы их измерения представлены на рисунке Б.2.

Б.2.12 Среднее квадратическое отклонение полученных посредством экстраполяции расходов воды от КР, построенной по точкам реальных ИРВ, составило 2,5 %, наибольшее отклонение – 4,2 %.

Б.2.13 Как видно из Б.1.12 и Б.2.12, точность экстраполяции расходов воды вверх в пределах 15 % и вниз в пределах 5 % от всей амплитуды уровней воды соизмерима с погрешностями их измерения.

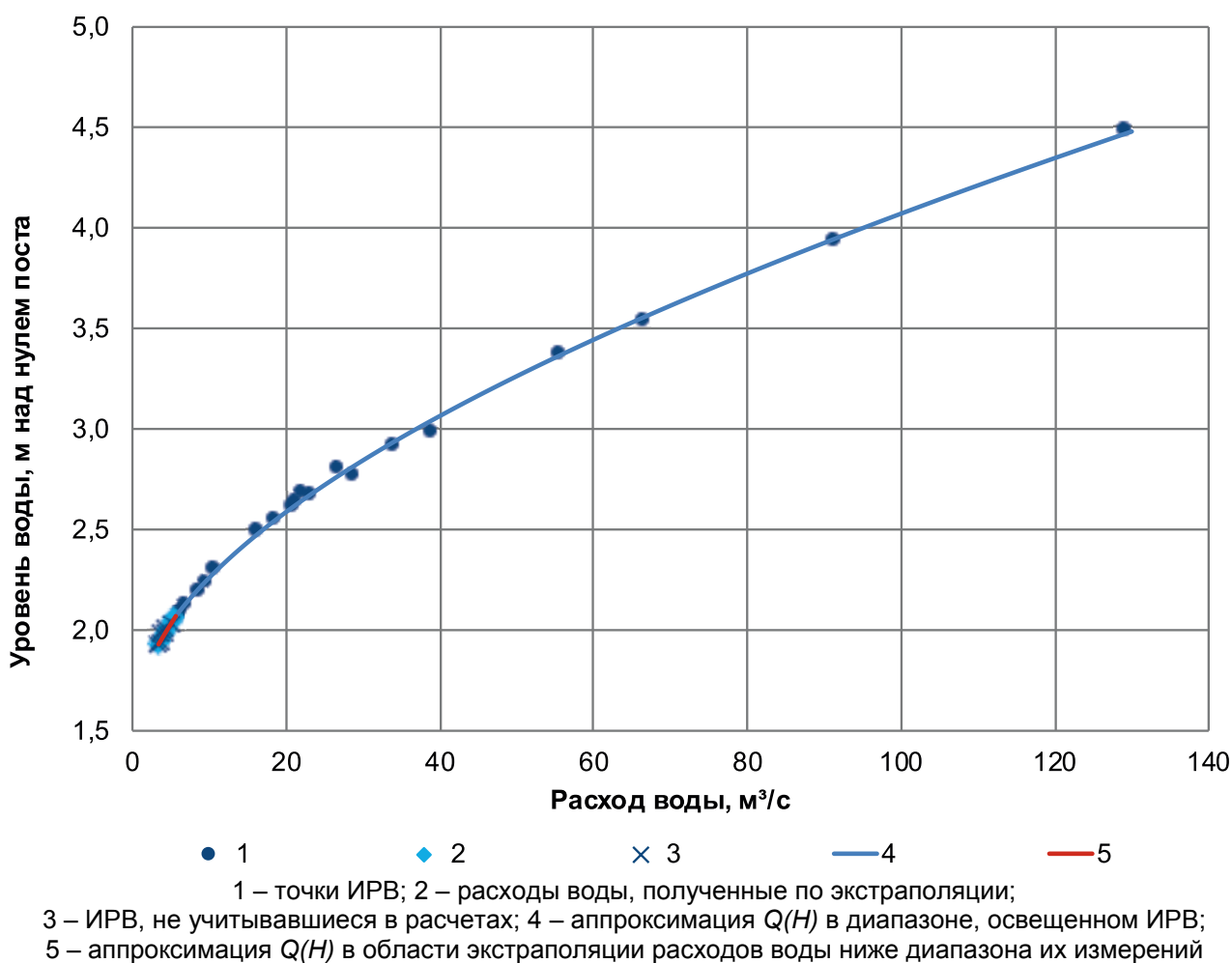


Рисунок Б.2 – Зависимость расходов от уровней воды,
ГП р. Копь – д. Черепановка, 2014 год

Приложение В

(обязательное)

Пример оценки однозначности зависимости расходов от уровней воды

В.1 В таблице В.1 приведены измеренные расходы воды за период свободного русла 2009 года р. Кас в гидростворе ГП пос. Александровский Шлюз.

Т а б л и ц а В.1 – ИРВ, ГП р. Кас – пос. Александровский Шлюз, 2009 год

№ ИРВ	Дата ИРВ	СВО	$H_{и, см}$	$H_{и, м}$	$Q_{и, м^3/с}$	$Q_{УР, м^3/с}$	$\tilde{q}_{и}$
1	2	3	4	5	6	7	8
9	26.04.09	Збрг остат.	310	3,10	23,9	23,4	0,022
10	28.04.09	Св.	350	3,50	40,7	42,8	-0,048
11	29.04.09	«	394	3,94	76,6	70,7	0,083
12	30.04.09	«	420	4,20	99,8	90,6	0,102
13	01.05.09	Лдх	450	4,50	132	117	0,133
14	03.05.09	Св.	480	4,80	159	146	0,091
15	04.05.09	«	510	5,10	191	178	0,072
16	06.05.09	«	555	5,55	242	233	0,039
17	10.05.09	«	585	5,85	279	273	0,020
18	17.05.09	«	604	6,04	307	301	0,020
19	26.05.09	«	570	5,70	238	253	-0,059
20	01.06.09	«	520	5,20	173	190	-0,088
21	03.06.09	«	490	4,90	143	156	-0,084
22	05.06.09	«	451	4,51	105	117	-0,106
23	06.06.09	«	420	4,20	87,7	90,6	-0,032
24	08.06.09	«	385	3,85	67,1	64,5	0,041
25	11.06.09	«	352	3,52	42,2	43,9	-0,038
26	27.06.09	«	318	3,18	26,1	26,8	-0,026
27	11.07.09	«	310	3,10	23,7	23,4	0,014
28	21.07.09	«	306	3,06	22,6	21,8	0,038
29	30.07.09	«	308	3,08	20,7	22,6	-0,083
30	13.08.09	«	306	3,06	20,5	21,8	-0,058
31	22.08.09	«	300	3,00	20,3	19,4	0,044
32	30.08.09	«	296	2,96	17,5	18,0	-0,026
33	12.09.09	«	292	2,92	17,1	16,6	0,033
34	20.09.09	«	296	2,96	19,5	18,0	0,085
35	29.09.09	«	299	2,99	19,7	19,1	0,033
36	05.10.09	«	300	3,00	18,8	19,4	-0,033
37	13.10.09	«	303	3,03	19,9	20,6	-0,033
Сумма квадратов							0,114

В.2 Диапазон изменений уровней воды за 2009 год (от 2,90 до 6,04 м над «0» поста) практически полностью освещен измерениями расходов. В число ИРВ, используемых для аппроксимации $Q(H)$, были включены расходы, измеренные при остаточных заберегах (№ 9) и ледоходе (№ 13). Лучшая аппроксимация получена при использовании метода полиномиальной регрессии с заданными ограничениями: при $H_{низш} = 1,91$ м, $Q(H_{низш}) = 0$ м³/с

$$Q(H) = 69,623 - 71,017 \cdot H + 18,097 \cdot H^2. \quad (\text{B.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (B.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,991$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\tilde{q}} = 6,32 \%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\tilde{q}} = 0,01 \%$.

В графе 7 таблицы В.1 представлены значения расходов, вычисленные по УР (B.1) для значений уровней воды при измерениях расходов. В графу 8 таблицы В.1 занесены относительные отклонения ИРВ от опорной КР, вычисленные по формуле (5.2).

В.3 Осуществим оценку однозначности зависимости (B.1) в соответствии с критерием Фишера (5.23).

В.3.1 Критическое значение распределения Фишера при уровне значимости 5 % для имеющегося числа ИРВ $n = 29$ в соответствии с таблицей 5.1 составляет

$$F_{\text{кр}} = 1,47. \quad (\text{B.2})$$

В.3.2 Вычислим значение дисперсии по результатам оценки рассеяния связи $Q(H)$ по формуле (5.23). Число степеней свободы $k = 3$ (Q, H, H^2).

$$D_{\tilde{q}} = \frac{1}{29 - 3} \cdot 0,114 = 0,0044. \quad (\text{B.3})$$

В.3.3 Среднеквадратическое значение относительной погрешности ИРВ примем равной 0,06.

В.3.4 Вычислим отношение дисперсий согласно критерию Фишера (5.23)

$$F = \frac{0,0044}{0,0036} = 1,22. \quad (\text{B.4})$$

Как видно из (B.2) и (B.4), $F < F_{\text{кр}}$, а значит, зависимость (B.1) удовлетворяет критерию Фишера (5.23) при заданном уровне значимости.

В.4 Из графика остатков регрессии $\tilde{q}_i = f(H)$ на рисунке В.1 видно, что при уровнях воды выше 3,80 м обнаруживается систематический характер относительных отклонений ИРВ от осредняющей КР.

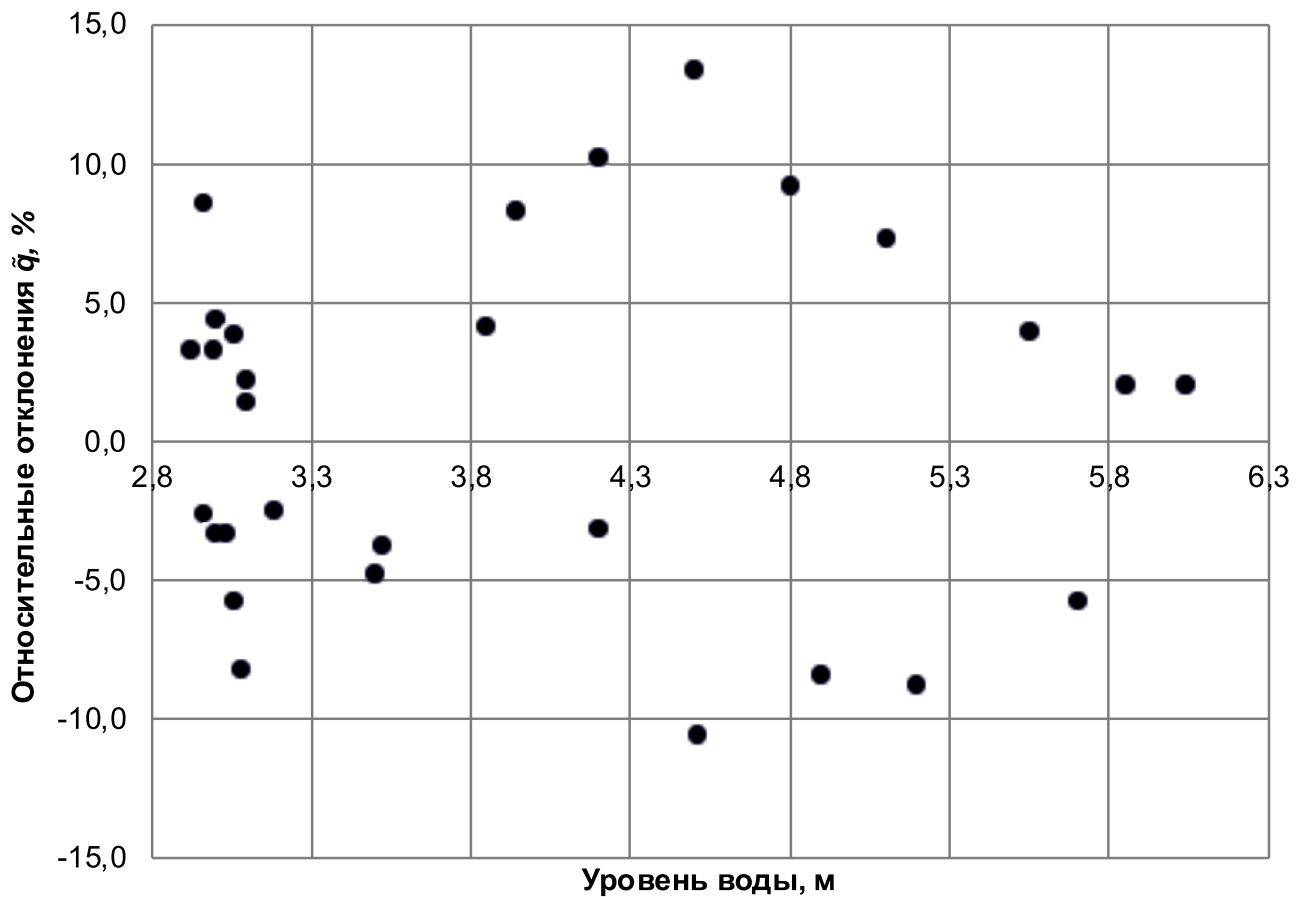


Рисунок В.1 – График относительных остатков регрессии $\bar{q} = f(H)$,
ГП р. Кас – пос. Александровский Шлюз, 2009 год

Для проверки наличия систематической составляющей относительных отклонений \bar{q}_i воспользуемся критерием знаков (5.25), (5.26). С этой целью в ряду ИРВ при уровнях воды выше 3,80 м выделим различные фазы водного режима:

- 1) с 24.04.2009 по 17.05.2009 – фаза подъема половодья;
- 2) с 18.05.2009 по 15.06.2009 – фаза спада половодья.

За период подъема половодья количество ИРВ, а следовательно, и относительных отклонений \bar{q}_i , составило 10. Осуществим расчет критериальных интервалов для числа членов \bar{q}_i одного знака:

$$E(m) = \frac{10-1}{2} = 4,5, \quad (\text{B.4})$$

$$\sigma(m) = \sqrt{\frac{10+1}{12}} = 0,96. \quad (\text{B.5})$$

$$E(m) - \sigma(m) = 4,5 - 0,96 = 3,5,$$

$$E(m) + \sigma(m) = 4,5 + 0,96 = 5,5. \quad (\text{B.6})$$

Согласно критерию знаков зависимость $Q(H)$ следует считать однозначной, если в течение исследуемой фазы водного режима число элементов \tilde{q}_i одного знака попадает в интервалы:

$$E(m) - \sigma(m) < m_{\pm} < E(m) + \sigma(m). \quad (\text{B.7})$$

Количество положительных значений \tilde{q}_i за период подъема половодья составило 9, отрицательных – 1, следовательно, число членов ряда одного знака не попадает в критериальные интервалы. То же самое можно сказать и о фазе спада половодья (таблица В.2).

Т а б л и ц а В.2 – Оценка однозначности зависимости $Q(H)$, ГП р. Кас – пос. Александровский Шлюз за 2009 год по критерию знаков

Фаза водного режима	N_0	m_+	m_-	$E(m) - \sigma(m)$	$E(m) + \sigma(m)$
Подъем половодья	10	9	1	3,5	5,5
Спад половодья	7	1	6	2,2	3,8

В.5 Зависимость $Q(H)$ за период свободного русла 2009 года р. Кас в гидростворе ГП пос. Александровский Шлюз признана неоднозначной согласно критерию знаков в период половодья (с 24.04.2009 по 15.06.2009), следовательно, в этот период для расчета ежедневных расходов воды должны применяться методики, изложенные в разделе 7.

Приложение Г

(обязательное)

**Пример расчета параметров годовой зависимости расходов
от уровней воды $Q(H)$**

Г.1 Аппроксимация связи $Q(H)$ за период свободного русла 2008 года р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево выполнена на основе трех алгоритмов, описанных в приложении А. Результаты сравнения алгоритмов приведены в таблицах Г.1, Г.2.

Т а б л и ц а Г.1 – Параметры УР, аппроксимирующих зависимость $Q(H)$

Коэффициенты УР	Вид аппроксимации		
	Парабола Глушкова	Полином без ограничений	Полином с ограничениями
1	2	3	4
ГП р. Обь - г. Колпашево, 2008 год Диапазон изменения уровней: от 2,33 до 7,41 м, $Q_{ср} = 3110 \text{ м}^3/\text{с}$, $N = 24$, $H_{\text{низш}} = 2,00 \text{ м}$, $Q(H_{\text{низш}}) = 2000 \text{ м}^3/\text{с}$, $H_0 = -0,67 \text{ м}$			
a_0	464,49	1,5203	5600,3
a_1	1,3815	1519	-5511,9
a_2	-	-298,05	2687,4
a_3	-	35,689	-476,62
a_4	-	-	30,437
Коэффициент корреляции R	0,987	0,940	0,950

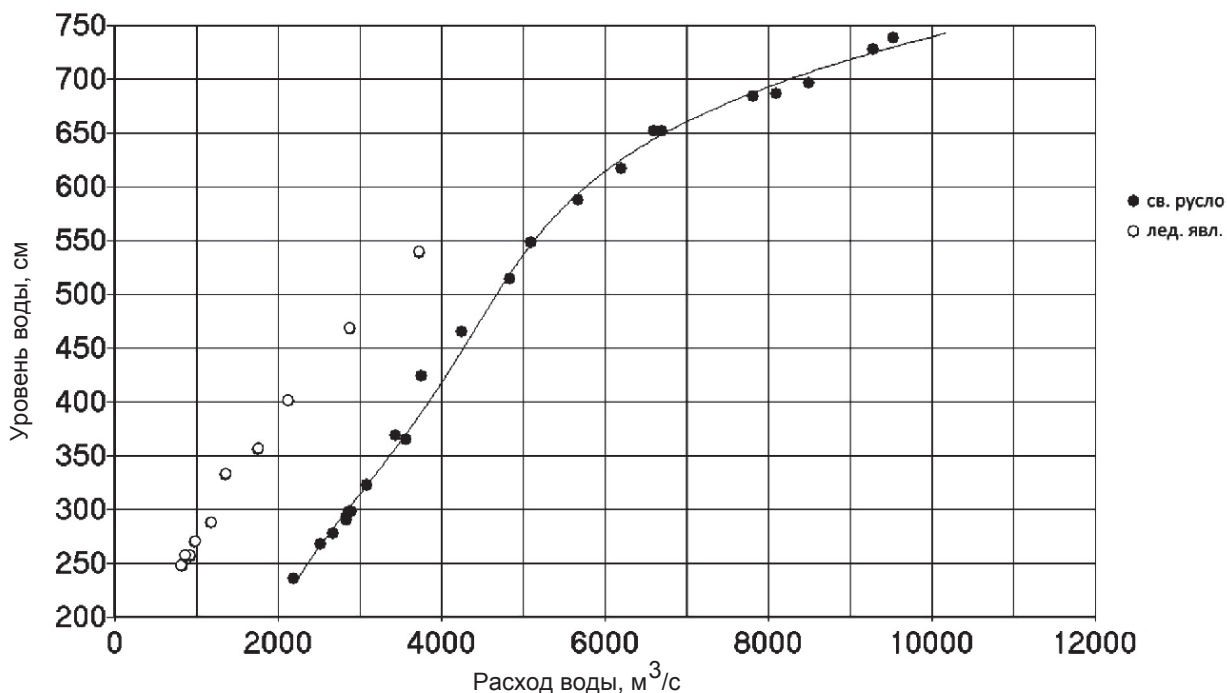
Т а б л и ц а Г.2 – Расхождения измеренных и расчетных расходов воды

Наименование параметра	Вид аппроксимации					
	Парабола Глушкова		Полином без ограничений		Полином с ограничениями	
Отклонения	ср.	СКО	ср.	СКО	ср.	СКО
Абсолютные, $\text{м}^3/\text{с}$	33,56	497,1	-0,236	0,017	0,00	188,78
Относительные, %	0,26	7,41	0,02	4,15	0,05	3,13

Как видно из графы 3 таблицы Г.2, высокую точность демонстрируют аппроксимации зависимости $Q(H)$ в виде полинома без ограничений и полинома с ограничениями, представленные на рисунках Г.1а и Г.1б соответственно. Тем не менее, из рисунка Г.1а видно, что точки ИРВ располагаются недостаточно равномерно относительно КР, что подтверждается графиком относительных остатков регрессии, представленным на рисунке Г.2 (1). Из рисунка Г.1б видно, что полученная методом полиномиальной регрессии с ограничениями КР не удовлетворяет условиям выпуклости функции $Q(H)$.

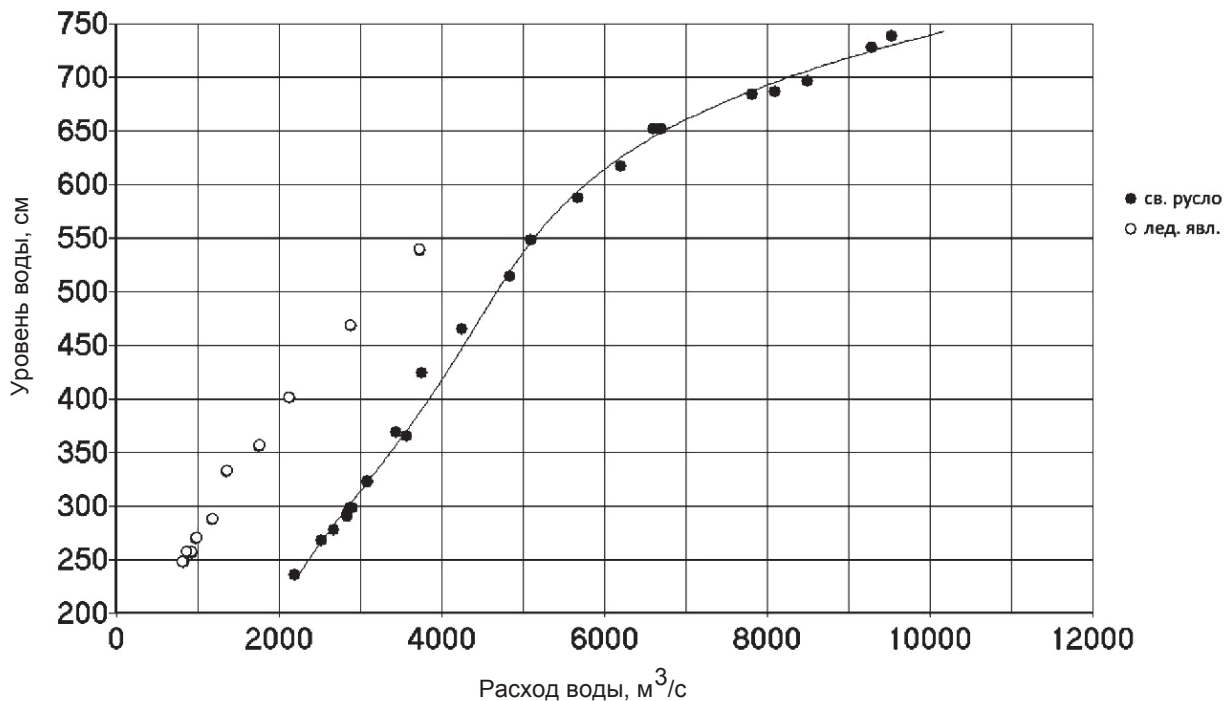
а)

Кривая расходов воды (полином с огранич.)
р. Обь - г. Колпашево, 2008 г.



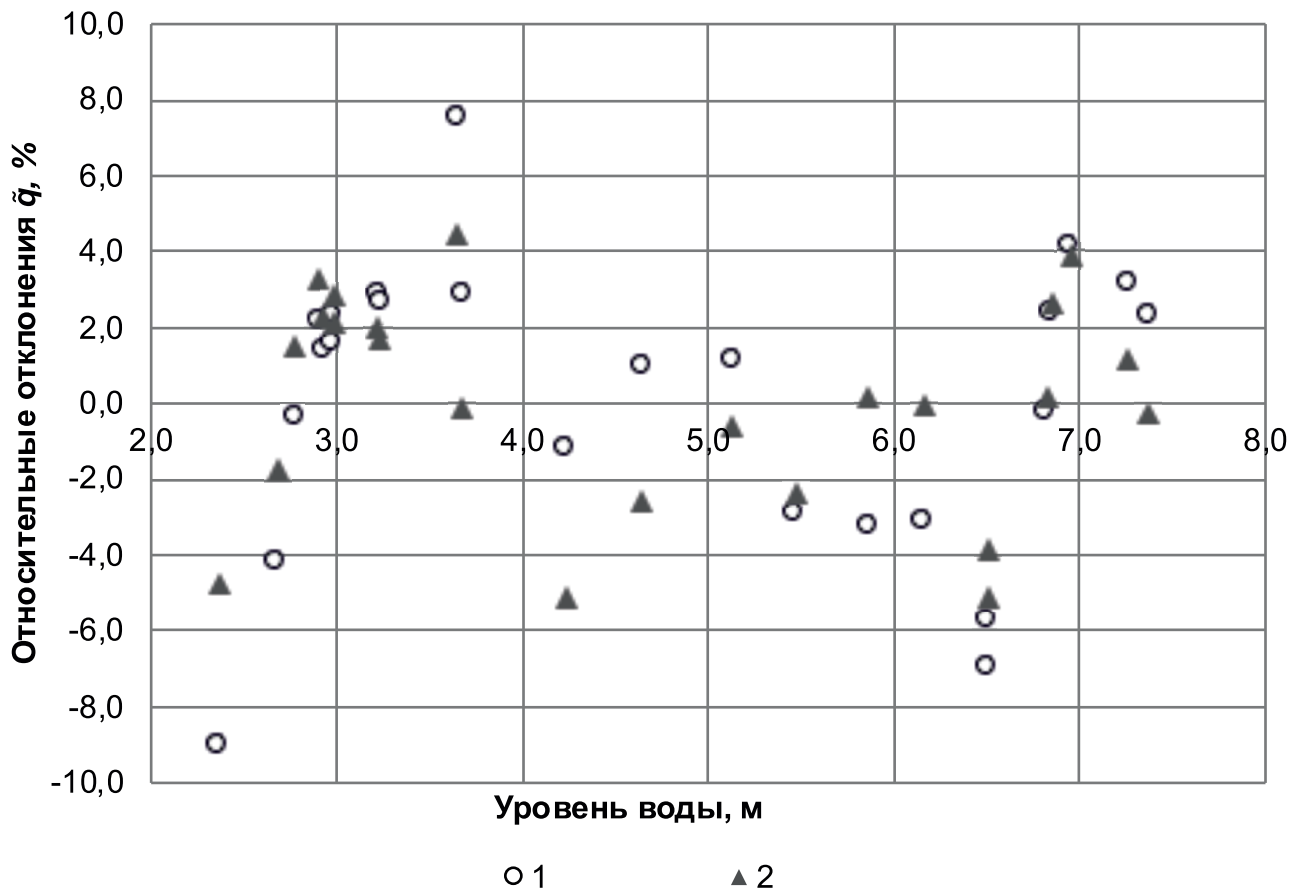
б)

Кривая расходов воды (полином с огранич.)
р. Обь - г. Колпашево, 2008 г.



а) – КР в виде полинома 3-й степени; б) – КР в виде полинома 4-й степени с ограничениями

Рисунок Г.1 – Зависимость расходов от уровней воды,
аппроксимированная разными способами



1 – КР, полученной полиномом 3-й степени;
 2 – КР, полученной методом кусочно-полиномиальной регрессии

Рисунок Г.2 – График относительных остатков регрессии $\bar{q} = f(H)$

Г.2 С целью уточнения КР воспользуемся частным случаем метода полиномиальной регрессии с ограничениями – методом кусочно-полиномиальной регрессии. Разделим совокупность ИРВ в расчетном году на 2 группы:

- диапазон уровней воды от 2,33 до 5,86 м;
- диапазон уровней воды от 5,86 до 7,41 м.

Для каждого из полученных диапазонов выполним аппроксимацию. Для нижнего диапазона уровней наилучший результат показал полином 2-й степени с ограничениями $H_{\text{низш}} = 2,00$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 2000$ м³/с, а для верхнего – полином 2-й степени с ограничениями $H_{\text{низш}} = 5,84$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 5620$ м³/с. Коэффициенты полученных КР и оценка точности аппроксимации представлены в таблице Г.3. На рисунке Г.3 представлена зависимость $Q(H)$, полученная методом кусочно-полиномиальной регрессии.

Т а б л и ц а Г.3 – Параметры кусочно-полиномиальной аппроксимации

Наименование параметра	Вид аппроксимации		
	Полином с ограничениями	Полином 1-й степени	
1	2	3	
Диапазон уровней воды, м	2,33 – 5,86	5,86 – 7,41	
Коэффициенты УР	a_0	576,91	17815,9
	a_1	634,01	-5769,9
	a_2	38,766	630,41
Коэффициент корреляции R	0,388	0,715	
Абсолютные отклонения, м ³ /с	ср.	0,00	0,00
	СКО	103,06	242,23
Относительные отклонения, %	ср.	0,21	-0,15
	СКО	3,06	3,27

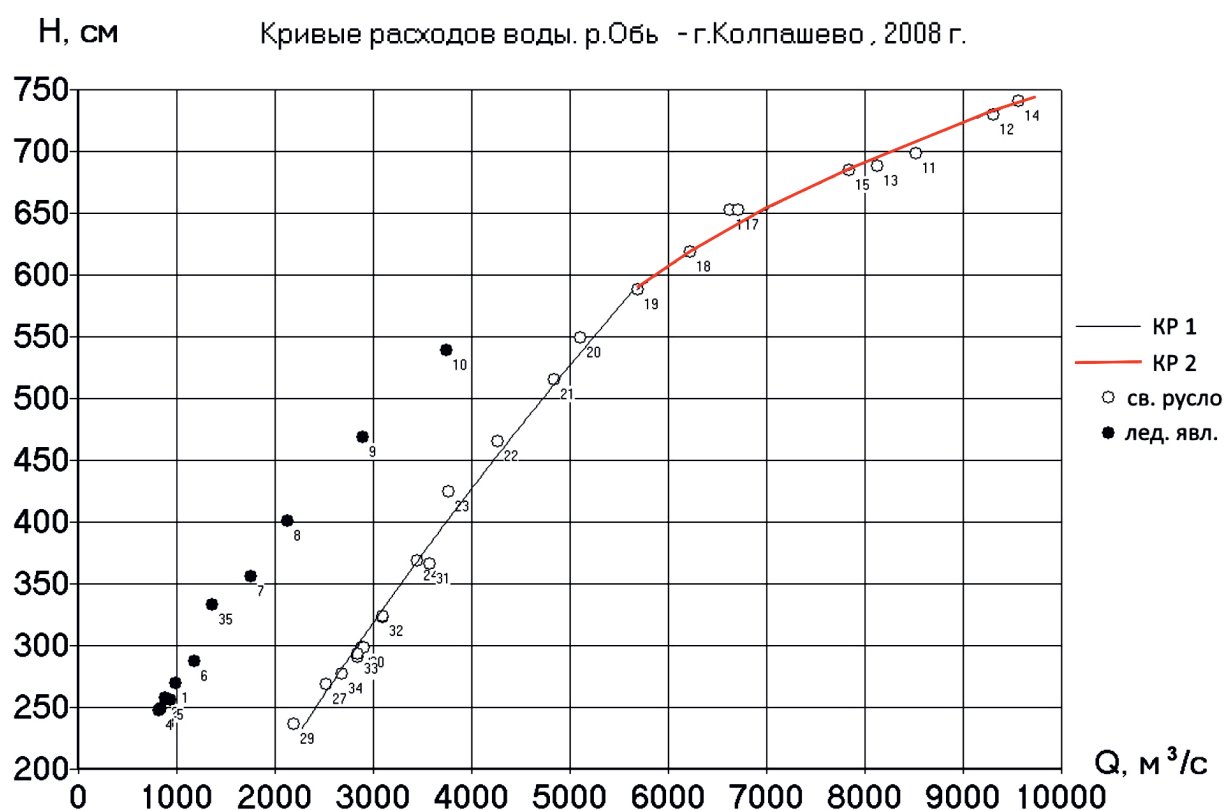


Рисунок Г.3 – Зависимость расходов от уровней воды, полученная методом кусочно-полиномиальной аппроксимации, ГП р. Обь - г. Колпашево, 2008 год

Как видно из рисунка Г.3, представление КР в виде двух отрезков позволило значительно уменьшить разброс точек ИРВ относительно КР.

Г.3 Осуществим проверку на достоверность всех ИРВ за период свободного русла 2008 года. С этой целью составляется таблица измеренных расходов воды (см. таблицу Г.4). По формуле (5.2) вычисляются относительные отклонения ИРВ от КР (см. графу 9 таблицы Г.4) и их процентные значения (см. графу 10 таблицы Г.4).

Т а б л и ц а Г.4 – Таблица измеренных расходов воды и относительные отклонения ИРВ от КР, ГП р. Обь - г. Колпашево, период свободного русла 2008 года

№ ИРВ	Дата	№ гидроствора	H, м	Q _и , м ³ /с	ω, м ²	V _{ср} , м/с	Q _{КР 1} , м ³ /с	q̃ _и	q̃ _и , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	30.04.08	4	6,95	8480	6810	1,25	8165	0,039	3,85
12	07.05.08	4	7,26	9260	7090	1,31	9154	0,012	1,16
13	13.05.08	4	6,85	8080	6710	1,2	7872	0,026	2,64
14	24.05.08	4	7,37	9510	7150	1,33	9534	-0,002	-0,25
15	30.05.08	4	6,82	7800	6710	1,17	7787	0,002	0,17
16	02.06.08	4	6,5	6590	6200	1,08	6946	-0,051	-5,13
17	02.06.08	4	6,5	6680	6200	1,08	6946	-0,038	-3,83
18	13.06.08	4	6,16	6190	6000	1,03	6195	-0,001	-0,07
19	20.06.08	4	5,86	5660	5830	0,97	5652	0,001	0,14
20	26.06.08	4	5,47	5080	5610	0,91	5205	-0,024	-2,40
21	01.07.08	4	5,13	4820	5490	0,88	4850	-0,006	-0,61
22	05.07.08	4	4,64	4240	5220	0,81	4353	-0,026	-2,60
23	10.07.08	4	4,23	3750	5010	0,75	3952	-0,051	-5,12
24	23.07.08	4	3,68	3430	4720	0,73	3435	-0,001	-0,15
25	30.07.08	4	3,22	3080	4510	0,68	3020	0,020	1,97
26	09.08.08	4	2,9	2830	4350	0,65	2742	0,032	3,23
27	20.08.08	4	2,68	2510	4250	0,59	2554	-0,017	-1,74
28	30.08.08	4	2,98	2870	4400	0,65	2811	0,021	2,12
29	13.09.08	4	2,36	2180	4080	0,53	2289	-0,048	-4,77
30	21.09.08	4	2,98	2890	4390	0,66	2811	0,028	2,83
31	30.09.08	4	3,65	3560	4730	0,75	3408	0,045	4,48
32	10.10.08	4	3,23	3080	4510	0,68	3029	0,017	1,68
33	21.10.08	4	2,93	2830	4370	0,65	2767	0,023	2,26
34	02.11.08	4	2,77	2670	4290	0,62	2631	0,015	1,50
11	30.04.08	4	6,95	8480	6810	1,25	8165	0,039	3,85
12	07.05.08	4	7,26	9260	7090	1,31	9154	0,012	1,16
13	13.05.08	4	6,85	8080	6710	1,2	7872	0,026	2,64
14	24.05.08	4	7,37	9510	7150	1,33	9534	-0,002	-0,25
15	30.05.08	4	6,82	7800	6710	1,17	7787	0,002	0,17
16	02.06.08	4	6,5	6590	6200	1,08	6946	-0,051	-5,13
17	02.06.08	4	6,5	6680	6200	1,08	6946	-0,038	-3,83
18	13.06.08	4	6,16	6190	6000	1,03	6195	-0,001	-0,07
19	20.06.08	4	5,86	5660	5830	0,97	5652	0,001	0,14
20	26.06.08	4	5,47	5080	5610	0,91	5205	-0,024	-2,40
21	01.07.08	4	5,13	4820	5490	0,88	4850	-0,006	-0,61
22	05.07.08	4	4,64	4240	5220	0,81	4353	-0,026	-2,60
23	10.07.08	4	4,23	3750	5010	0,75	3952	-0,051	-5,12
24	23.07.08	4	3,68	3430	4720	0,73	3435	-0,001	-0,15
25	30.07.08	4	3,22	3080	4510	0,68	3020	0,020	1,97
26	09.08.08	4	2,9	2830	4350	0,65	2742	0,032	3,23
27	20.08.08	4	2,68	2510	4250	0,59	2554	-0,017	-1,74
28	30.08.08	4	2,98	2870	4400	0,65	2811	0,021	2,12
29	13.09.08	4	2,36	2180	4080	0,53	2289	-0,048	-4,77
30	21.09.08	4	2,98	2890	4390	0,66	2811	0,028	2,83
31	30.09.08	4	3,65	3560	4730	0,75	3408	0,045	4,48
32	10.10.08	4	3,23	3080	4510	0,68	3029	0,017	1,68
33	21.10.08	4	2,93	2830	4370	0,65	2767	0,023	2,26
34	02.11.08	4	2,77	2670	4290	0,62	2631	0,015	1,50
Сумма квадратов								0,019	-

Как видно из графы 10 таблицы Г.4, значения относительных отклонений ИРВ от КР не превышают допустимое значение $2\sigma_{\tilde{q}} = 2 \cdot 3,27 = 6,6 \%$, и согласно критерию (5.12) все ИРВ признаются достоверными.

Г.4 Осуществим оценку однозначности полученной зависимости в соответствии с критерием Фишера (5.23).

Г.4.1 В совокупности насчитывается $n = 24$ ИРВ. В этом случае критическое значение распределения Фишера при уровне значимости 5 % в соответствии таблицей 5.1 составляет

$$F_{кр} = 1,52. \quad (\text{Г.1})$$

Г.4.2 Вычислим значение дисперсии по результатам оценки рассеяния связи $Q(H)$ по формуле (5.23). Число степеней свободы k равно количеству переменных в УР. В нашем случае $k = 3$ (Q, H, H^2).

$$D_{\tilde{q}} = \frac{1}{24 - 3} \cdot 0,019 = 0,0009. \quad (\text{Г.2})$$

Г.4.3 Среднеквадратическое значение относительной погрешности ИРВ примем равной 0,06.

Г.4.4 Вычислим отношение дисперсий согласно критерию Фишера (5.23)

$$F = \frac{0,0009}{0,0036} = 0,25. \quad (\text{Г.3})$$

Как видно из (Г.1) и (Г.3), $F < F_{кр}$, а значит, полученная зависимость $Q(H)$ удовлетворяет критерию Фишера при заданном уровне значимости.

Г.5 Из графика остатков регрессии $\tilde{q} = f(H)$, представленного на рисунке Г.2 (2) видно, что при высоких уровнях воды отсутствует систематический характер относительных отклонений ИРВ от осредняющей КР, следовательно, проведение анализа КР на однозначность по критерию знаков (5.25), (5.26) нецелесообразно, и зависимость $Q(H)$ за 2008 год может быть признана однозначной.

Г.6 На следующем этапе осуществляется увязка зависимостей расхода воды и его элементов от уровня воды в соответствии с 6.1.8.

Г.6.1 Как видно из таблицы Г.4, все измерения в период свободного русла осуществлялись в гидростворе № 4. Зависимости $\omega(H)$ можно строить только по данным одного створа. Полученная зависимость $\omega(H)$ для диапазона уровней от 2,33 до 7,41 м:

$$\omega(H) = 1502 + 1629,2 \cdot H - 290,09 \cdot H^2 + 23,609 \cdot H^3. \quad (\text{Г.4})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $\omega(H)$ уравнением (Г.4):

- коэффициент корреляции $R = 0,999$;

- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_\omega = 0,9 \%$;

- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_\omega = 0,002 \%$.

Г.6.2 Полученная зависимость $V(H)$ для диапазона уровней от 2,33 до 7,41 м:

$$V_{\text{ср}}(H) = -0,3719 + 0,631 \cdot H - 0,126 \cdot H^2 + 0,00978 \cdot H^3, \quad (\text{Г.5})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $V(H)$ уравнением (Г.5):

- коэффициент корреляции $R = 0,998$;

- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_v = 1,8 \%$;

- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_v = 0,075 \%$.

Г.6.3 Процедура увязки зависимостей расхода воды и его элементов от уровня воды представлена в таблице Г.5. Сопоставляются расходы воды, полученные через каждые 5 % амплитуды уровня воды. Результаты увязки зависимостей расхода воды и его элементов от уровня воды по формуле (6.1) представлены в графе 4 таблицы Г.5. Вычисленные по формуле (6.2) относительные расхождения значений расходов, рассчитанных по УР $Q(H_i)$ (графа 5 таблицы Г.5), и значений $Q_v(H_i)$ представлены в графе 6 таблицы Г.5. Допустимые значения расхождений $\tilde{\sigma}_{\text{доп}}$, определяемые по формуле (6.3), представлены в графе 9 таблицы Г.5.

Как видно из граф 6 и 9 таблицы Г.5, относительные расхождения значений расходов, рассчитанных по УР $Q(H)$ и формуле (6.1), незначительно превышают значения $\tilde{\sigma}_{\text{доп}}$ в диапазоне уровней в нижней и верхней частях диапазона уровней, а также в диапазоне от 4,62 до 5,38.

Т а б л и ц а Г.5 – Результаты увязки связей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$, ГП р. Обь - г. Колпашево, 2008 год

H , м	$\omega(H)$, м ²	$V(H)$, м/с	$Q_v(H) = \omega(H) \cdot V(H)$, м ³ /с	$Q(H)_{\text{УР}}$, м ³ /с	$\Delta \tilde{Q}_i$, %	$\omega(H)_i^2 \cdot \sigma_\omega^2$	$V(H)_i^2 \cdot \sigma_v^2$	$\tilde{\sigma}_{\text{доп}}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,33	4022	0,54	2164	2265	4,45	1320	0,0001	3,21
2,58	4182	0,59	2451	2474	0,93	1427	0,0001	3,05
2,84	4329	0,63	2717	2688	1,05	1529	0,0001	2,91
3,09	4464	0,66	2962	2908	1,88	1626	0,0001	2,77
3,35	4590	0,70	3191	3132	1,86	1719	0,0002	2,65
3,60	4709	0,72	3405	3362	1,28	1810	0,0002	2,53

Продолжение таблицы Г.5

$H, \text{ м}$	$\omega(H), \text{ м}^2$	$V(H), \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{у}}(H) = \omega(H) \cdot V(H), \text{ м}^3/\text{с}$	$Q(H)_{\text{ур}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta \bar{Q}_i, \%$	$\omega(H)_i^2 \cdot \sigma_{\omega}^2$	$V(H)_i^2 \cdot \sigma_V^2$	$\tilde{\sigma}_{\text{доп}}, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,85	4824	0,75	3610	3596	0,37	1899	0,0002	2,42
4,11	4936	0,77	3810	3836	0,66	1988	0,0002	2,33
4,36	5048	0,79	4013	4080	1,65	2080	0,0002	2,24
4,62	5163	0,82	4223	4330	2,45	2176	0,0002	2,15
4,87	5283	0,84	4450	4584	2,92	2278	0,0002	2,08
5,12	5410	0,87	4701	4843	2,95	2388	0,0002	2,02
5,38	5546	0,90	4983	5108	2,43	2510	0,0003	1,96
5,63	5694	0,93	5309	5377	1,27	2646	0,0003	1,91
5,89	5856	0,97	5687	5695	0,13	2798	0,0003	1,86
6,14	6034	1,02	6131	6155	0,39	2971	0,0003	1,77
6,39	6231	1,07	6654	6696	0,63	3168	0,0004	1,68
6,65	6449	1,13	7273	7319	0,63	3394	0,0004	1,59
6,90	6690	1,20	8005	8023	0,23	3652	0,0004	1,51
7,16	6957	1,28	8871	8809	0,71	3950	0,0005	1,43
7,41	7252	1,36	9896	9676	2,27	4292	0,0006	1,35

Приложение Д (обязательное)

Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном состоянии русла при наличии однозначной годовой зависимости расходов от уровней воды

Д.1 Рассмотрим расчет ЕРВ за период свободного русла 2008 года р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево.

Д.2 В приложении Г приведена аппроксимация зависимости расходов от уровней воды периода свободного русла 2008 года, выполнена оценка однозначности полученной КР и увязка зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$. Годовая КР признана однозначной и может быть использована для расчета ЕРВ периода свободного русла 2008 года.

Д.3 В качестве УР принята зависимость, полученная методом кусочно-полиномиальной регрессии (см. рисунок Г.3).

Для диапазона уровней от 2,33 до 5,86 м (КР 1):

$$Q(H) = 576,91 + 634,01 \cdot H + 38,766 \cdot H^2. \quad (\text{Д.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (Д.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,388$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 3,06 \%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = 0,21 \%$.

Для диапазона уровней от 5,86 до 7,41 м (КР 2):

$$Q(H) = 17815,9 - 5769,9 \cdot H + 630,41 \cdot H^2. \quad (\text{Д.2})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (Д.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,715$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 3,27 \%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = -0,15 \%$.

Д.4 Примеры расчета ЕРВ представлены в таблице Д.1.

Т а б л и ц а Д.1 – Расчет ЕРВ периода свободного русла 2008 года, ГП р. Обь - г. Колпашево

Дата	H , м	Номер используемой КР	$Q_{и}$, м ³ /с	$Q_{КР}$, м ³ /с
1	2	3	4	5
10.06.08	6,20	2	-	6280
11.06.08	6,20	2	-	6280
12.06.08	6,19	2	-	6260
13.06.08	6,15	2	6190	6180
14.06.08	6,11	2	-	6100
15.06.08	6,05	2	-	5980
16.06.08	5,99	2	-	5870
17.06.08	5,94	2	-	5790
18.06.08	5,93	2	-	5770
19.06.08	5,89	2	-	5700
20.06.08	5,85	1	5660	5610
21.06.08	5,80	1	-	5560
22.06.08	5,74	1	-	5490
23.06.08	5,69	1	-	5440
24.06.08	5,61	1	-	5350
25.06.08	5,52	1	-	5260
26.06.08	5,47	1	5080	5210
27.06.08	5,42	1	-	5150
28.06.08	5,34	1	-	5070
29.06.08	5,27	1	-	5000

Д.5 Рассмотрим примеры расчета расходов воды на конкретные даты.

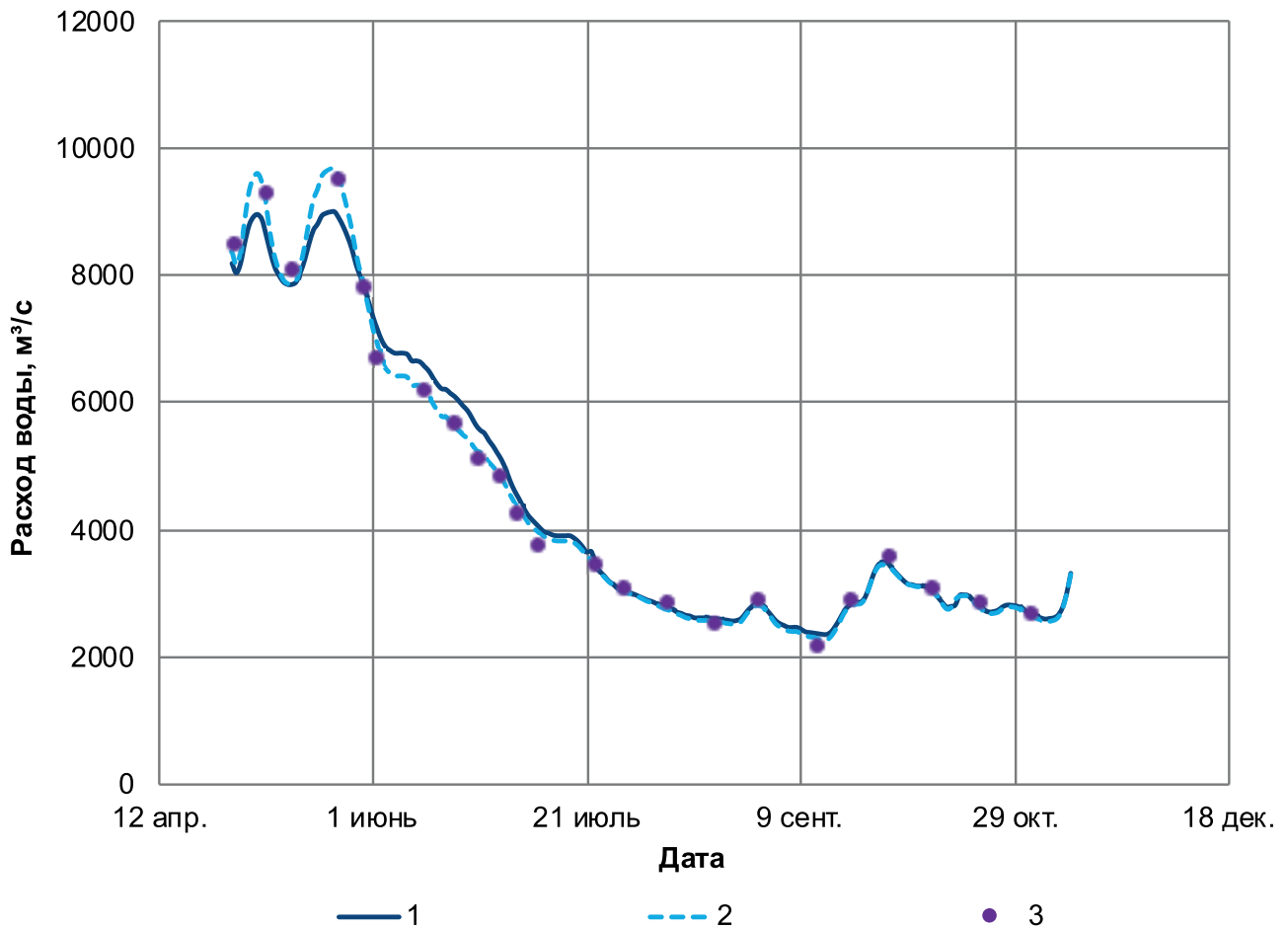
Д.5.1 Средний суточный уровень воды на дату 10 июня (6,20 м) (графа 2 таблицы Д.1) попадает в диапазон, описываемый уравнением Д.2. Вычисляем ЕРВ (графа 5 таблицы Д.1)

$$Q(H)_{10.06} = 17815,9 - 5769,9 \cdot 6,20 + 630,41 \cdot 6,20^2 = 6280 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Д.3})$$

Д.5.2 средний суточный уровень воды на дату 25 июня (5,52 м) (графа 2 таблицы Д.1) попадает в диапазон, описываемый уравнением Д.1. Вычисляем ЕРВ (графа 5 таблицы Д.1)

$$Q(H)_{25.06} = 576,91 + 634,01 \cdot 5,52 + 38,766 \cdot 5,52^2 = 5260 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Д.4})$$

Д.6 На рисунке Д.1 представлен гидрограф периода свободного русла 2008 года р. Обь в гидростворе г. Колпашево. Как видно из рисунка Д.1, расходы воды, полученные с использованием метода кусочно-полиномиальной регрессии, соответствуют измеренным расходам лучше, чем ЕРВ, опубликованные в ЕДС.



1 – ЕРВ по данным ЕДС;
 2 – ЕРВ, вычисленные по КР, полученной методом кусочно-полиномиальной регрессии;
 3 – ИРВ

Рисунок Д.1 – Гидрограф периода свободного русла (с 29 апреля по 11 ноября) 2008 года, ГП р. Обь - г. Колпашево

Приложение Е

(обязательное)

**Пример аппроксимации многолетней зависимости расходов
от уровней воды $Q(H)$**

Е.1 Рассмотрим пример аппроксимации многолетней зависимости $Q(H)$ р. Сыда в гидростворе ГП с. Отрок. Для получения УРМ использованы данные таблиц «Измеренные расходы воды» за 2001, 2005 – 2012, 2014 – 2015 годы. Лучшие результаты аппроксимации для диапазона уровней воды от 1,75 до 4,28 м получены при использовании двух методов: параболы Глушкова и метода полиномиальной регрессии с ограничениями в точке $H_{\text{низш}} = 1,5$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 0,00$ м³/с. Параметры полученных зависимостей представлены в таблице Е.1. Результаты сравнения алгоритмов представлены в таблице Е.2.

Т а б л и ц а Е.1 – Параметры УРМ, аппроксимирующих многолетнюю зависимость $Q(H)$

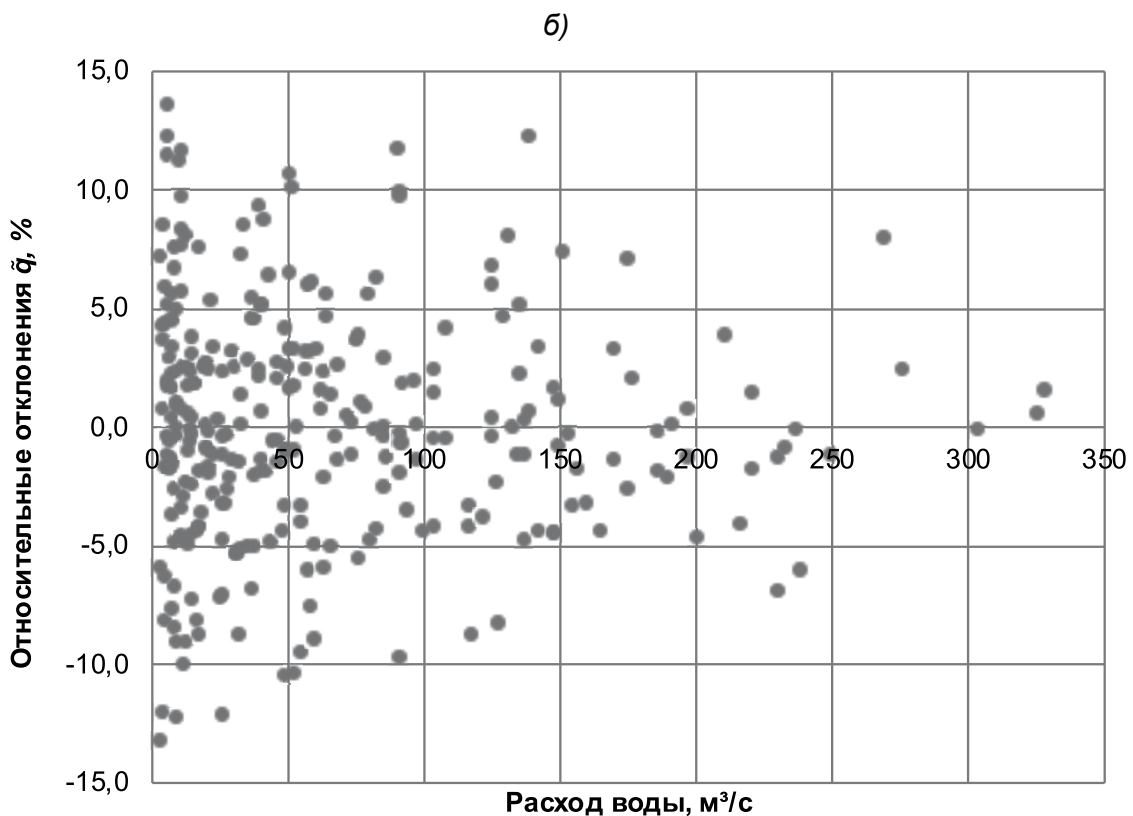
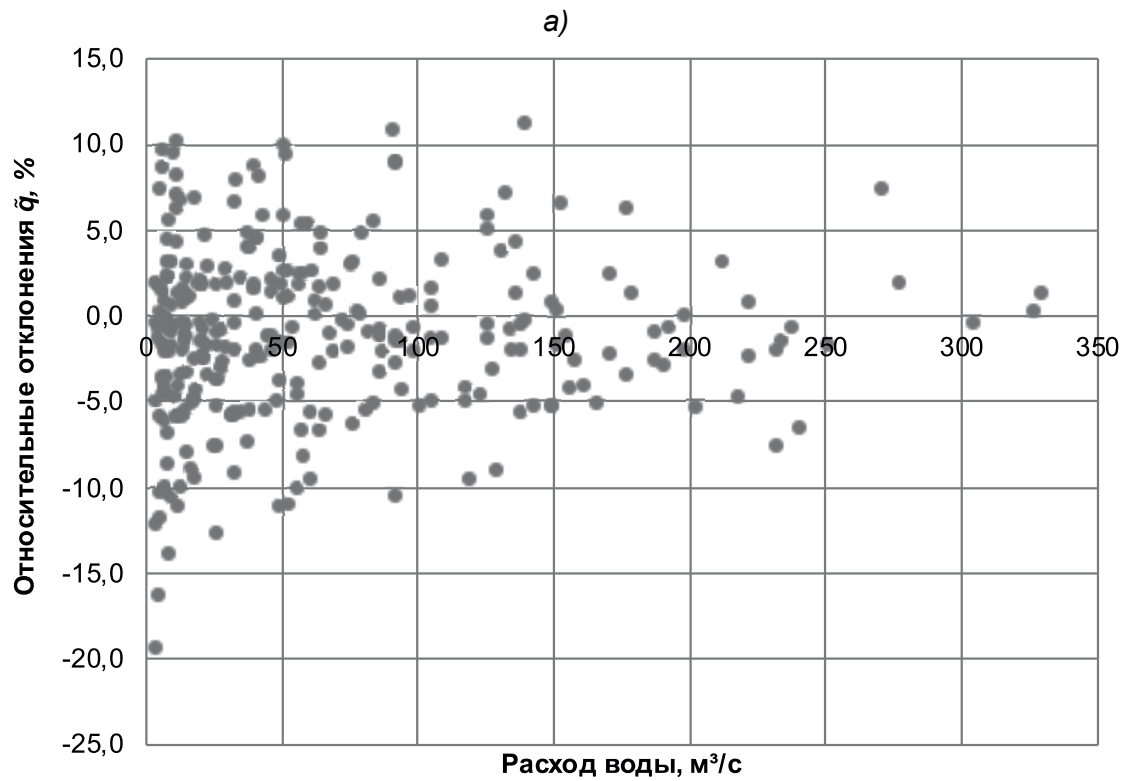
Коэффициенты УРМ	Парабола Глушкова	Полином с ограничениями
1	2	3
a_0	35,37	71,986
a_1	2,1352	-93,056
a_2	-	26,99
a_3	-	2,0352
H_0	1,44	-
Коэффициент корреляции R	0,999	0,996

Т а б л и ц а Е.2 – Расхождения измеренных и расчетных расходов воды

Наименование параметра	Вид аппроксимации			
	Парабола Глушкова		Полином с ограничениями	
Отклонения	ср.	СКО	ср.	СКО
Абсолютные, м ³ /с	-0,019	3,66	0,00	3,66
Относительные, %	0,12	4,97	0,02	4,97

Е.2 На рисунке Е.1 показаны графики относительных отклонений ИРВ от аппроксимирующих кривых $\tilde{q}(Q_{\text{расч}})$.

Е.3 Из рисунка Е.1а видно, в нижней части кривой точки ИРВ отклоняются влево почти на 20 %, в то время как на рисунке Е.1б точки расположены равномерной относительно МКР. Следовательно, в качестве УРМ следует принять зависимость, полученную методом полиномиальной регрессии с ограничениями (рисунок Е.2)



- а) – УРМ получено методом параболы Глушкова;
 б) – УРМ получено методом полиномиальной регрессии с ограничениями

Рисунок Е.1 – График относительных отклонений ИРВ от УРМ, ГП р. Сыда – с. Отрок, 2001, 2005–2012, 2014–2015 годы при различных способах аппроксимации

$$Q(H) = 71,986 - 93,056 \cdot H + 26,99 \cdot H^2 + 2,0352 \cdot H^3. \quad (\text{E.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (E.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,996$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 4,97 \%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = 0,02 \%$.

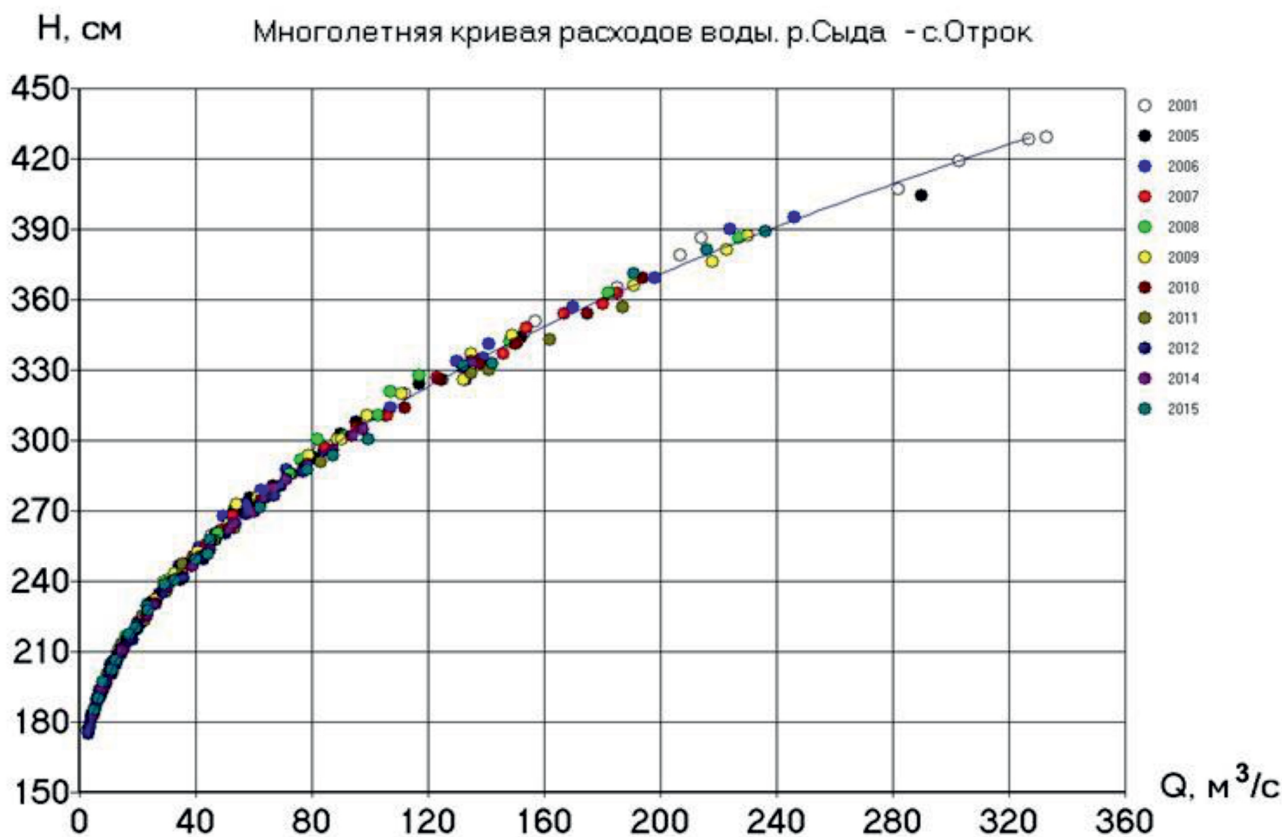


Рисунок E.2 – Многолетняя зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Сыда – с. Отрок, 2001, 2005-2012, 2014-2015 годы

E.4 Осуществим оценку однозначности полученной МКР в соответствии с критерием Фишера (5.23).

E.4.1 Общее число ИРВ, использованное в процедуре поиска УРМ, составило $n = 296$. Критериальное значение распределения Фишера при уровне значимости 5 % для имеющегося числа ИРВ $n = 296$ в соответствии с таблицей 5.1 составляет

$$F_{кр} = 1,14. \quad (\text{E.2})$$

E.4.2 Вычислим значение дисперсии по результатам оценки рассеяния связи $Q(H)$ по формуле (5.23). Число степеней свободы $k = 4$ (Q, H, H^2, H^3).

$$D_{\bar{q}} = \frac{1}{296 - 4} \cdot 0,725 = 0,0025. \quad (\text{E.3})$$

Е.4.3 Среднеквадратическое значение относительной погрешности ИРВ примем равной 0,06.

Е.4.4 Вычислим отношение дисперсий согласно критерию Фишера (5.23)

$$F = \frac{0,0025}{0,0036} = 0,69. \quad (\text{E.4})$$

Как видно из (E.2) и (E.4), $F < F_{кр}$, а значит, зависимость (E.1) удовлетворяет критерию Фишера при заданном уровне значимости.

Е.5 Из рисунка E.1б видно, что при высоких уровнях воды отсутствует систематический характер относительных отклонений ИРВ от МКР, следовательно, проведение анализа МКР на однозначность по критерию знаков (5.25), (5.26) нецелесообразно, и многолетняя зависимость $Q(H)$ может быть признана однозначной.

Е.6 В результате аппроксимации зависимостей $\omega(H)$ и $V(H)$ получены следующие уравнения:

$$\omega(H) = -353,11 + 399,957 \cdot H - 140,093 \cdot H^2 + 17,851 \cdot H^3. \quad (\text{E.5})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $\omega(H)$ уравнением (E.5):

- коэффициент корреляции $R = 0,991$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_\omega = 10,8 \%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_\omega = 0,46 \%$.

$$V(H) = 2,395 - 3,662 \cdot H + 1,76 \cdot H^2 - 0,22 \cdot H^3. \quad (\text{E.6})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $V(H)$ уравнением (E.6):

- коэффициент корреляции $R = 0,989$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_v = 11,0 \%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_v = 0,23 \%$.

При получении уравнений (E.5) и (E.6) ограничения задавались в точке высшего наблюдаемого уровня воды. При $H = 4,28$ м соответственно были заданы $\omega = 192$ м², $V = 1,73$ м/с.

Е.7 Процедура увязки зависимостей расхода воды и его элементов от уровня воды представлена в таблице E.3. Сопоставляются расходы воды, полученные через каждые 5 % амплитуды уровня воды. Результаты увязки зависимостей расхода воды и его элементов от уровня воды по формуле (6.1) представлены в графе 4. Вычисленные по формуле (6.2) относительные расхождения значений расходов, рассчитанных по УРМ $Q(H_i)$, представлены в графе 5, значения $Q_y(H_i)$ представлены в графе 6. Допустимые значения расхождений $\tilde{\sigma}_{доп}$, определяемые по формуле (6.3), представлены в графе 9.

Как видно из граф 6 и 9 таблицы Е.3, все расхождения не превышают значения $\tilde{\sigma}_{\text{доп}}$, определяемого согласно формуле (6.3).

Т а б л и ц а Е.3 – Результаты увязки связей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$, ГП р. Сыда – с. Отрок, 2001, 2005 – 2012, 2014 – 2015 годы

H , м	$\omega(H)$, м ²	$V(H)$, м/с	$Q_y(H) = \omega(H) \cdot V(H)$, м ³ /с	$Q(H)_{\text{УРМ}}$, м ³ /с	$\Delta \bar{Q}_1$, %	$\omega_i^2 \cdot \sigma_\omega^2$	$V_i^2 \cdot \sigma_V^2$	$\tilde{\sigma}_{\text{доп}}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,75	13,5	0,197	2,66	2,70	1,49	2,1	0,0005	53,8
1,88	22,1	0,267	5,89	5,85	0,64	5,7	0,0009	40,6
2,00	29,4	0,353	10,4	10,2	1,45	10,0	0,0015	30,9
2,13	35,7	0,453	16,2	15,9	1,95	14,8	0,0025	24,2
2,26	41,1	0,565	23,3	22,8	2,01	19,7	0,0039	19,5
2,38	46,0	0,685	31,5	31,0	1,63	24,6	0,0057	16,0
2,51	50,4	0,812	40,9	40,6	0,90	29,5	0,0080	13,4
2,64	54,7	0,941	51,5	51,5	0,01	34,7	0,0107	11,5
2,76	59,0	1,07	63,2	63,7	0,87	40,4	0,0139	10,0
2,89	63,5	1,20	76,2	77,4	1,59	46,8	0,0175	8,8
3,02	68,5	1,32	90,7	92,5	2,02	54,5	0,0212	8,0
3,14	74,2	1,44	107	109	2,09	64,0	0,0251	7,3
3,27	80,8	1,55	125	127	1,77	75,8	0,0290	6,8
3,39	88,5	1,64	145	147	1,09	91,0	0,0326	6,5
3,52	97,6	1,72	168	168	0,14	110,5	0,0358	6,3
3,65	108	1,78	192	190	0,96	135,8	0,0383	6,1
3,77	121	1,82	219	215	2,02	168,7	0,0400	6,1
3,90	135	1,83	247	240	2,80	211,2	0,0407	6,0
4,03	151	1,82	276	268	3,02	266,2	0,0403	6,1
4,15	170	1,78	304	297	2,34	337,1	0,0386	6,2
4,28	192	1,71	329	328	0,38	428,0	0,0356	6,3

Приложение Ж
(обязательное)

**Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном состоянии русла
при наличии однозначной многолетней зависимости
расходов от уровней воды**

Ж.1 Рассмотрим расчет ЕРВ за период свободного русла 2015 года р. Сыда в гидростворе ГП с. Отрок.

Ж.2 В приложении Е приведена аппроксимация многолетней зависимости расходов от уровней воды р. Сыда в гидростворе ГП с. Отрок, выполнена оценка однозначности полученной МКР и увязка зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$. МКР признана однозначной и может быть использована для расчета ЕРВ периода свободного русла 2015 года.

Ж.3 В качестве УРМ принята зависимость, полученная методом полиномиальной регрессии с ограничениями (см. рисунок В.2).

$$Q(H) = 71,986 - 93,056 \cdot H + 26,99 \cdot H^2 + 2,0352 \cdot H^3. \quad (\text{Ж.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (Ж.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,996$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\tilde{q}} = 4,97\%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\tilde{q}} = 0,02\%$.

Ж.4 С целью проверки условия (6.5) для подтверждения или опровержения устойчивой многолетней связи $Q(H)$ вычисляется относительное отклонения каждого ИРВ расчетного периода от УРМ (таблица Ж.1). Как видно из таблицы Ж.1, относительные отклонения всех ИРВ периода свободного русла 2015 года находятся в пределах доверительного интервала среднеквадратического значения рассеяния многолетней связи $Q(H)$ ($2\sigma_{\tilde{q}} = 10,0\%$).

Т а б л и ц а Ж.1 – Проверка устойчивости МКР для расчета ЕРВ периода свободного русла 2015 года, ГП р. Сыда – с. Отрок

Дата	$H_{и}, \text{ м}$	$Q_{и}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{МКР}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$\tilde{\delta}Q, \%$
1	2	3	4	5
22.04.15	3,00	99,5	90,7	9,7
23.04.15	3,32	142	135	5,2
25.04.15	3,70	191	200	-4,6
25.04.15	3,80	216	220	-1,7
26.04.15	3,88	236	236	-0,1

Продолжение таблицы Ж.1

Дата	$H_{и}$, м	$Q_{и}$, м ³ /с	$Q_{МКР}$, м ³ /с	$\tilde{\delta}Q$, %
1	2	3	4	5
29.04.15	3,31	132	133	-1,1
01.05.15	2,87	78,3	75,3	3,9
03.05.15	2,71	62,1	58,5	6,1
07.05.15	2,51	44,2	40,6	8,7
18.05.15	2,63	56,1	51,0	10,1
19.05.15	2,93	87,4	82,2	6,3
27.05.15	2,49	40,0	39,0	2,4
03.06.15	2,40	32,7	32,3	1,4
07.06.15	2,38	29,2	30,8	-5,3
09.06.15	2,29	23,1	24,9	-7,1
24.06.15	1,97	8,16	8,97	-9,1
01.07.15	1,90	6,47	6,57	-1,6
19.07.15	1,85	5,03	5,09	-1,2
04.08.15	2,57	45,0	45,7	-1,4
12.08.15	2,06	12,7	12,6	0,6
22.08.15	2,02	11,2	10,9	2,6
18.09.15	2,20	19,4	19,6	-0,9
25.09.15	2,27	23,7	23,6	0,3
03.10.15	2,62	55,4	50,1	10,7
01.11.15	2,17	17,3	18,0	-3,6

Ж.5 Примеры расчета ЕРВ представлены в таблице Ж.2.

Т а б л и ц а Ж.2 – Расчет ЕРВ периода свободного русла 2015 года, ГП р. Сыда – с. Отрок

Дата	H , м	$H_{и}$, м	$Q_{и}$, м ³ /с	$Q_{КР}$, м ³ /с
1	2	3	4	5
20.05.15	2,80	-	-	69,9
21.05.15	2,68	-	-	57,5
22.05.15	2,63	-	-	52,7
23.05.15	2,69	-	-	58,5
24.05.15	2,59	-	-	49,0
25.05.15	2,55	-	-	45,5
26.05.15	2,47	-	-	38,7
27.05.15	2,47	2,49	40,0	38,7
28.05.15	2,54	-	-	44,6
29.05.15	2,56	-	-	46,3
30.05.15	2,67	-	-	56,5
31.05.15	2,50	-	-	41,2
01.06.15	2,45	-	-	37,1
02.06.15	2,43	-	-	35,6
03.06.15	2,40	2,40	32,7	33,3

Например, средний суточный уровень воды на дату 30 мая равен 2,67 м (графа 2 таблицы Ж.2). Вычисляем ЕРВ (графа 5 таблицы Ж.2)

$$Q(H)_{30.05} = 71,986 - 93,056 \cdot 2,67 + 26,99 \cdot 2,67^2 + 2,0352 \cdot 2,67^3 = 56,5 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Ж.2})$$

Ж.6 На рисунке Ж.1 представлен гидрограф периода свободного русла 2015 года р. Сыда в гидростворе ГП с. Отрок.

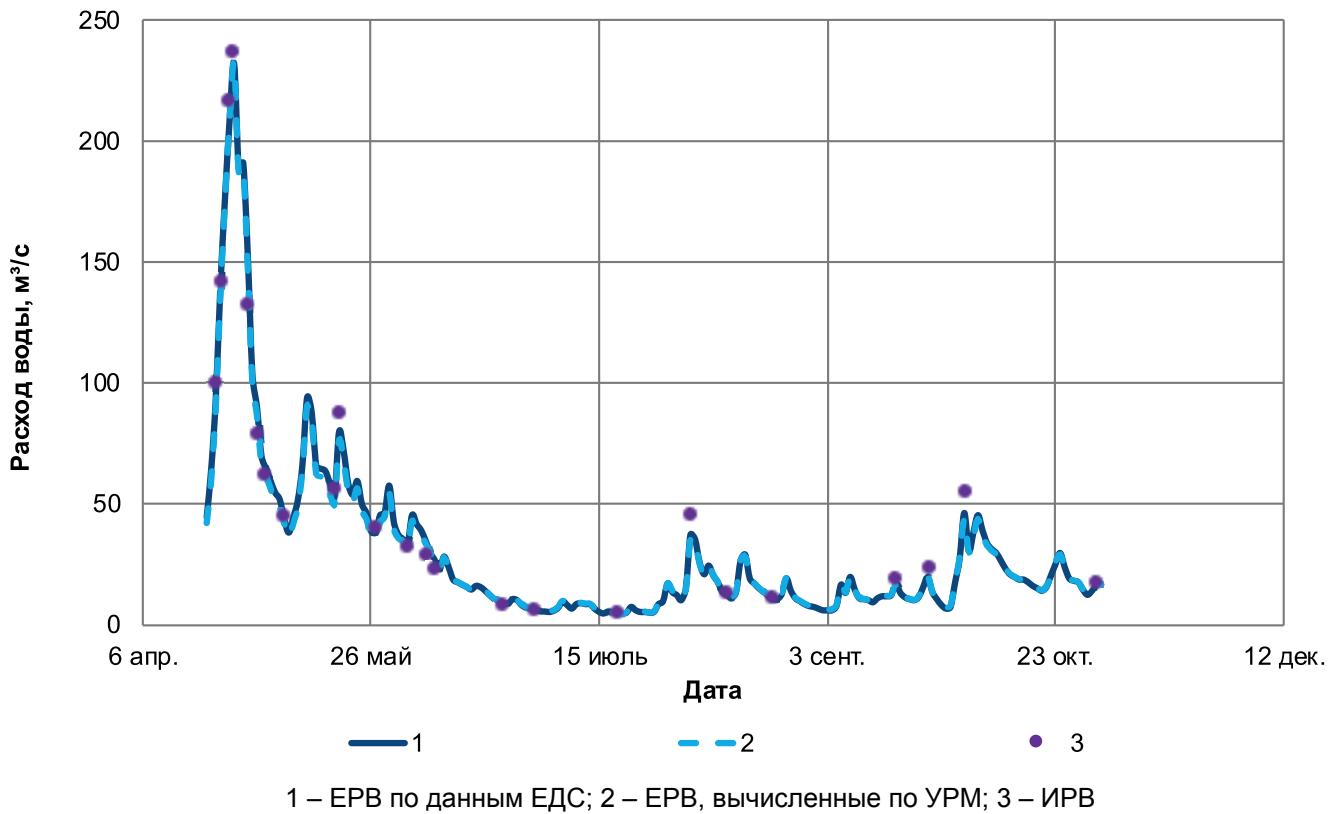


Рисунок Ж.1 – Гидрограф периода свободного русла (с 20 апреля по 2 ноября) 2015 года, ГП р. Сыда – с. Отрок

Приложение И

(обязательное)

**Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном русле
в условиях неустановившегося движения речного потока**

И.1 Рассмотрим пример использования метода оптимальной интерполяции относительных отклонений для расчета ЕРВ в период неустановившегося движения речного потока. На рисунке И.1 представлены годовые зависимости $Q(H)$ р. Кас в гидростворе ГП пос. Александровский Шлюз. Как видно из рисунка И.1, для этой реки характерно практически ежегодное образование паводочных петель в периоды половодья.

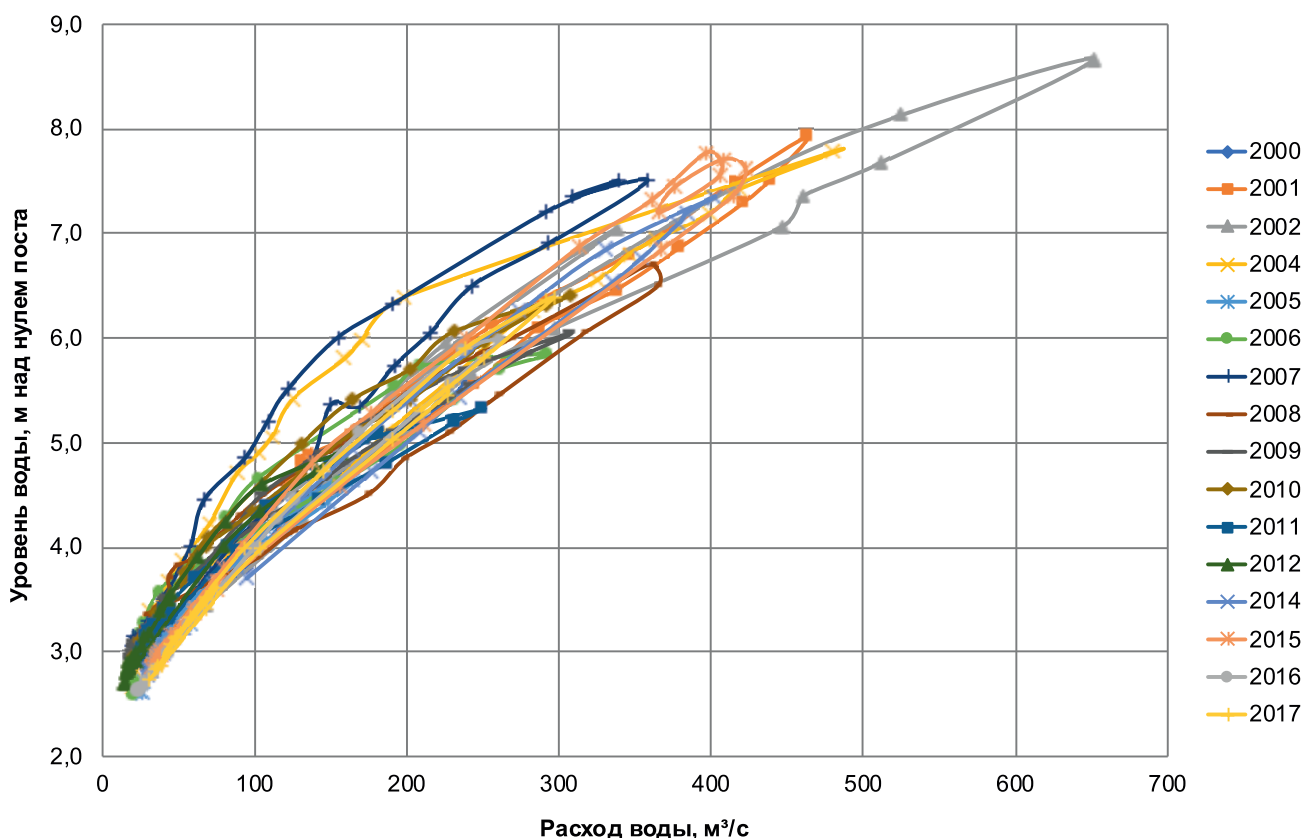


Рисунок И.1 – Годовые зависимости расходов от уровней воды с 2000 по 2017 годы, ГП р. Кас - пос. Александровский Шлюз

И.2 В 2015 году продолжительность периода половодья р. Кас в гидростворе ГП пос. Александровский Шлюз составила $T_n = 73$ сут (с 20 апреля по 1 июля). С 20 по 23 апреля наблюдались остаточные забереги, что не должно было существенно повлиять на пропускную способность русла.

И.3 Выполняем аппроксимацию зависимости $Q(H)$ за 2015 год согласно алгоритмам, изложенным в приложении А (см. рисунок И.2). Диапазон уровней воды за год составил от 2,82 до 7,78 м. Наиболее оптимальная аппроксимация получена методом полиномиальной регрессии с ограничением в точке $H_{\text{низш}} = 1,97$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 0$ м³/с

$$Q(H) = 9,097 - 37,247 \cdot H + 18,258 \cdot H^2 - 0,8606 \cdot H^3. \quad (\text{И.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (И.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,964$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 7,05$ %;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = -0,01$ %.

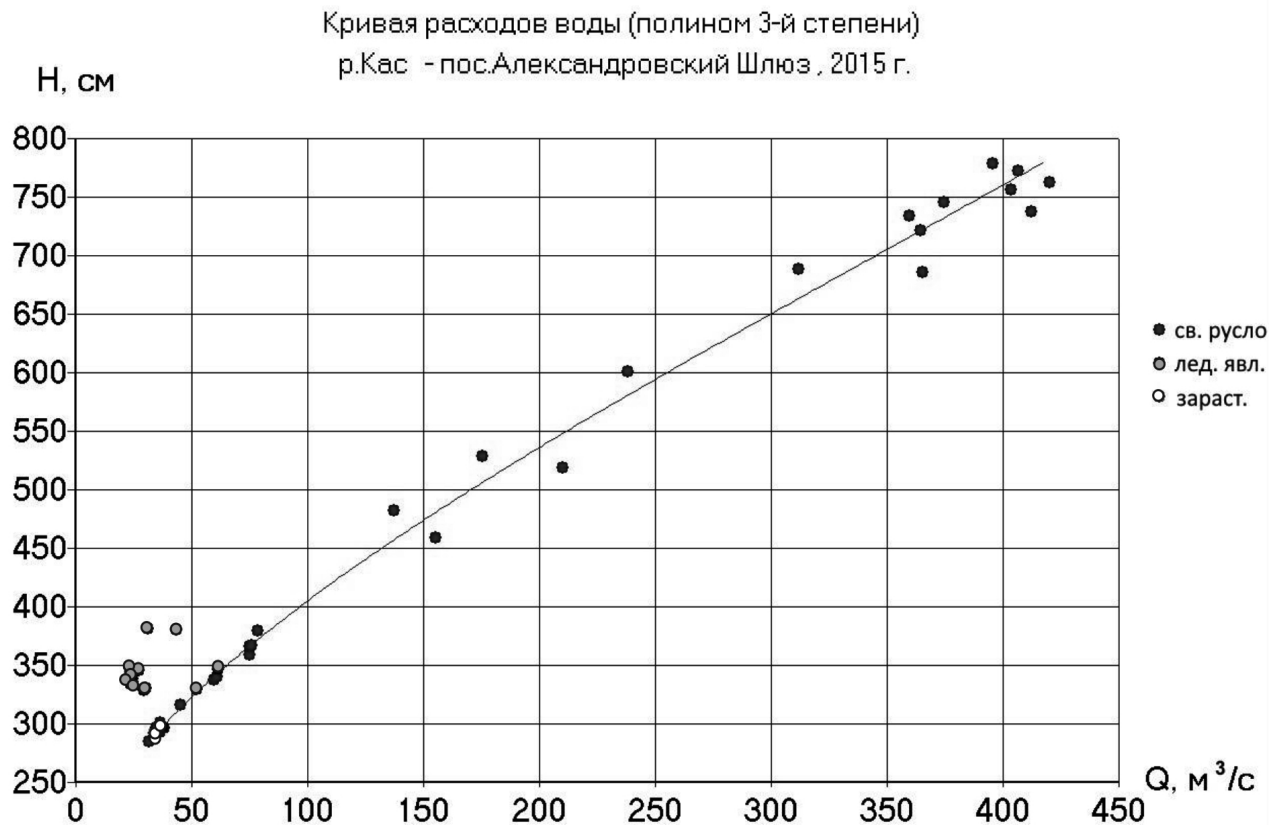


Рисунок И.2 – Годовая зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Кас - пос. Александровский Шлюз, 2015 год

И.4 В таблице И.1 приведены измеренные расходы воды за период половодья 2015 год р. Кас гидростворе ГП пос. Александровский Шлюз. В графе 7 таблицы И.1 представлены расходы, вычисленные по УР (И.1) для уровней при измерениях расходов (графа 5 таблицы И.1). Относительные отклонения ИРВ от осредняющей КР приведены в графе 8 таблицы И.1.

№ ИРВ	Дата ИРВ	СВО	$H_{и, см}$	$H_{и, м}$	$Q_{и, м^3/с}$	$Q_{ур, м^3/с}$	$\tilde{q}_{и}$	$\tau, сут$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	20.04.15	Збрг остат.	296	2,96	38,1	36,5	0,044	-
10	24.04.15	Св.	359	3,59	75,3	70,9	0,062	4
11	26.04.15	«	458	4,58	156	139	0,124	2
12	27.04.15	«	518	5,18	211	186	0,132	1
13	30.04.15	«	684	6,84	367	333	0,102	3
14	01.05.15	«	736	7,36	414	381	0,087	1
15	02.05.15	«	761	7,61	422	404	0,045	1
16	05.05.15	«	771	7,71	408	413	-0,012	3
17	07.05.15	«	744	7,44	376	388	-0,031	2
18	11.05.15	«	720	7,2	366	366	-0,001	4
19	14.05.15	«	755	7,55	405	398	0,017	3
20	16.05.15	«	777	7,77	397	418	-0,051	2
21	20.05.15	«	732	7,32	361	377	-0,043	4
22	22.05.15	«	687	6,87	313	336	-0,068	2
23	25.05.15	«	600	6	239	257	-0,070	3
24	27.05.15	«	528	5,28	176	195	-0,096	2
25	29.05.15	«	481	4,81	138	157	-0,119	2
26	14.06.15	«	379	3,79	78,7	83,3	-0,056	16
27	24.06.15	«	316	3,16	45,2	46,6	-0,029	10
28	30.06.15	«	301	3,01	36,5	38,9	-0,063	6
Сумма квадратов							0,105	-
							Среднее	4

И.5 Для использования метода оптимальной интерполяции необходимо определить меру погрешности измерения расходов за период неустановившегося движения потока по формуле (7.3). С этой целью вычислим значение дисперсии случайного процесса относительных отклонений \tilde{q} . Число степеней свободы $k = 4$ (Q, H, H^2, H^3).

$$\sigma_{\tilde{q}}^2 = \frac{\sum_1^n q_i^2}{n - k} = \frac{0,105}{20 - 4} = 0,007. \quad (\text{И.2})$$

Погрешность ИРВ примем равной 5 %. Мера погрешности равна

$$\eta = \frac{0,05^2}{0,007 - 0,05^2} = 0,61. \quad (\text{И.3})$$

И.6 Далее необходимо определить средний интервал между ИРВ в расчетном периоде (графа 9 таблицы И.1). В нашем случае $\tau_{cp} = 4$ сут.

И.7 Теоретическая автокорреляционная функция (7.2) принимает вид

$$r = \cos(2\pi t/73) \quad (\text{И.4})$$

И.8 Значения коэффициентов r эмпирической и теоретической АКФ для соответствующих интервалов τ представлены в таблице И.2. В графическом виде АКФ представлены на рисунке И.3.

Т а б л и ц а И.2 – АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\tilde{q}(t)$

τ , сут	Эмпирическая АКФ	Теоретическая АКФ
1	2	3
0	1,000	1,000
4	0,857	0,941
8	0,688	0,772
12	0,523	0,513
16	0,323	0,193
20	0,151	-0,149
24	0,018	-0,474

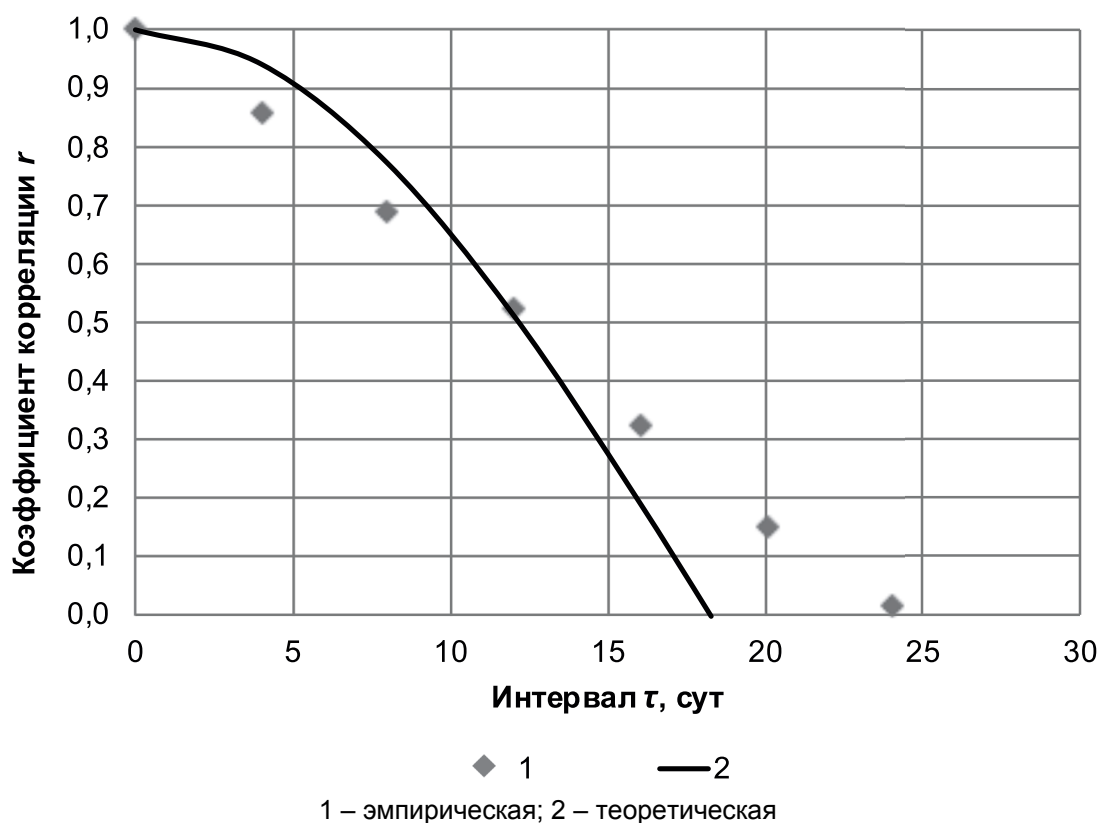


Рисунок И.3 – АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\tilde{q}(t)$

Из рисунка И.3 видно, что теоретическая АКФ достаточно близко аппроксимирует эмпирические точки, следовательно, для расчета ЕРВ р. Кас за период половодья 2015 года можно применить метод оптимальной интерполяции.

И.9 В таблице И.3 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета.

И.10 Рассмотрим алгоритм расчета.

И.10.1 Для каждого среднего суточного значения уровня воды по УР (И.1) вычисляются расходы воды (графа 4 таблицы И.3). На даты ИРВ по УР (И.1) вычисляются расходы (графа 7 таблицы И.3) для каждого уровня во время ИРВ (графа 5 таблицы И.3).

И.10.2 Для каждого ИРВ вычисляются относительные отклонения по формуле (5.2) (графа 8 таблицы И.3).

И.10.3 В соответствии со схемой индексных обозначений (см. рисунок 7.3) определяются интервалы τ_{01} (графа 9 таблицы И.3), τ_{02} (графа 10 таблицы И.3) и τ_{12} (графа 11 таблицы И.3).

И.10.4 По формуле (И.4) вычисляются значения $r(\tau_{01})$, $r(\tau_{02})$ и $r(\tau_{12})$ (графы соответственно 12, 13 и 14 таблицы И.3) для соответствующих интервалов (графы соответственно 9, 10 и 11 таблицы И.3).

И.10.5 Вычисляются значения весовых коэффициентов:

- на даты ИРВ по формулам (7.12), (7.13) и (7.14) (графы 15, 16 и 17 таблицы И.3);
- на даты между ИРВ по формулам (7.7) и (7.8) (графы 15 и 16 таблицы И.3).

И.10.6 Вычисляются сглаженные значения относительных отклонений на даты ИРВ по формуле (7.11) (графа 18 таблицы И.3).

И.10.7 Вычисляются интерполированные значения относительных отклонений на даты между ИРВ по формуле (7.9) (графа 18 таблицы И.3).

И.10.8 По формуле (5.1) вычисляются значения ЕРВ (графа 19 таблицы И.3).

И.11 Рассмотрим несколько примеров.

И.11.1 Расчет ЕРВ на дату 20 апреля. Это 1-е сутки расчетного периода и ИРВ в этот день не производилось, следовательно, для расчета можно использовать значение ИРВ, выполненного 21 апреля. Интервал в этом случае $\tau_{02} = 1$ сут (графа 10 таблицы И.3). Вычисляем значение АКФ (графа 13 таблицы И.3)

$$r = \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 1)/73) = 0,996. \quad (\text{И.5})$$

В данном случае вычисляется только один весовой коэффициент, т.к. используется только одно ИРВ (графа 16 таблицы И.3)

$$p_2 = \frac{0,996}{(1+0,61)} = 0,617. \quad (\text{И.6})$$

Значение относительного отклонения на дату 20 апреля вычисляется на основе относительного отклонения ИРВ 21 апреля (графа 18 таблицы И.3)

$$\bar{q}_{20.04} = 0,617 \cdot 0,044 = 0,027. \quad (\text{И.7})$$

Вычисляется расход воды на дату 20 апреля (графа 19 таблицы И.3)

$$Q_{20.04} = 33,2 \cdot (1 + 0,027) = 34,1 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{И.8})$$

И.11.2 Расчет ЕРВ на дату 21 апреля. В этот день производилось первое в расчетном периоде ИРВ. Следующее ИРВ производилось 24 апреля, а значит, для расчета можно использовать два значения ИРВ (21 и 24 апреля). Интервал $\tau_{02} = 3$ сут (графа 10 таблицы И.3). Вычисляем значение АКФ (графа 13 таблицы И.3)

$$r = \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 3)/73) = 0,967. \quad (\text{И.9})$$

Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.12), (7.13) и (7.14)). Весовой коэффициент p_1 в данном случае равен 0 (графы 15, 16 и 17 таблицы И.3)

$$p_0 = \frac{(1+0,61)^2 - (1+0,61) \cdot (0,967^2 + 0) + 0}{(1+0,61)^3 - (1+0,61) \cdot (0 + 0,967^2 + 0) + 0} = 0,407, \quad (\text{И.10})$$

$$p_2 = \frac{(1+0,61)^2 \cdot 0,967 - (1+0,61) \cdot (0 \cdot 0 + 0,967) + 0}{(1+0,61)^3 - (1+0,61) \cdot (0 + 0,967^2 + 0) + 0} = 0,355. \quad (\text{И.11})$$

Значение относительного отклонения на дату 21 апреля вычисляется на основе относительных отклонений ИРВ 21 и 24 апреля (графа 18 таблицы И.3)

$$\bar{q}_{21.04} = 0,407 \cdot 0,044 + 0,355 \cdot 0,062 + (1 - 0,407 - 0,355) \cdot ((0,044 + 0,062)/2) = 0,053 \quad (\text{И.12})$$

Вычисляется расход воды на дату 21 апреля (графа 19 таблицы И.3)

$$Q_{21.04} = 37,0 \cdot (1 + 0,053) = 38,9 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{И.13})$$

И.11.3 Расчет ЕРВ на дату 03 мая. Дата находится между ИРВ 02 и 05 мая. В интервале между этими датами произошла смена фаз волны половодья (максимум наблюдался 04 мая). Согласно 7.3.2.11, для расчетов $\bar{q}_{03.05}$ можно использовать только относительное отклонение ИРВ 02 мая, т. к. следующее ИРВ (05 мая) производилось уже на спаде волны. Значение интервала до предшествующего ИРВ (02 мая) составляет $\tau_{01} = 1$ сут (графа 9 таблицы И.3), значения АКФ для этого интервала равно 0,996 (графа 12 таблицы И.3). Для вычисления весового коэффициента (7.7) используется в сокращенном виде (графа 15 таблицы И.3)

$$p_1 = \frac{0,996}{(1+0,61)^2} = 0,61. \quad (\text{И.14})$$

Значение относительного отклонения на дату 21 апреля вычисляется на основе относительного отклонений ИРВ 02 мая (графа 18 таблицы И.3)

$$\bar{q}_{03.05} = 0,617 \cdot 0,045 = 0,028. \quad (\text{И.15})$$

Вычисляется расход воды на дату 03 мая (графа 19 таблицы И.3)

$$Q_{03.05} = 414 \cdot (1 + 0,028) = 425 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{И.16})$$

И.11.4 Расчет ЕРВ на дату 05 мая. В этот день производилось ИРВ. Предшествующее ИРВ – 02 мая, последующее – 07 мая. Поскольку в интервале между расчетной датой и датой предшествующего ИРВ произошла смена фаз волны половодья, согласно 7.3.2.11 для расчета $\bar{q}_{05.05}$ могут быть использованы относительные отклонения ИРВ 05 и 07 мая. Значение интервала до последующего ИРВ (07 мая) составляет $\tau_{02}=2$ сут (графа 10 таблицы И.3), значение АКФ для этого интервала равно 0,985 (графа 13 таблицы И.3). Вычисляем весовые коэффициенты p_0 (7.13) и p_2 (7.14) (графы 16 и 17 таблицы И.3)

$$p_0 = \frac{(1+0,61)^2 - (1+0,61) \cdot (0,985^2 + 0) + 0}{(1+0,61)^3 - (1+0,61) \cdot (0+0,985^2 + 0) + 0} = 0,394, \quad (\text{И.17})$$

$$p_2 = \frac{(1+0,61)^2 \cdot 0,985 - (1+0,61) \cdot (0 \cdot 0 + 0,985) + 0}{(1+0,61)^3 - (1+0,61) \cdot (0+0,985^2 + 0) + 0} = 0,370. \quad (\text{И.18})$$

Значение относительного отклонения на дату 05 мая вычисляется на основе относительных отклонений двух ИРВ (05 и 07 мая) (графа 18 таблицы И.3)

$$\bar{q}_{05.05} = 0,394 \cdot (-0,012) + 0,370 \cdot (-0,031) + (1 - 0,394 - 0,370) \cdot ((-0,012) + (-0,031)) / 2 = -0,021. \quad (\text{И.19})$$

Следовательно, расход воды на дату 05 мая (графа 19 таблицы И.3)

$$Q_{05.05} = 413 \cdot (1 - 0,021) = 404 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{И.20})$$

И.11.5 Расчет ЕРВ на дату 30 июня. В этот день производилось последнее в расчетном периоде ИРВ. Предшествующее ИРВ производилось 24 июня, следовательно, для расчета можно используются два значения ИРВ (24 и 30 июня). Интервал $\tau_{01} = 6$ сут (графа 9 таблицы И.3), АКФ $r(\tau_{01})=0,870$ (графа 12 таблицы И.3). Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.12), (7.13) и (7.14)) (графы 15, 16 и 17 таблицы И.3). Весовой коэффициент p_2 в данном случае равен 0.

$$p_1 = \frac{(1+0,61)^2 \cdot 0,870 - (1+0,61) \cdot (0 \cdot 0 + 0,870) + 0}{(1+0,61)^3 - (1+0,61) \cdot (0+0+0,870^2) + 0} = 0,289, \quad (\text{И.21})$$

$$p_0 = \frac{(1+0,61)^2 - (1+0,61) \cdot (0+0,870^2) + 0}{(1+0,61)^3 - (1+0,61) \cdot (0+0,870^2) + 0} = 0,464. \quad (\text{И.22})$$

Значение относительного отклонения на дату 30 июня вычисляется на основе относительных отклонений ИРВ 24 и 30 июня (графа 18 таблицы И.3)

$$\tilde{q}_{30.06} = 0,289 \cdot (-0,029) + 0,464 \cdot (-0,063) + (1 - 0,289 - 0,464) \cdot (((-0,029) + (-0,063)) / 2) = -0,049. \quad (\text{И.23})$$

Вычисляется расход воды на дату 30 июня (графа 19 таблицы И.3)

$$Q_{30.06} = 39,4 \cdot (1 + (-0,049)) = 37,5 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{И.24})$$

И.11.6 Расчет ЕРВ на дату 01 июля. Это последние сутки расчетного периода и ИРВ в этот день не производилось, следовательно, для расчета можно использовать значение ИРВ, выполненного 30 июня. Интервал в этом случае $\tau_{01} = 1$ сут (графа 9 таблицы И.3), АКФ $r(\tau_{01}) = 0,996$ (графа 12 таблицы И.3).

В данном случае вычисляется только один весовой коэффициент, т.к. используется только одно ИРВ (графа 15 таблицы И.3)

$$p_1 = \frac{0,996}{(1+0,61)} = 0,617. \quad (\text{И.25})$$

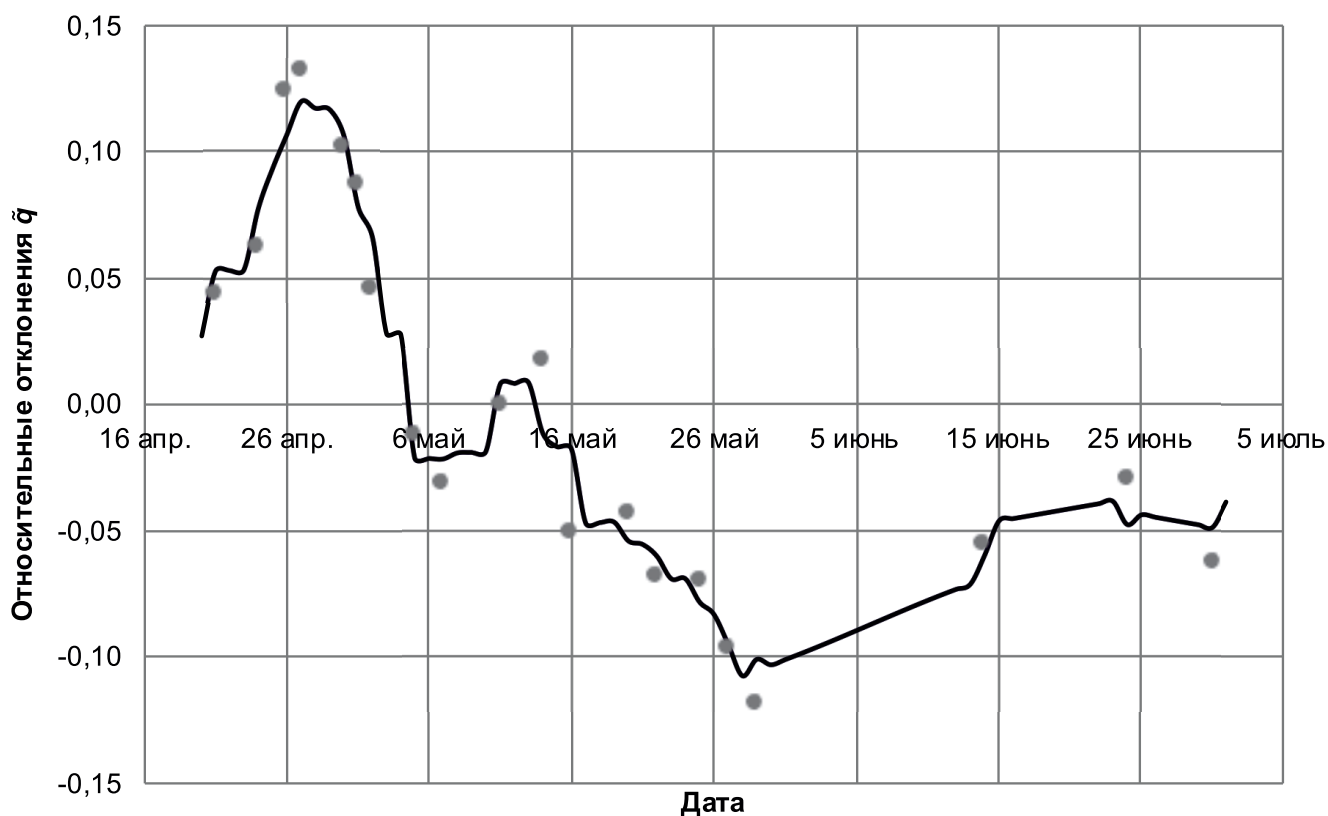
Значение относительного отклонения на дату 01 июля вычисляется на основе относительного отклонения ИРВ 30 июня (графа 18 таблицы И.3)

$$\tilde{q}_{01.07} = 0,617 \cdot (-0,063) = -0,039. \quad (\text{И.26})$$

Вычисляется расход воды на дату 1 июля (графа 19 таблицы И.3)

$$Q_{01.07} = 38,0 \cdot (1 - 0,039) = 36,5 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{И.27})$$

И.12 На рисунке И.5 показан ход относительных отклонений за период половодья 2015 года.



1 – относительные отклонения ИРВ от осредняющей КР;
2 – относительные отклонения, вычисленные по методу оптимальной интерполяции

Рисунок И.4 – Хронологический график относительных отклонений \bar{q} за период половодья (20 апреля – 1 июля) 2015 года, ГП р. Кас - пос. Александровский Шлюз

И.13 На рисунке И.5 представлены гидрографы периода половодья 2015 года р. Кас в гидростворе ГП пос. Александровский Шлюз. Линией 2 показан гидрограф, построенный по данным ЕРВ из ЕДС, линией 3 – гидрограф, построенный по ЕРВ, вычисленным с использованием метода оптимальной интерполяции относительных отклонений ИРВ от осредняющей КР. Кружками показаны ИРВ. Как видно из рисунка И.5, расходы воды, вычисленные с помощью метода оптимальной интерполяции, более точно соответствуют ИРВ на пиках половодья.

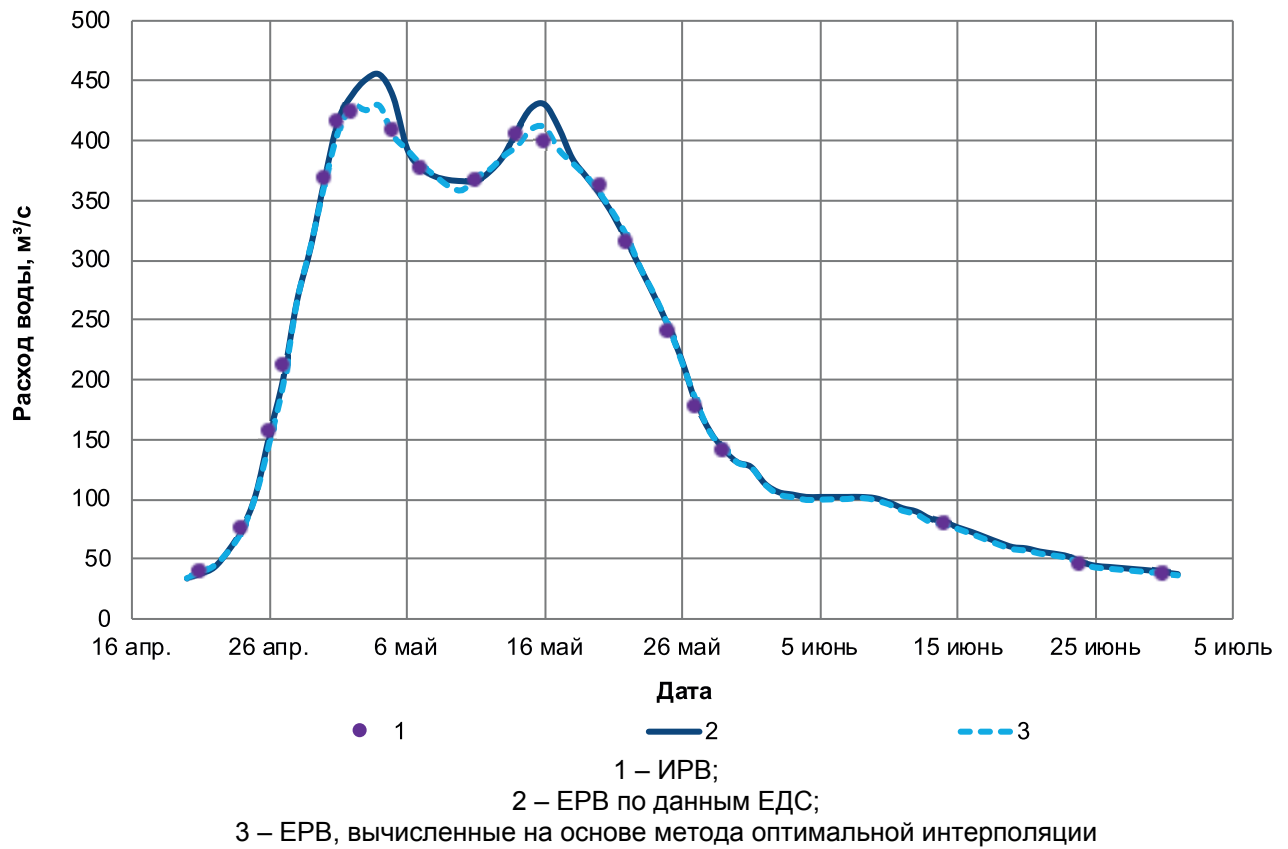


Рисунок И.5 – Гидрограф половодья (с 20 апреля по 1 июля) 2015 года,
ГП р. Кас - пос. Александровский Шлюз

Т а б л и ц а И.3 – Расчет ежедневных расходов воды р. Кас в гидростворе ГП пос. Александровский Шлюз за период половодья 2015 года

Дата	СВО	H ₁ , м	Q(H ₁), м ³ /с	H _ш , м	Q _ш , м ³ /с	Q(H _ш), м ³ /с	q _ш	τ ₀₁	τ ₀₂	τ ₁₂	r(τ ₀₁)	r(τ ₀₂)	r(τ ₁₂)	ρ		q _t , q _{t0}	Q ₀ , м ³ /с	
														ρ ₁	ρ ₂			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20.04.15	3брг ост.	2,89	33,2	-	-	-	-	-	1	-	-	0,996	-	-	0,617	-	0,027	34,1
21.04.15	«	2,97	37,0	2,96	38,1	36,5	0,044	-	3	-	-	0,967	-	0,000	0,407	0,355	0,053	38,9
22.04.15	«	3,08	42,4	-	-	-	-	1	2	3	0,996	0,985	0,967	0,392	0,375	-	0,053	44,7
23.04.15	«	3,29	53,5	-	-	-	-	2	1	3	0,985	0,996	0,967	0,375	0,392	-	0,053	56,4
24.04.15	Св.	3,55	68,5	3,59	75,3	70,9	0,062	3	2	5	0,967	0,985	0,909	0,267	0,285	0,286	0,077	73,8
25.04.15	«	3,96	94,5	-	-	-	-	1	1	2	0,996	0,996	0,985	0,383	0,383	-	0,093	103
26.04.15	«	4,51	134	4,58	156	139	0,124	2	1	3	0,985	0,996	0,967	0,270	0,280	0,282	0,106	148
27.04.15	«	5,04	175	5,18	211	186	0,132	1	3	4	0,996	0,967	0,941	0,290	0,285	0,259	0,120	196
28.04.15	«	5,78	238	-	-	-	-	1	2	3	0,996	0,985	0,967	0,392	0,375	-	0,117	265
29.04.15	«	6,25	279	-	-	-	-	2	1	3	0,985	0,996	0,967	0,375	0,392	-	0,116	312
30.04.15	«	6,79	329	6,84	367	333	0,102	3	1	4	0,967	0,996	0,941	0,259	0,285	0,290	0,106	363
01.05.15	«	7,33	378	7,36	414	381	0,087	1	1	2	0,996	0,996	0,985	0,277	0,278	0,277	0,078	408
02.05.15	«	7,59	402	7,61	422	404	0,045	1	-	-	0,996	-	-	0,379	0,385	0,000	0,066	428
03.05.15	«	7,72	414	-	-	-	-	1	-	-	0,996	-	-	0,617	0,000	-	0,028	425
04.05.15	«	7,76	417	-	-	-	-	2	-	-	0,985	-	-	0,610	0,000	-	0,028	429
05.05.15	«	7,71	413	7,71	408	413	-0,012	-	2	-	-	0,985	-	0,000	0,394	0,370	-0,021	404
06.05.15	«	7,58	401	-	-	-	-	1	1	2	0,996	0,996	0,985	0,383	0,383	-	-0,022	392
07.05.15	«	7,44	388	7,44	376	388	-0,031	2	-	-	0,985	-	-	0,370	0,394	0,000	-0,022	380
...
22.06.15	«	3,32	55,2	-	-	-	-	8	2	10	0,772	0,985	0,652	0,277	0,498	-	-0,039	53,0
23.06.15	«	3,28	53,0	-	-	-	-	9	1	10	0,715	0,996	0,652	0,231	0,524	-	-0,039	50,9
24.06.15	«	3,19	48,1	3,16	45,2	46,6	-0,029	10	6	16	0,652	0,870	0,193	0,221	0,358	0,319	-0,048	45,8
25.06.15	«	3,13	45,0	-	-	-	-	1	5	6	0,996	0,909	0,870	0,442	0,325	-	-0,044	43,0
26.06.15	«	3,11	44,0	-	-	-	-	2	4	6	0,985	0,941	0,870	0,417	0,358	-	-0,045	42,0
27.06.15	«	3,09	42,9	-	-	-	-	3	3	6	0,967	0,967	0,870	0,389	0,389	-	-0,046	41,0
28.06.15	«	3,07	41,9	-	-	-	-	4	2	6	0,941	0,985	0,870	0,358	0,417	-	-0,047	40,0
29.06.15	«	3,05	40,9	-	-	-	-	5	1	6	0,909	0,996	0,870	0,325	0,442	-	-0,048	39,0
30.06.15	«	3,02	39,4	3,01	36,5	38,9	-0,063	6	-	-	0,870	-	-	0,289	0,464	0,000	-0,049	37,5
01.07.15	«	2,99	38,0	-	-	-	-	1	-	-	0,996	-	-	0,617	-	-	-0,039	36,5

Приложение К

(обязательное)

**Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном состоянии русла
в условиях переменного подпора**

К.1 Одной из причин переменного подпора является одновременное прохождение половодья (паводка) на притоке и реке-водоприемнике. Рассмотрим этот случай на примере ГП г. Борисоглебск на р. Ворона, который расположен в 4 км от устья реки при впадении ее в р. Хопер. Согласно описанию ГП р. Ворона – г. Борисоглебск, приведенном в ЕДС, весной на участке поста наблюдается подпор от половодья р. Хопер.

К.2 На рисунке К.1 представлена зависимость расходов от уровней воды р. Ворона в гидростворе ГП г. Борисоглебск за 2008 год. Как видно из рисунка К.1, в верхней части диапазона уровней прослеживается обратная связь расходов и уровней.

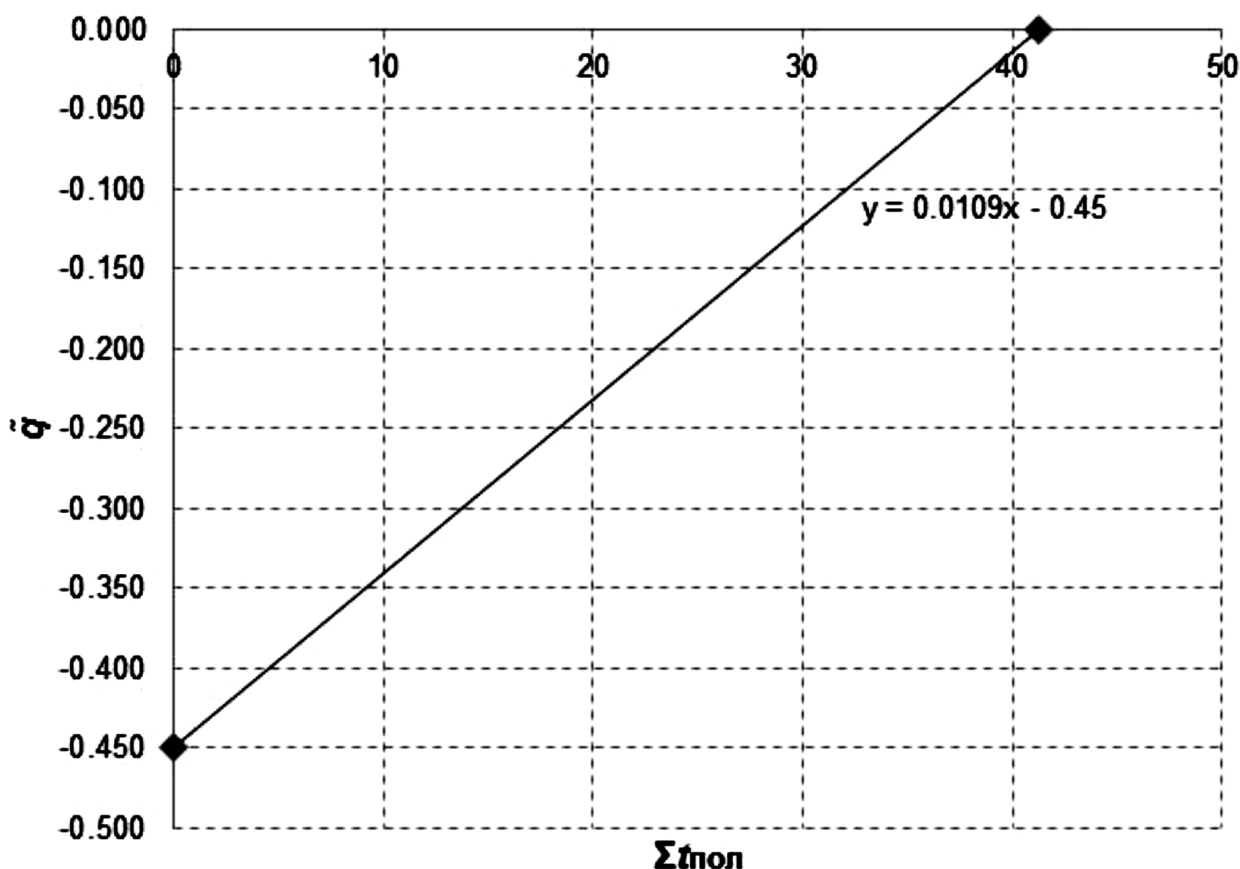


Рисунок К.1 – Зависимость расходов от уровней воды,
ГП р. Ворона – г. Борисоглебск, 2008 год

Для построения КР 2008 г. были исключены расходы, измеренные в период переменного подпора (№ 4 – № 9). Полученное УР для диапазона уровней от 0,08 до 3,40 м имеет вид параболы Глушкова

$$Q(H) = 20,348 (H - (-0,89))^{1,2691}. \quad (\text{К.1})$$

К.3 Начало весеннего подъема уровней воды р. Вороны в гидростворе ГП г. Борисоглебск было отмечено 28 февраля, еще при наличии ледовых явлений. Влияние подпора от р. Хопер прослеживается в период с 15 марта до 18 апреля. Спад уровней завершился 7 июня. Рассмотрим расчет ЕРВ за весь период половодья 2008 год. В таблице К.2 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета.

К.4 Расчет ЕРВ в начальный период (с 28.02 по 11.03) следует осуществлять с привлечением данных о средней суточной температуре воздуха на основе методики, изложенной в 7.6.1 и приложении М.

К.4.1 На рисунке К.2 представлена зависимость вида (7.24), полученная по данным граф 4 и 14 таблицы К.2.

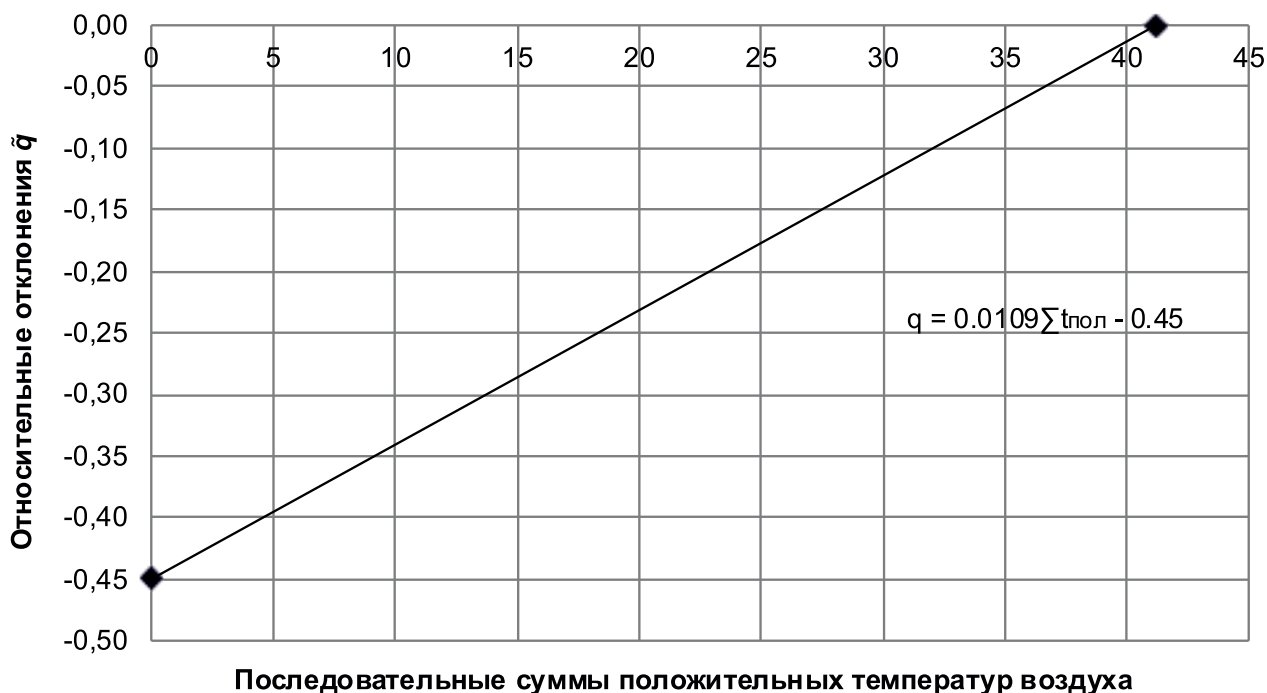


Рисунок К.2 – Зависимость относительных отклонений \bar{q} от нарастающих сумм положительных температур воздуха для ГП р. Ворона – г. Борисоглебск за весенний период 2008 года

Из рисунка К.2 определяется зависимость, используемая для расчета относительных отклонений за период весеннего таяния

$$\tilde{q}_t = 0,0109 \cdot \sum t_{\text{пол}} - 0,45. \quad (\text{К.2})$$

К.4.2 Зависимость, представленная на рисунке К.2, использовалась для расчета относительных отклонений в период с 28 февраля до 11 марта и уточнения расходов воды, вычисленных по КР (К.1).

К.5 В период переменного подпора используется методика, изложенная в 7.4 (с привлечением данных об уровнях на некотором сопряженном посту, не подверженном влиянию переменного подпора). В оставшемся периоде ЕРВ вычисляются непосредственно по годовой КР.

К.5.1 В качестве сопряженного поста можно использовать как ниже-, так и вышерасположенный пост. Из схемы на рисунке К.3 видно, что для ГП р. Ворона – г. Борисоглебск верхним ГП, не подверженным влиянию подпора от Хопра, является ГП Уварово (рисунок К.3), расположенный в 131 км выше. В качестве нижнего сопряженного поста может быть использован ГП г. Новохоперск на р. Хопер, расположенный в 84 км ниже.



Рисунок К.3 – Слияние рек Хопер и Ворона

К.5.2 Коэффициенты уравнения вида (7.17) определяются методом множественной регрессии. Время добегания между постами определялось приближенно исходя из средней скорости течения и расстояния между постами. Время добегания между ГП Уварово и Борисоглебск принято равным 2 сут, между ГП Борисоглебск и Новохоперск – 1 сут. В таблице К.1 представлены исходные данные для расчета коэффициентов расчетного уравнения:

- ИРВ периода переменного подпора (графа 1 таблицы К.1);
- уровни воды при ИРВ на расчетном посту (графа 2 таблицы К.1) и их квадраты (графа 3 таблицы К.1);

- уровни воды на сопряженном посту с учетом времени добега (графы 4 и 5 таблицы К.1) (для сравнения взяты верхний и нижний сопряженные ГП).

Т а б л и ц а К.1 – Исходные данные для расчета коэффициентов уравнения методом множественной регрессии

$Q_t, \text{ м}^3/\text{с}$	$H_t, \text{ м}$	$H_t^2, \text{ м}$	$H_{\text{Уварово } t-2}, \text{ м}$	$H_{\text{Новохоперск } t+1}, \text{ м}$
1	2	3	4	5
135	3,25	10,6	1,79	3,74
138	3,13	9,80	1,97	3,70
134	3,39	11,5	1,90	3,79
132	3,53	12,5	1,88	3,81
129	3,63	13,2	1,87	4,04
128	3,57	12,7	2,07	4,08
134	3,40	11,6	1,10	3,79

К.5.2.1 По данным граф 1, 2, 3 и 4 таблицы К.1 получено уравнение

$$Q = 145,5081 + 12,62773 \cdot H_{\text{Борисоглебск}} - 4,55532 \cdot H_{\text{Борисоглебск}}^2 - 1,41179 \cdot H_{\text{Уварово}}. \quad (\text{К.3})$$

К.5.2.2 По данным граф 1, 2, 3 и 5 таблицы К.1 получено уравнение

$$Q = 360,6989 - 92,7526 \cdot H_{\text{Борисоглебск}} + 12,54482 \cdot H_{\text{Борисоглебск}}^2 - 14,9981 \cdot H_{\text{Новохоперск}}. \quad (\text{К.4})$$

К.5.2.3 Уравнения (К.2) и (К.3) используются для расчета ЕРВ за период с 15 марта до 18 апреля 2008 года.

К.6 В периоды с 12 по 14 марта и с 19 апреля по 07 июня ЕРВ вычисляются непосредственно по УР (К.1).

К.7 Рассмотрим несколько примеров.

К.7.1 Расчет ЕРВ на дату 05 марта.

Среднее суточное значение уровня воды на дату 05 марта составляет 2,44 м (графа 5 таблицы К.2). Вычисляем значение расхода по УР (К.1) (графа 6 таблицы К.2)

$$Q(H) = 20,348 (2,44 - (-0,89))^{1,2691} = 93,7 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{К.5})$$

05 марта еще наблюдаются ледовые явления, следовательно, значение расхода, полученное по (К.4), необходимо уточнить с использованием зависимости (К.2). Сумма положительных температур воздуха с начала таяния на дату 05 марта составила 29,7 °С (графа 4 таблицы К.2). Вычисляем значение относительного отклонения (графа 15 таблицы К.2)

$$\tilde{q}_{05.03} = 0,0109 \cdot 29,7 - 0,45 = -0,126. \quad (\text{К.6})$$

Вычисляем ЕРВ на дату 05 марта по формуле (5.18) (графа 16 таблицы К.2)

$$Q_{05.03} = 93,7 \cdot (1 - 0,126) = 81,8 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{К.7})$$

К.7.2 Расчет ЕРВ на дату 01 апреля.

Расчетная дата попадает в период влияния переменного подпора, следовательно, для расчета ЕРВ используются уравнения (К.3) или (К.4).

Среднее суточное значение уровня воды р. Ворона на ГП г. Борисоглебск на дату 01 апреля составляет 3,59 м (графа 5 таблицы К.2). Среднее суточное значение уровня воды р. Ворона на сопряженном ГП г. Уварово с учетом времени добегания $t-2$ равно 2,04 м (графа 7 таблицы К.2). Среднее суточное значение уровня воды р. Хопер на сопряженном ГП г. Новохоперск с учетом времени добегания $t+1$ равно 4,10 м (графа 9 таблицы К.2).

Вычисляем значение расхода по уравнению (К.3) (графы 8 и 16 таблицы К.2)

$$Q_{01.04} = 145,5081 + 12,62773 \cdot 3,59 - 4,55532 \cdot 3,59^2 - 1,41179 \cdot 2,04 = 129 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{К.8})$$

Вычисляем значение расхода по уравнению (К.4) (графы 10 и 17 таблицы К.2)

$$Q_{01.04} = 360,6989 - 92,7526 \cdot 3,59 + 12,54482 \cdot 3,59^2 - 14,9981 \cdot 4,10 = 128 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{К.9})$$

К.7.3 Расчет ЕРВ на дату 30 апреля.

Влияние переменного подпора завершилось, поэтому расчет ЕРВ на дату 30 апреля осуществляется непосредственно по УР (К.1).

Среднее суточное значение уровня воды р. Ворона на ГП г. Борисоглебск на дату 30 апреля составляет 2,09 м (графа 5 таблицы К.2). Вычисляем значение расхода по УР (К.1) (графы 6 и 16 таблицы К.2)

$$Q(H) = 20,348 \cdot (2,09 - (-0,89))^{1,2691} = 81,3 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{К.10})$$

Как видно из граф 16 и 17 таблицы К.2, расходы воды, вычисленные с использованием данных об уровнях на двух разных сопряженных постах, оказались практически равны.

К.8 На рисунке К.4 показан гидрограф периода половодья 2008 года р. Ворона в гидростворе ГП г. Борисоглебск. Как видно из рисунка К.4, ЕРВ, вычисленные с использованием данных об уровнях воды по двум разным сопряженным ГП (линии 4 и 5), оказались близки между собой и с реальными ИРВ.

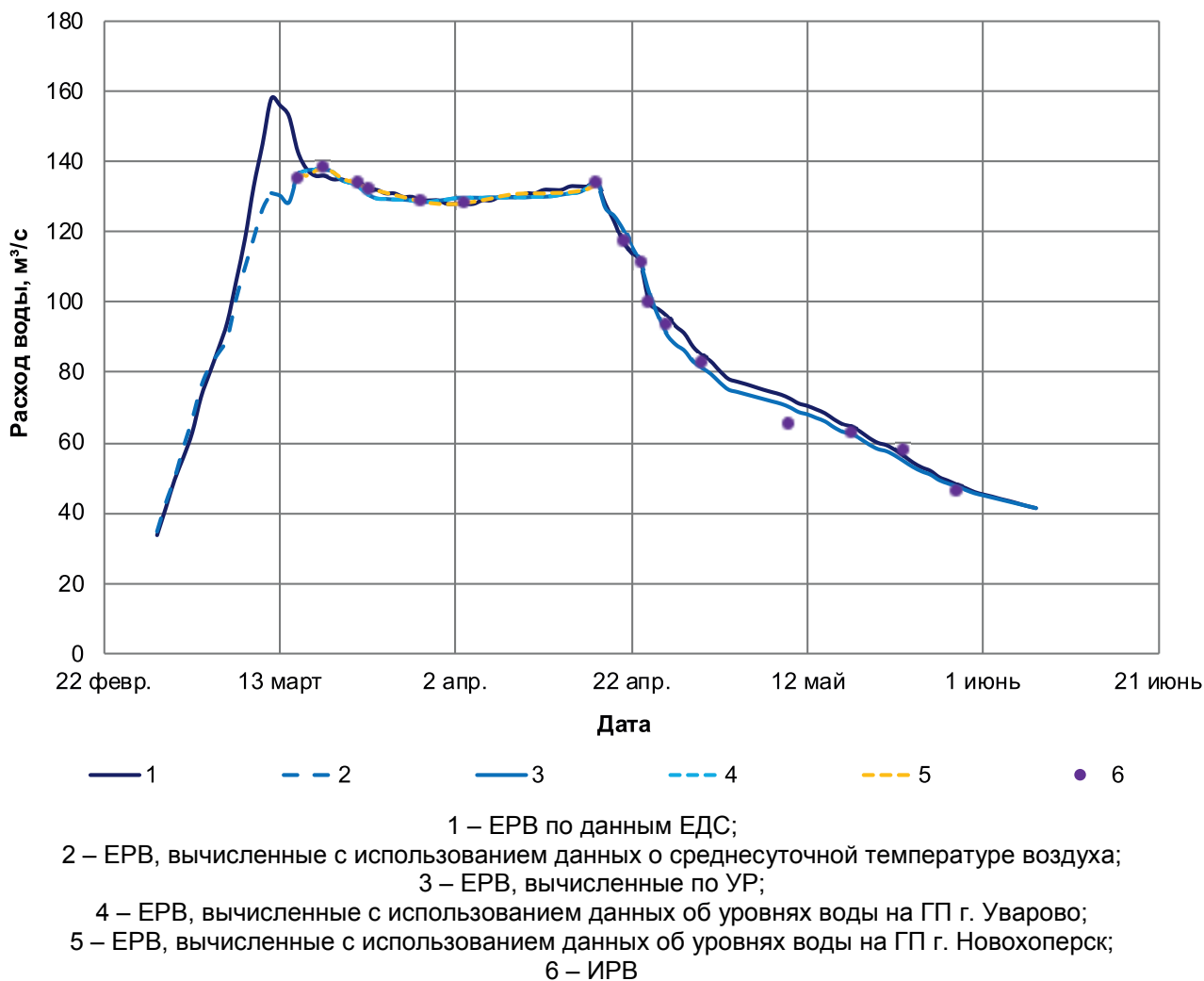


Рисунок К.4 – Гидрограф половодья 2008 года, ГП р. Ворона – г. Борисоглебск

Т а б л и ц а К.2 – Расчет ежедневных расходов воды в гидростворе ГП р. Ворона – г. Борисоглебск за период половодья 2008 года

Дата	СВО	t , °С	Нараст. суммы t , °С	H , м	$Q(H)$, M^3/C	$H_{\text{вс}} t-2$	$Q(H, H_{\text{вс}})$, M^3/C	$H_{\text{вс}} t-1$	$Q(H, H_{\text{вс}})$, M^3/C	$H_{\text{вс}}$, м	$Q_{\text{вс}}$, M^3/C	$Q(H_{\text{вс}})$, M^3/C	$\tilde{q}_{\text{вс}}$	$\tilde{q}_{\text{н}}$	$Q_{\text{р}1}$, M^3/C	$Q_{\text{р}2}$, M^3/C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
15.02.08	Лдст	-	0	-	-	-	-	-	-	0,97	24,6	44,7	-0,450	-	-	-
23.02.08	«	2,8	2,8	1,00	45,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
05.03.08	«	1,3	29,7	2,44	93,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,126	81,8	-
06.03.08	«	-0,3	29,4	2,57	98,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,130	85,6	-
07.03.08	«	1,3	30,7	2,66	102	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,115	89,9	-
08.03.08	«	3,9	34,6	2,86	109	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,073	101	-
09.03.08	«	1,9	36,5	3,05	116	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,052	110	-
10.03.08	Лдх	2,3	38,8	3,20	122	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,027	118	-
11.03.08	«	1,7	40,5	3,36	128	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,009	127	-
12.03.08	Св.	0,7	41,2	3,45	131	-	-	-	-	-	-	-	0	-	131	-
13.03.08	«	-	-	3,43	130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	130	-
28.03.08	Св.	-	-	3,62	-	1,82	129	4,00	129	-	-	-	-	-	129	129
29.03.08	«	-	-	3,63	-	1,87	129	4,04	129	3,63	129	-	-	-	129	129
30.03.08	«	-	-	3,63	-	1,93	129	4,07	128	-	-	-	-	-	129	128
31.03.08	«	-	-	3,61	-	1,99	129	4,09	128	-	-	-	-	-	129	128
01.04.08	«	-	-	3,59	-	2,04	129	4,10	128	-	-	-	-	-	129	128
02.04.08	«	-	-	3,57	-	2,05	130	4,10	128	-	-	-	-	-	130	128
03.04.08	«	-	-	3,57	-	2,07	130	4,08	128	3,57	128	-	-	-	130	128
04.04.08	«	-	-	3,56	-	2,09	130	4,06	129	-	-	-	-	-	130	129
05.04.08	«	-	-	3,56	-	2,13	130	4,03	129	-	-	-	-	-	130	129
06.04.08	«	-	-	3,55	-	2,16	130	4,00	130	-	-	-	-	-	130	130
07.04.08	«	-	-	3,55	-	2,19	130	3,96	130	-	-	-	-	-	130	130
08.04.08	«	-	-	3,55	-	2,19	130	3,93	131	-	-	-	-	-	130	131
09.04.08	«	-	-	3,55	-	2,14	130	3,91	131	-	-	-	-	-	130	131
10.04.08	«	-	-	3,56	-	2,03	130	3,90	131	-	-	-	-	-	130	131
30.04.08	«	-	-	2,09	81,3	-	-	-	-	2,09	83,0	-	-	-	81,3	-
01.05.08	«	-	-	2,04	79,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	79,6	-
02.05.08	«	-	-	1,97	77,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	77,2	-
03.05.08	«	-	-	1,91	75,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75,2	-

Приложение Л

(обязательное)

Пример расчета ежедневных расходов воды при свободном состоянии русла в условиях русловых деформаций

Л.1 Реки горных и предгорных районов зачастую отличаются легкодеформируемыми руслами. В качестве примера рассмотрим реку бассейна р. Кубань – Малую Лабу. Согласно описанию участка поста, приведенного в ЕДС, русло реки галечное, деформирующееся, встречаются низкие галечно-каменистые острова.

Л.2 На рисунке Л.1 представлены кривые расходов р. Малой Лабы в гидростворе ГП с. Бурное за многолетие. Как видно из рисунка Л.1, русло реки имеет тенденцию к ежегодному размыву и намыву, что осложняет расчет ЕРВ.

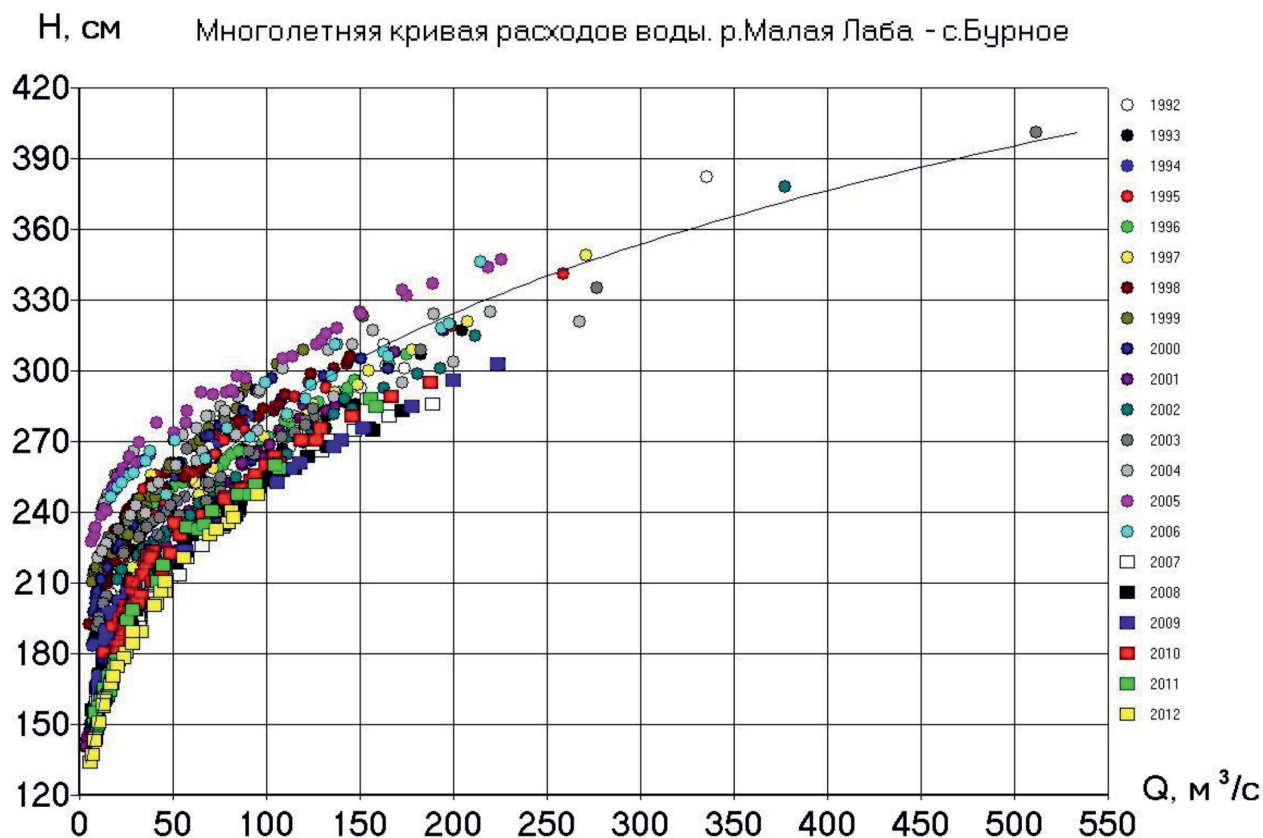


Рисунок Л.1 – Зависимости расходов от уровней воды р. Малой Лабы в гидростворе ГП с. Бурное за период 1992 – 2012 годов

Л.3 В поле точек, измеренных в течение многолетнего периода расходов воды, проводится осредняющая КР. Ей соответствует уравнение регрессии, отнесенное к многолетнему периоду. Для получения многолетнего ряда исходных данных выбирается репрезентативный период наблюдений, который, по возможности, должен включать

характерные по водности годы: маловодный, многоводный и близкий к средней за многолетие водности. Данные измерений расходов воды, отобранные для аппроксимации $Q(H)$, должны адекватно отражать характеристики пропускной способности русла, сформировавшиеся к моменту расчета. Обычно это достигается включением в исходную совокупность результатов измерений последних лет. Дополнительную информацию при выборе репрезентативного периода наблюдений можно получить на основе анализа хода средних отметок дна. Изменение отметок дна р. Малая Лаба на участке ГП с. Бурное за многолетие показано на рисунке Л.2. В течение выбранного периода не должно наблюдаться резких переформирований русла, например, как в 1992, 2000, 2004 и 2006 годах.

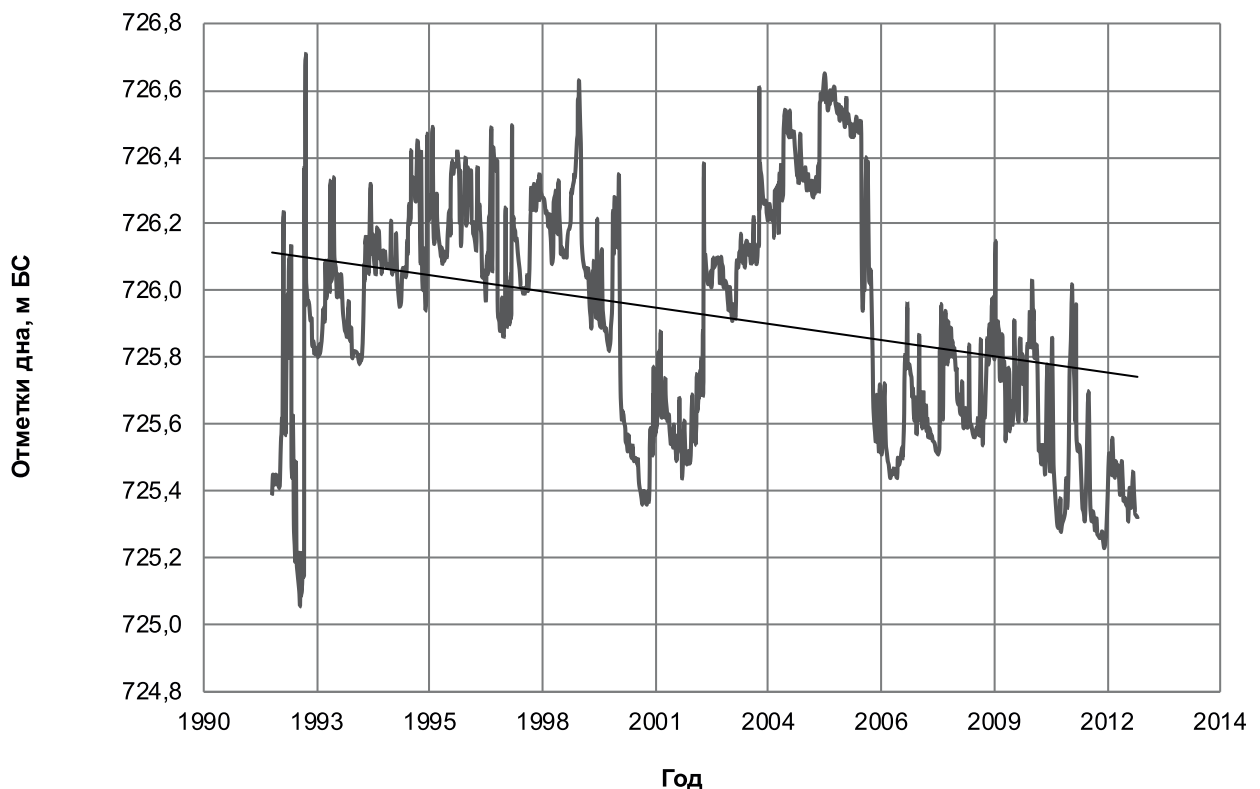


Рисунок Л.2 – Хронологический график средних отметок дна $Z_{\text{дна}}$ за период 1992 – 2012 годов, ГП р. Малая Лаба – с. Бурное

Л.4 Рассмотрим алгоритм расчета ЕРВ за 2011 год на основе методики, изложенной в 6.1. Для получения уравнения регрессии связи $Q(H)$ для ГП р. Малая Лабы – с. Бурное использованы данные ИРВ за 2002–2003 и 2007–2011 годы. При этом из совокупности ИРВ за 2003 год были включены только три наивысших значения расхода. Измерения 2002, 2009 и 2010 годов отражают условия протекания потока при повышенной водности, остальные – при низкой и средней. В качестве характеристики водности года принят средний годовой расход воды $Q_{\text{ср}}$. Среднее значение, определенное по данным 1992–2012 годов составляет $Q_{\text{ср мн}} = 45,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для получения зависимости, аппроксимирующей многолетнюю связь $Q(H)$, использовался метод кусочно-полиномиальной регрессии (см. А.3.2). В качестве опорных УРМ для расчета ЕРВ за 2011 год приняты:

- для диапазона уровней от 1,48 до 2,25 м (отрезок МКР 1), ограничение в точке $H_{\text{низш}} = 1,00$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 0$ м³/с

$$Q(H) = -24,231 + 53,091 \cdot H - 44,488 \cdot H^2 + 15,627 \cdot H^3. \quad (\text{Л.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (Л.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,743$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 18,8$ %;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = 0,00$ %.

- для диапазона уровней от 2,26 до 4,00 м (отрезок МКР 2)

$$Q(H) = -18,188 - 93,317 \cdot H + 54,771 \cdot H^2. \quad (\text{Л.2})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (Л.2):

- коэффициент корреляции $R = 0,983$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 11,8$ %;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = -0,15$ %.

Полученная методом кусочно-полиномиальной регрессии многолетняя зависимость $Q(H)$ представлена на рисунке Л.3.

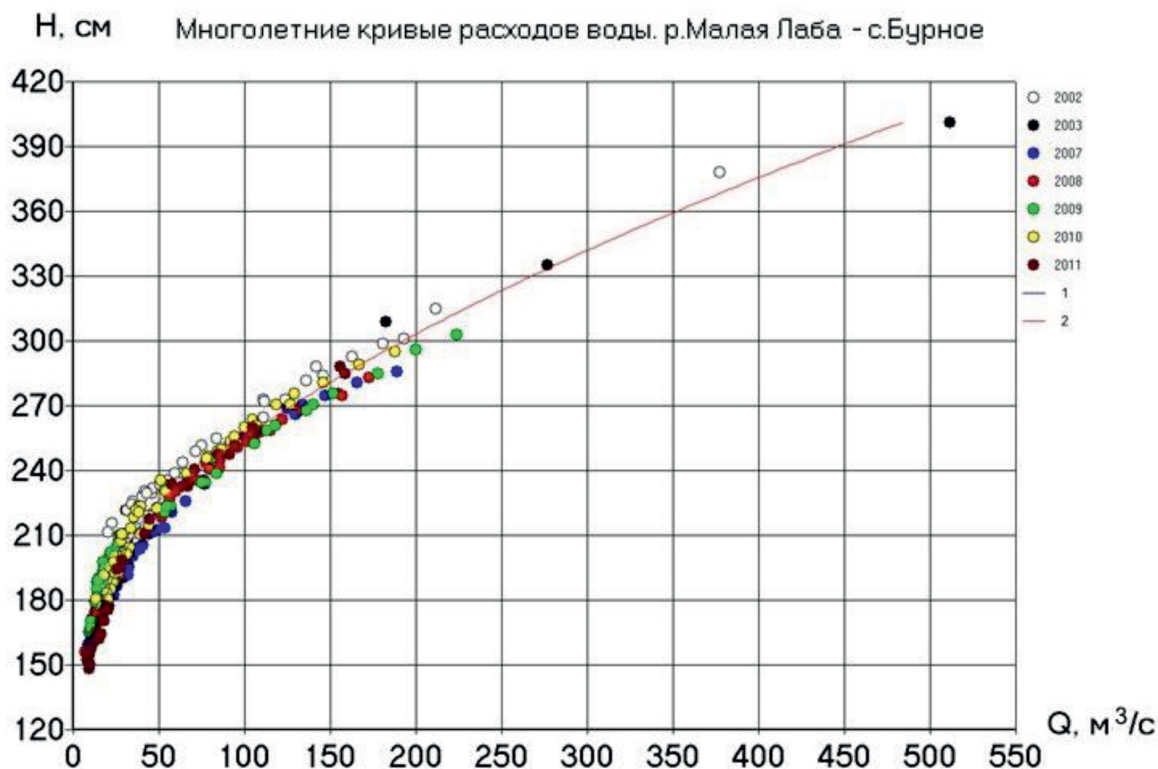


Рисунок Л.3 – Многолетняя зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Малая Лаба – с. Бурное, 2002, 2003, 2007-2011 годы

Л.5 Для использования метода оптимальной интерполяции, основные положения которого приведены в 7.1, необходимо определить меру погрешности измерения расходов и вид автокорреляционной функции случайного процесса $\tilde{q}(t)$. С этой целью составляется таблица вида Л.1, в которую заносятся данные обо всех ИРВ, использованных при получении опорного УРМ.

Для оценки статистических параметров использовались данные измерений за 2002, 2003, 2007–2011 годы. В графе 7 таблицы Л.1 представлены расходы, вычисленные по УР (Л.1) для уровней при измерениях расходов (графа 5 таблицы Л.1). Относительные отклонения ИРВ от осредняющей КР приведены в графе 9 таблицы Л.1.

Т а б л и ц а Л.1 – ИРВ, ГП р. Малая Лаба – с. Бурное, 2002, 2003, 2007–2011 годы

Год	Дата ИРВ	СВО	H, см	H, м	Номер используемого отрезка МКР	Q, м³/с	Q _{УРМ} , м³/с	$\tilde{q}_и$	τ , сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2002	01.01.16	Св.	185	1,85	1	21,4	20,7	0,035	
	24.01.16	«	159	1,59	1	8,66	10,5	-0,178	23
	30.01.16	«	164	1,64	1	10,5	12,1	-0,133	6
	08.02.16	«	170	1,7	1	14,1	14,2	-0,009	9
	26.02.16	«	174	1,74		15,9	15,8	0,008	18
...
2003	06.09.16	«	308	3,08	2	183	214,0	-0,145	
	25.10.16	«	400	4	2	512	484,9	0,056	

Год	Дата ИРВ	СВО	H, см	H, м	Номер используемого отрезка МКР	Q, м³/с	Q _{УРМ} , м³/с	q̄ _и	τ, сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	26.10.16	«	334	3,34	2	277	281,1	-0,015	
...
2008	26.02.16	«	156	1,56	1	7,12	9,7	-0,262	
	07.03.16	«	170	1,7	1	14,5	14,2	0,019	10
	11.03.16	«	241	2,41	2	85,5	75,0	0,139	4
	15.03.16	«	191	1,91	1	28	23,8	0,178	4
	22.03.16	«	255	2,55	2	106	100,0	0,060	7
...
2011	06.01.16	«	171	1,71	1	16,6	14,6	0,137	
	15.01.16	«	165	1,65	1	13,3	12,4	0,068	9
	25.01.16	«	160	1,6	1	11,8	10,8	0,089	10
	05.02.16	«	156	1,56	1	9,91	9,7	0,027	11
	11.02.16	«	157	1,57	1	10,6	9,9	0,067	6
	25.02.16	«	154	1,54	1	9,09	9,1	-0,001	14
	05.03.16	«	152	1,52	1	7,96	8,6	-0,070	9
	15.03.16	«	155	1,55	1	8,68	9,4	-0,074	10
	25.03.16	«	170	1,7	1	15,5	14,2	0,089	10
	05.04.16	«	194	1,94	1	25,7	25,4	0,011	11
	15.04.16	«	177	1,77	1	19	17,0	0,116	10
	26.04.16	«	210	2,1	1	42,1	35,8	0,176	11
	05.05.16	«	233	2,33	2	57,9	61,7	-0,062	9
	16.05.16	«	247	2,47	2	84,7	85,5	-0,009	11
	25.05.16	«	287	2,87	2	156	165,1	-0,055	9
...
Сумма квадратов								7,12	-
Среднее									8

Л.6 Определим меру погрешности измерения расходов по формуле (7.3). С этой целью вычислим значение дисперсии случайного процесса относительных отклонений \bar{q} :

$$\sigma_{\bar{q}}^2 = \frac{\sum_1^n q_i^2}{n-k} = \frac{7,12}{279-4} = 0,026. \quad (\text{Л.3})$$

Погрешность ИРВ примем равной 7 %. Мера погрешности равна

$$\eta = \frac{0,07^2}{0,026 - 0,07^2} = 0,23. \quad (\text{Л.4})$$

Л.7 Далее необходимо определить средний интервал между ИРВ в расчетном периоде (графа 10 таблицы Л.1). В нашем случае $\tau_{\text{ср}} = 8$ сут.

Л.8 Эмпирические АКФ случайного ряда $\bar{q}(t)$ должны определяться для каждого года, включенного в МКР (рисунок Л.4).

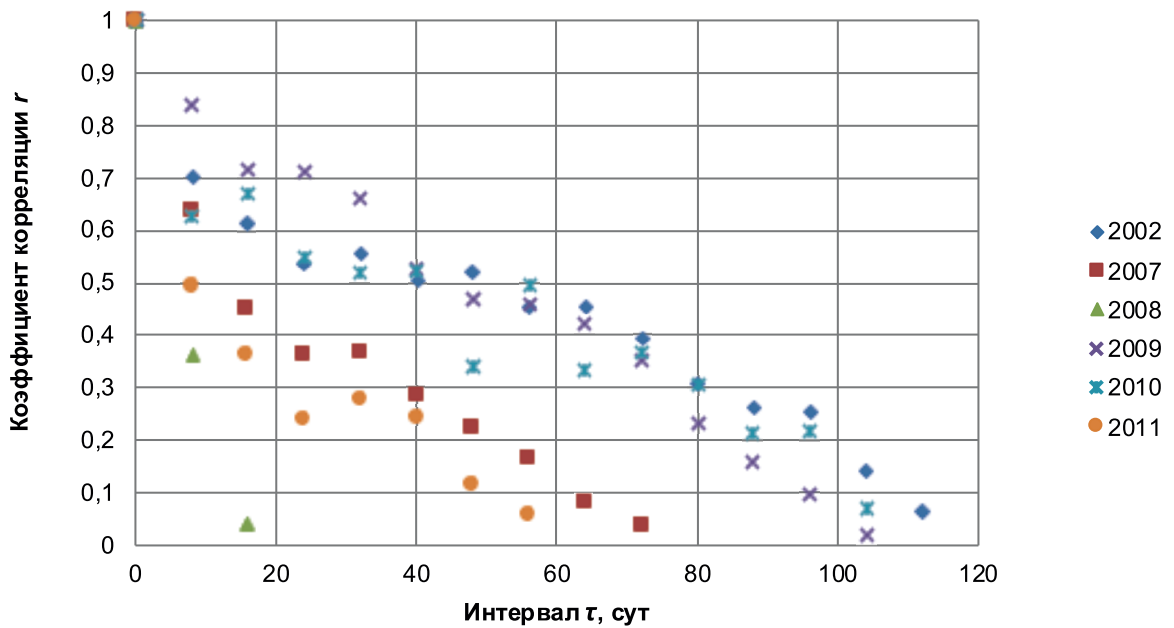


Рисунок Л.4 – Автокорреляционные функции r относительных отклонений ИРВ (\tilde{q}) от МКР

Из рисунка Л.4 видно, что в многоводные годы (2002, 2009, 2010) изменение пропускной способности русла происходит более закономерно, чем в маловодные, что следует из более высоких значений АКФ, зафиксированных для одного и того же параметра сдвига τ .

Л.9 Для получения теоретической АКФ для расчета ЕРВ за 2011 год будем использовать эмпирические АКФ средних по водности 2007 и 2011 годов. Эмпирическая и теоретическая АКФ представлены на рисунке Л.5.

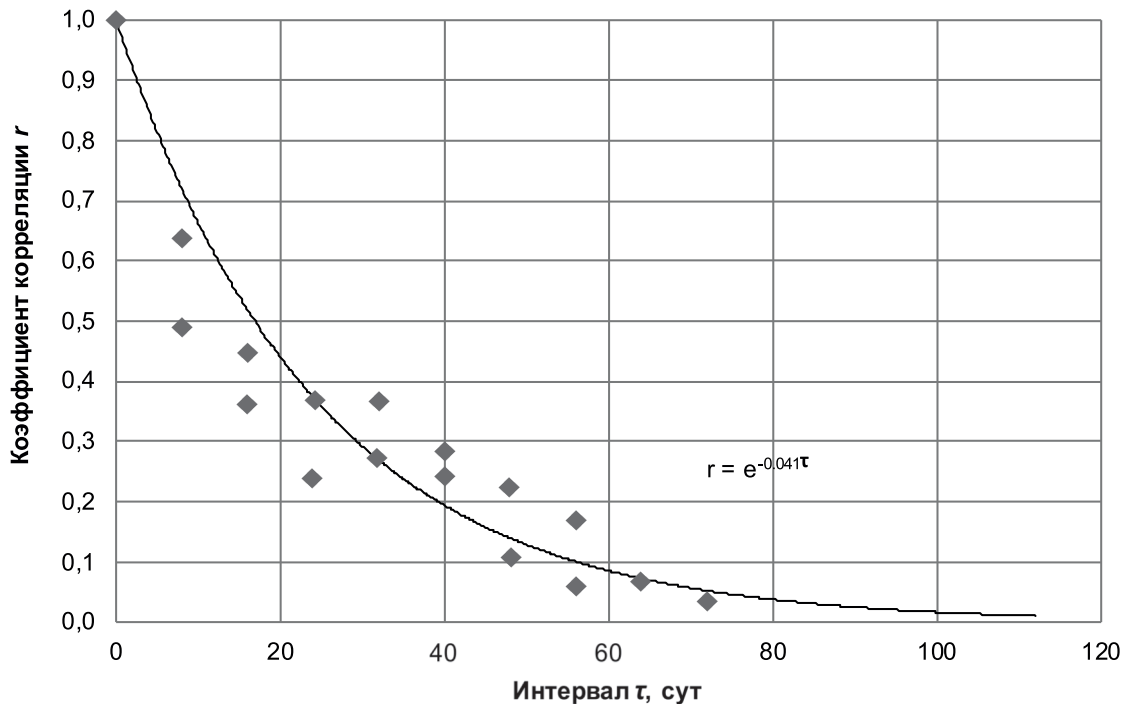


Рисунок Л.5 – Эмпирическая АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ ИРВ 2007 и 2011 годов от МКР, аппроксимированная экспонентой

Как видно из рисунка Л.5, наилучшим теоретическим представлением реальной АКФ является экспоненциальная функция, которая имеет вид

$$r = e^{-0,041\tau} \quad (\text{Л.5})$$

Л.10 В таблице Л.2 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета.

Л.11 Алгоритм расчета выглядит так:

Л.11.1 Для каждого среднего суточного значения уровня воды (графа 2 таблицы Л.2) по УРМ (Л.1) или (Л.2) вычисляются расходы воды (графа 4 таблицы Л.2). На даты ИРВ по УРМ (Л.1) или (Л.2) вычисляются расходы (графа 7 таблицы Л.2) для каждого уровня во время ИРВ (графа 5 таблицы Л.2).

Л.11.2 Для каждого ИРВ вычисляются относительные отклонения по формуле (5.2) (графа 8 таблицы Л.2).

Л.11.3 В соответствии со схемой (см. рисунок 7.3) определяются интервалы τ_{01} (графа 9 таблицы Л.2), τ_{02} (графа 10 таблицы Л.2) и τ_{12} (графа 11 таблицы Л.2).

Л.11.4 По формуле (Л.5) вычисляются значения $r(\tau_{01})$ (графа 12), $r(\tau_{02})$ (графа 13 таблицы Л.2) и $r(\tau_{12})$ (графа 14 таблицы Л.2) для соответствующих интервалов.

Л.11.5 Вычисляются значения весовых коэффициентов:

- на даты ИРВ по формулам (7.12), (7.13) и (7.14) (графы 15, 16 и 17 таблицы Л.2);
- на даты между ИРВ по формулам (7.7) и (7.8) (графы 15 и 16 таблицы Л.2);

Л.11.6 Вычисляются сглаженные значения относительных отклонений на даты ИРВ по формуле (7.11) (графа 18 таблицы Л.2).

Л.11.7 Вычисляются интерполированные значения относительных отклонений на даты между ИРВ по формуле (7.9) (графа 18 таблицы Л.2).

Л.11.8 По формуле (5.1) вычисляются значения ЕРВ (графа 19 таблицы Л.2).

Л.12 Рассмотрим несколько примеров.

Л.12.1 Расчет ЕРВ на дату 03 января.

Среднее суточное значение уровня воды на дату 03 января составляет 1,73 м (графа 2 таблицы Л.2), что попадает в диапазон, описываемый отрезком УРМ (Л.1). Вычисляем значение расхода воды по УРМ (графа 4 таблицы Л.2)

$$Q(H)_{03.01} = -24,231 + 53,091 \cdot 1,73 - 44,488 \cdot 1,73^2 + 15,627 \cdot 1,73^3 = 15,3 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Л.6})$$

Для расчетов используется значение ИРВ предыдущего года (29 декабря 2010 года). Расчетная дата (03 января) попадает в интервал между ИРВ 29 декабря и 06 января.

Вычисляем значения расходов для уровней воды при соответствующих ИРВ (графа 7 таблицы Л.2)

$$Q(H)_{29.12.10} = -24,231 + 53,091 \cdot 1,8 - 44,488 \cdot 1,8^2 + 15,627 \cdot 1,8^3 = 18,3 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (\text{Л.7})$$

$$Q(H)_{06.01} = -24,231 + 53,091 \cdot 1,71 - 44,488 \cdot 1,71^2 + 15,627 \cdot 1,71^3 = 14,5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Вычисляем значения относительных отклонений ИРВ 29 декабря и 06 января (графа 8 таблицы Л.2)

$$\bar{q}_{29.12.10} = \frac{20,1 - 18,3}{18,3} = 0,096, \quad (\text{Л.8})$$

$$\bar{q}_{06.01} = \frac{16,6 - 14,5}{14,5} = 0,141.$$

Значения интервалов составляют: до предшествующего ИРВ (29 декабря) $\tau_{01}=5$ сут, до последующего ИРВ (6 января) $\tau_{02}=3$ сут (графы 9 и 10 таблицы Л.2). Значение интервала между измерениями составляет $\tau_{12}=8$ сут (графа 11 таблицы Л.2). Вычисляем значения АКФ (Л.5) (графы 12, 13 и 14 таблицы Л.2)

$$r(\tau_{01}) = 2,71^{-0,041 \cdot 5} = 0,815,$$

$$r(\tau_{02}) = 2,71^{-0,041 \cdot 3} = 0,884, \quad (\text{Л.9})$$

$$r(\tau_{12}) = 2,71^{-0,041 \cdot 8} = 0,720.$$

Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.7) и (7.8)) (графы 15 и 16 таблицы Л.2)

$$p_1 = \frac{(1+0,23) \cdot 0,815 - 0,884 \cdot 0,720}{(1+0,23)^2 - 0,720^2} = 0,367 \quad (\text{Л.10})$$

$$p_2 = \frac{(1+0,23) \cdot 0,884 - 0,815 \cdot 0,720}{(1+0,23)^2 - 0,720^2} = 0,503 \quad (\text{Л.11})$$

Значение относительного отклонения на дату 03 января вычисляется на основе относительных отклонений ИРВ 29 декабря и 6 января (графа 18 таблицы Л.2)

$$\bar{q}_{03.01} = 0,367 \cdot 0,096 + 0,503 \cdot 0,141 + (1 - 0,367 - 0,503) \cdot ((0,096 + 0,141) / 2) = 0,122 \quad (\text{Л.12})$$

Вычисляется расход воды на дату 03 января (графа 19 таблицы Л.2)

$$Q_{03.01} = 15,3 \cdot (1 + 0,122) = 17,2 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Л.13})$$

Л.12.2 Расчет ЕРВ на дату 15 июля.

Среднее суточное значение уровня воды на дату 15 июля составляет 2,43 м (графа 2 таблицы Л.2), что попадает в диапазон, описываемый отрезком УРМ (Л.2). Вычисляем значение расхода воды по УРМ (графа 4 таблицы Л.2)

$$Q(H)_{15.07} = -18,188 - 93,317 \cdot 2,43 + 54,771 \cdot 2,43^2 = 78,5 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Л.14})$$

15 июля производилось ИРВ. Предшествующее ИРВ – 03 июля, последующее – 24 июля. Уровни воды при каждом из трех ИРВ попадают в интервал, описываемый уравнением (Л.2). Вычисляем значения расходов для уровней воды при соответствующих ИРВ (графа 7 таблицы Л.2)

$$\begin{aligned} Q(H)_{03.07} &= -18,188 - 93,317 \cdot 2,51 + 54,771 \cdot 2,51^2 = 92,6 \text{ м}^3/\text{с}, \\ Q(H)_{15.07} &= -18,188 - 93,317 \cdot 2,47 + 54,771 \cdot 2,47^2 = 85,5 \text{ м}^3/\text{с}, \\ Q(H)_{24.07} &= -18,188 - 93,317 \cdot 2,34 + 54,771 \cdot 2,34^2 = 63,4 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned} \quad (\text{Л.15})$$

Вычисляем значения относительных отклонений ИРВ 03, 15 и 24 июля (графа 8 таблицы Л.2)

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{03.07} &= \frac{94,2 - 92,6}{92,6} = 0,017, \\ \tilde{q}_{15.07} &= \frac{91,6 - 85,5}{85,5} = 0,072, \\ \tilde{q}_{24.07} &= \frac{66,7 - 63,4}{63,4} = 0,053. \end{aligned} \quad (\text{Л.16})$$

Значения интервалов составляют: до предшествующего ИРВ (03 июля) $\tau_{01}=12$ сут, до последующего ИРВ (24 июля) $\tau_{02}=9$ сут (графы 9 и 10 таблицы Л.2). Значение интервалов между измерениями составляет $\tau_{12}=21$ сут. Значения АКФ, вычисленные по формуле (И.5), равны соответственно 0,611, 0,691 и 0,423 (графы 12, 13 и 14 таблицы Л.2)

Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.12), (7.13) и (7.14)) (графы 15, 16 и 17 таблицы Л.2)

$$\rho_1 = \frac{(1+0,23)^2 \cdot 0,611 - (1+0,23) \cdot (0,423 \cdot 0,691 + 0,611) + 0,423 \cdot 0,691}{(1+0,23)^3 - (1+0,23) \cdot (0,423^2 + 0,691^2 + 0,611^2) + 2 \cdot 0,611 \cdot 0,423 \cdot 0,691} = 0,112 \quad (\text{Л.17})$$

$$\rho_0 = \frac{(1+0,23)^2 - (1+0,23) \cdot (0,691^2 + 0,611^2) + 0,423 \cdot (0,691 \cdot 0,611 + 0,611 \cdot 0,691 - 0,423)}{(1+0,23)^3 - (1+0,23) \cdot (0,423^2 + 0,691^2 + 0,611^2) + 2 \cdot 0,611 \cdot 0,423 \cdot 0,691} = 0,674 \quad (\text{Л.18})$$

$$\rho_2 = \frac{(1+0,23)^2 \cdot 0,691 - (1+0,23) \cdot (0,423 \cdot 0,611 + 0,691) + 0,423 \cdot 0,611}{(1+0,23)^3 - (1+0,23) \cdot (0,423^2 + 0,691^2 + 0,611^2) + 2 \cdot 0,611 \cdot 0,423 \cdot 0,691} = 0,144 \quad (\text{Л.19})$$

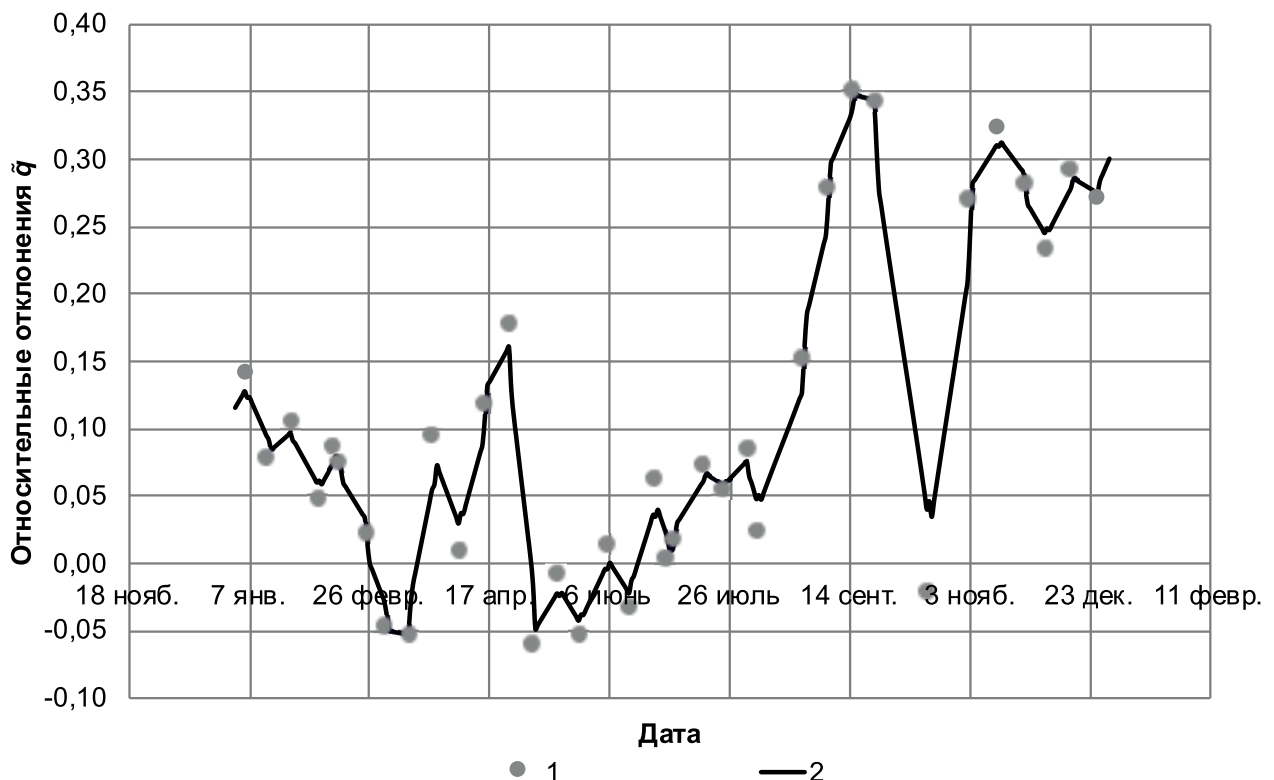
Значение относительного отклонения на дату 15 июля вычисляется на основе относительных отклонений трех ИРВ (03, 15 и 24 июля) (графа 18 таблицы Л.2)

$$\bar{q}_{15.07} = 0,112 \cdot 0,017 + 0,674 \cdot 0,072 + 0,144 \cdot 0,053 + (1 - 0,112 - 0,674 - 0,144) \cdot \frac{0,017 + 0,072 + 0,053}{3} = 0,061. \quad (\text{Л.20})$$

Вычисляем расход воды на дату 15 июля (графа 19 таблицы Л.2)

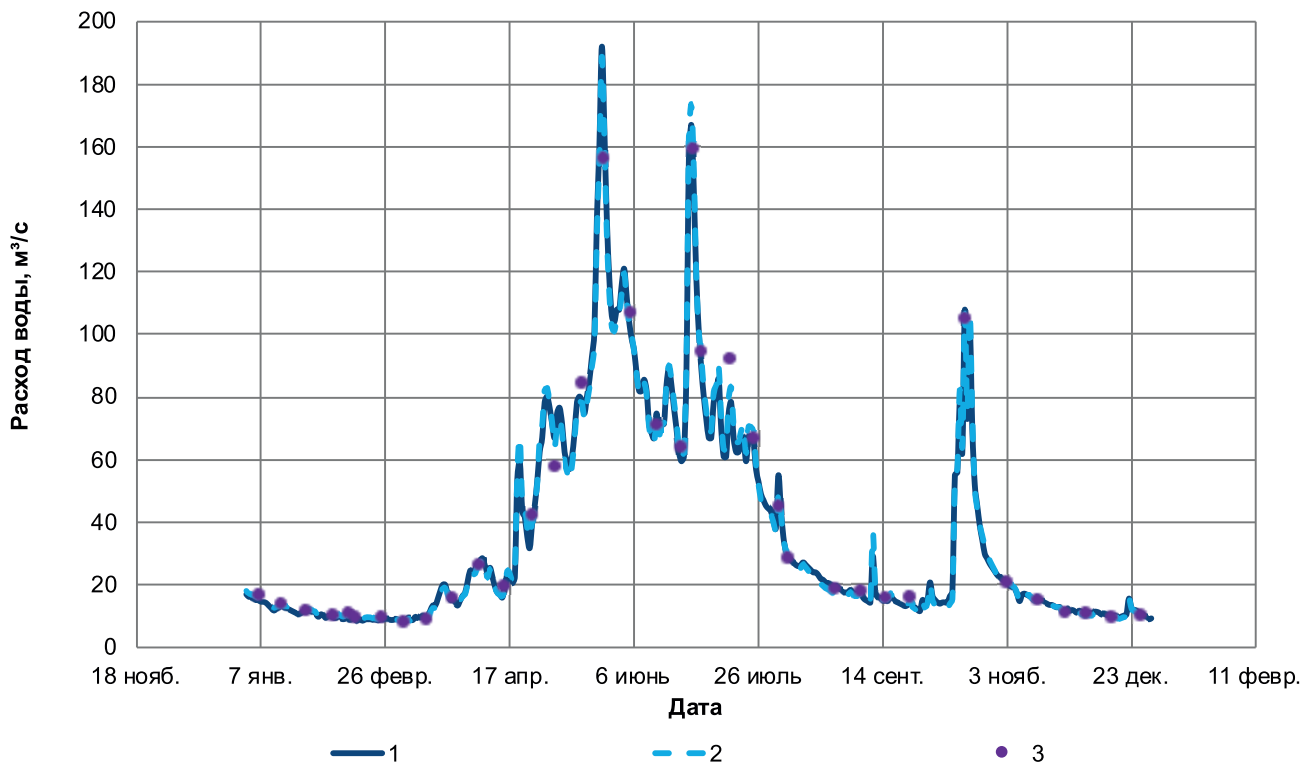
$$Q_{15.07} = 78,5 \cdot (1 + 0,061) = 83,3 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{Л.21})$$

Л.13 На рисунке Л.6 показан хронологический график относительных отклонений ИРВ от осредняющей МКР и их аппроксимация методом оптимальной интерполяции, а рисунке Л.7 – гидрографы за 2011 год р. Малая Лаба в гидростворе ГП с. Бурное. Линией 2 на рисунке Л.7 показан гидрограф, построенный по данным ЕРВ из ЕДС, линией 3 – гидрограф, построенный по ЕРВ, вычисленным с использованием метода оптимальной интерполяции относительных отклонений ИРВ от осредняющей КР. Кружками показаны ИРВ.



1 – относительные отклонения ИРВ от осредняющей МКР;
2 – относительные отклонения, вычисленные по методу оптимальной интерполяции

Рисунок Л.6 – Хронологический график относительных отклонений $\bar{q}(t)$ за 2011 год



1 – ЕРВ по данным ЕДС; 2 – ЕРВ, вычисленные на основе метода оптимальной интерполяции;
3 – ИРВ

Рисунок Л.7 – Гидрограф 2011 года, ГП р. Малая Лаба – с. Бурное

Т а б л и ц а Л.2 – Расчет ежедневных расходов воды р. Малая Лаба в гидростворе ГП с. Бурное за период свободного русла 2011 года

Дата	H _г , м	№ МКР	Q(H) _{урм} , м ³ /с	H _н , м	Q _н , м ³ /с	Q(H) _{урм} , м ³ /с	q _н	τ ₀₁	τ ₀₂	τ ₁₂	r(τ ₀₁)	r(τ ₀₂)	r(τ ₁₂)	ρ		q _г , q _{тб}	Q _г , м ³ /с	
														ρ ₁	ρ ₂			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
29.12.10	-	-	-	1,80	20,1	18,3	0,096	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30.12.10	-	-	-	-	-	-	-	1	7	8	0,960	0,751	0,720	0,642	0,234	-	-	-
31.12.10	-	-	-	-	-	-	-	2	6	8	0,921	0,782	0,720	0,572	0,300	-	-	-
01.01.11	1,75	1	16,2	-	-	-	-	3	5	8	0,884	0,815	0,720	0,503	0,367	-	0,116	18,0
02.01.11	1,73	1	15,3	-	-	-	-	4	4	8	0,849	0,849	0,720	0,434	0,434	-	0,119	17,2
03.01.11	1,73	1	15,3	-	-	-	-	5	3	8	0,815	0,884	0,720	0,367	0,503	-	0,122	17,2
04.01.11	1,72	1	14,9	-	-	-	-	6	2	8	0,782	0,921	0,720	0,300	0,572	-	0,125	16,8
05.01.11	1,71	1	14,5	-	-	-	-	7	1	8	0,751	0,960	0,720	0,234	0,642	-	0,128	16,4
06.01.11	1,70	1	14,2	1,71	16,6	14,5	0,141	8	9	17	0,720	0,691	0,498	0,152	0,645	0,138	0,123	15,9
...
03.07.11	2,50	2	90,8	2,51	94,2	92,6	0,017	3	12	15	0,884	0,611	0,541	0,263	0,575	0,095	0,019	92,6
04.07.11	2,44	2	80,2	-	-	-	-	1	11	12	0,960	0,637	0,611	0,692	0,173	-	0,030	82,6
05.07.11	2,40	2	73,3	-	-	-	-	2	10	12	0,921	0,664	0,611	0,637	0,222	-	0,033	75,7
06.07.11	2,36	2	66,6	-	-	-	-	3	9	12	0,884	0,691	0,611	0,582	0,272	-	0,036	69,0
07.07.11	2,36	2	66,6	-	-	-	-	4	8	12	0,849	0,720	0,611	0,528	0,322	-	0,039	69,2
08.07.11	2,43	2	78,5	-	-	-	-	5	7	12	0,815	0,751	0,611	0,476	0,373	-	0,041	81,7
09.07.11	2,44	2	80,2	-	-	-	-	6	6	12	0,782	0,782	0,611	0,424	0,424	-	0,044	83,7
10.07.11	2,47	2	85,5	-	-	-	-	7	5	12	0,751	0,815	0,611	0,373	0,476	-	0,047	89,5
11.07.11	2,38	2	70,0	-	-	-	-	8	4	12	0,720	0,849	0,611	0,322	0,528	-	0,050	73,5
12.07.11	2,32	2	60,1	-	-	-	-	9	3	12	0,691	0,884	0,611	0,272	0,582	-	0,053	63,3
13.07.11	2,32	2	60,1	-	-	-	-	10	2	12	0,664	0,921	0,611	0,222	0,637	-	0,056	63,5
14.07.11	2,41	2	75,0	-	-	-	-	11	1	12	0,637	0,960	0,611	0,173	0,692	-	0,058	79,4
15.07.11	2,43	2	78,5	2,47	91,6	85,5	0,072	12	9	21	0,611	0,691	0,423	0,112	0,674	0,144	0,061	83,3
16.07.11	2,36	2	66,6	-	-	-	-	1	8	9	0,960	0,720	0,691	0,657	0,216	-	0,066	71,1
17.07.11	2,33	2	61,7	-	-	-	-	2	7	9	0,921	0,751	0,691	0,592	0,277	-	0,065	65,8
18.07.11	2,33	2	61,7	-	-	-	-	3	6	9	0,884	0,782	0,691	0,527	0,338	-	0,064	65,7
19.07.11	2,35	2	65,0	-	-	-	-	4	5	9	0,849	0,815	0,691	0,464	0,401	-	0,063	69,1
20.07.11	2,36	2	66,6	-	-	-	-	5	4	9	0,815	0,849	0,691	0,401	0,464	-	0,062	70,7
21.07.11	2,31	2	58,5	-	-	-	-	6	3	9	0,782	0,884	0,691	0,338	0,527	-	0,060	62,1
22.07.11	2,36	2	66,6	-	-	-	-	7	2	9	0,751	0,921	0,691	0,277	0,592	-	0,059	70,6
23.07.11	2,36	2	66,6	-	-	-	-	8	1	9	0,720	0,960	0,691	0,216	0,657	-	0,058	70,5
24.07.11	2,35	2	65,0	2,34	66,7	63,4	0,053	9	10	19	0,691	0,664	0,459	0,141	0,662	0,129	0,061	68,9
25.07.11	2,29	2	55,3	-	-	-	-	1	9	10	0,960	0,691	0,664	0,671	0,200	-	0,061	58,7

Приложение М

(обязательное)

Примеры расчета ежедневных расходов воды в условиях ледообразования, ледостава и таяния льда

М.1 Расчет ежедневных расходов воды в период осенне-зимнего ледообразования с использованием данных о среднесуточной температуре воздуха

М.1.1 Рассмотрим изложенный в 7.6.1 алгоритм на примере расчета ЕРВ р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево в осенне-зимний переходный период 2007 года.

М.1.2 Наиболее оптимальная аппроксимация зависимости расходов от уровней воды за период свободного русла для диапазона уровней воды от 2,40 до 9,10 м была получена методом полиномиальной регрессии с ограничением в точке $H_{\text{низш}} = 2,00$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 1800$ м³/с. Из совокупности ИРВ был исключен расход № 10, измеренный 25 апреля, как не удовлетворяющий условию (5.12). Полученное УР имеет вид

$$Q(H) = 403,75 + 722,35 \cdot H - 35,561 \cdot H^2 + 11,724 \cdot H^3. \quad (\text{М.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (М.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,980$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 3,07\%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = 0,07\%$.

М.1.3 Низший уровень воды за 2007 год составил 1,69 м. В диапазоне уровней от 1,69 до 2,39 была выполнена экстраполяция КР по методике, изложенной в 5.6. Полученное УР для диапазона от 1,69 до 2,39 имеет вид

$$Q(H) = 315,7 + 1341,5 \cdot H - 510,92 \cdot H^2 + 108,69 \cdot H^3. \quad (\text{М.2})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (М.2):

- коэффициент корреляции $R = 0,993$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 0,09\%$;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = 0,0\%$.

М.1.4 Полученная КР показана на рисунке М.1.

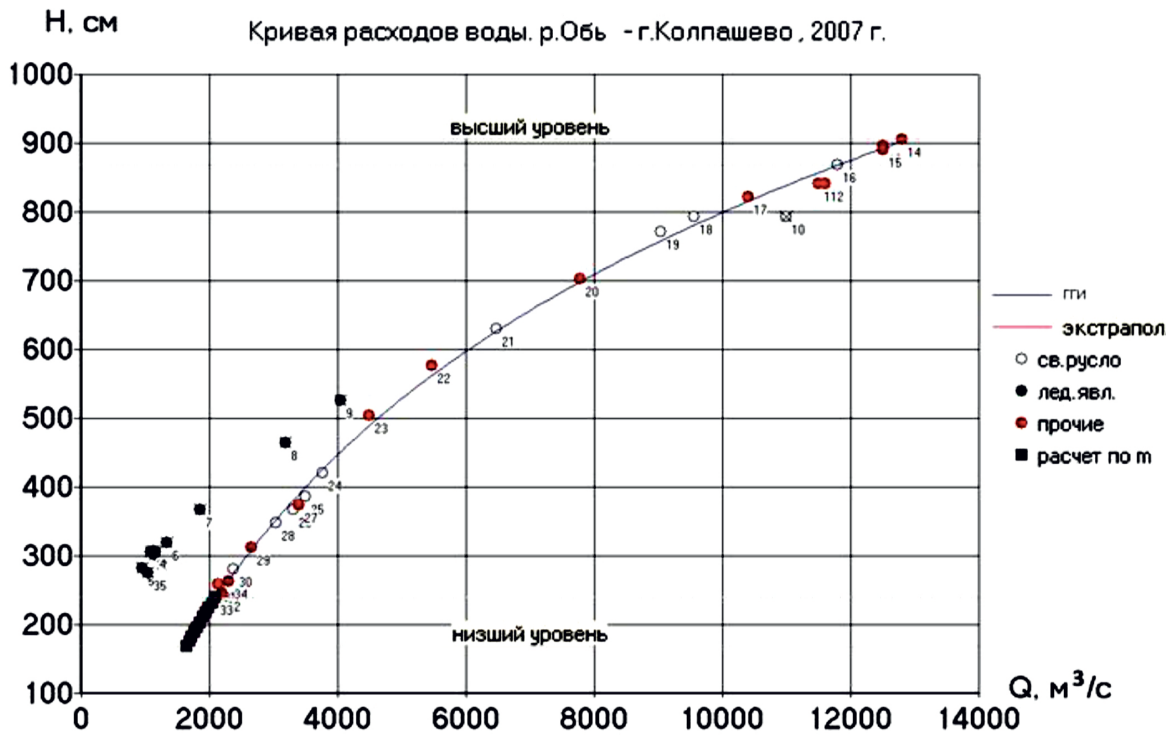


Рисунок М.1 – Годовая зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Обь - г. Колпашево, 2007 год

М.1.5 Рассмотрим алгоритм расчета ЕРВ в осенне-зимний период. В таблице М.1 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета.

М.1.5.1 Первые ледяные образования осенью 2007 года были отмечены 09 ноября (графа 2 таблицы М.1). Последовательное суммирование средних суточных температур воздуха начинается с даты, предшествующей первому появлению устойчивых ледяных образований (08 ноября).

М.1.5.2 Вычисляются корни квадратные из модулей последовательных сумм отрицательных температур воздуха (графа 5 таблицы М.1).

М.1.5.3 Вычисляются значения расходов воды для каждого среднего суточного уровня по формулам (М.1) или (М.2) в зависимости от того, в какой диапазон попадает значение ЕУВ (графа 7 таблицы М.1).

М.1.5.4 Вычисляются по формулам (М.1) или (М.2) значения расходов при уровнях воды во время ИРВ (графа 10 таблицы М.1).

М.1.5.5 Вычисляются относительные отклонения ИРВ от опорной КР по формуле (5.2) (графа 11 таблицы М.1).

М.1.5.6 На основе данных граф 5 и 11 таблицы М.1 строится график связи вида (7.24). Поскольку годовая КР однозначна, значение \bar{q}_i последнего расхода, измеренного до наступления ледовых явлений, может быть принято равным нулю. В результате построения получаем линейную зависимость в виде прямой линии, представленной на рисунке М.2, которая описывается уравнением (М.3)

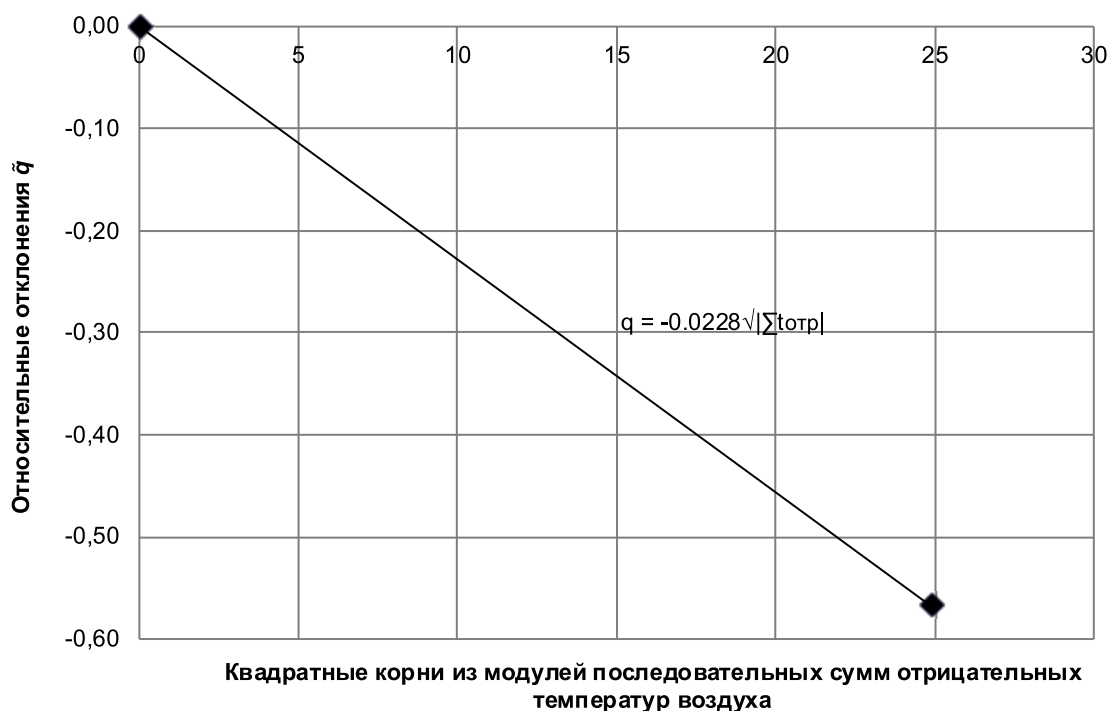


Рисунок М.2 – Зависимость относительных отклонений \tilde{q} от корня квадратного из модуля нарастающей суммы отрицательной температуры воздуха для ГП р. Обь - г. Колпашево осенне-зимний период 2007 года

$$\tilde{q}_n = -0,0228 \cdot \sqrt{|\Sigma t_{отр}|}. \quad (M.3)$$

М.1.5.7 Зависимость (М.3) используется для расчета значений относительных отклонений в период осенне-зимнего ледообразования вплоть до ИРВ, произведенного при устойчивом ледоставе (31 декабря) (графа 12 таблицы М.1).

М.1.5.8 ЕРВ периода осенне-зимнего ледообразования (графа 13 таблицы М.1) вычисляются по формуле (5.18) на основе данных граф 7 и 12 таблицы М.1.

М.1.6 Рассмотрим пример расчета РВ на дату 20 декабря.

М.1.6.1 Значение уровня на эту дату (3,07 м) (графа 6 таблицы М.1) попадает в диапазон, описываемый уравнением (М.1). Значение расхода, вычисленное по (М.1) для соответствующего значения уровня составило 2625 м³/с (графа 7 таблицы М.1).

М.1.6.2 Значение корня квадратного из модуля сумм отрицательных температур воздуха составило 21,3 (графа 5 таблицы М.1). Вычисляем значение относительного отклонения по формуле (М.3) (графа 12 таблицы М.1)

$$\tilde{q}_{20.12} = -0,0228 \cdot 21,3 = -0,486. \quad (M.4)$$

М.1.6.3 Значение расхода воды на дату 20 декабря (графа 13 таблицы М.1)

$$Q_{20.12} = 2625 \cdot (1 - 0,486) = 1350 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (M.5)$$

Т а б л и ц а М.1 – Расчет ежедневных расходов воды в гидростворе ГП р. Обь - г. Колпашево за осенне-зимний период 2007 года с использованием данных о средней суточной температуре воздуха

Дата	СВО	$t, ^\circ\text{C}$	Нараст. суммы $t, ^\circ\text{C}$	$\sqrt{\sum t_{\text{отр}}}$	$H, \text{ м}$	$Q(H), \text{ м}^3/\text{с}$	$H_{\text{и}}, \text{ м}$	$Q_{\text{и}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q(H_{\text{и}}), \text{ м}^3/\text{с}$	$\tilde{q}_{\text{и}}$	$\tilde{q}_{\text{п}}$	$Q_{\text{р}}, \text{ м}^3/\text{с}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
02.11.07	Св.	-0,7	-	0	2,63	2271	2,64	2300	2279	0,009	-	2270
03.11.07	«	0,5	-	-	2,59	2240	-	-	-	-	-	2240
04.11.07	«	-1,1	-	-	2,55	2209	-	-	-	-	-	2210
05.11.07	«	-1,5	-	-	2,51	2178	-	-	-	-	-	2180
06.11.07	«	1,5	-	-	2,49	2163	-	-	-	-	-	2160
07.11.07	«	1,1	-	-	2,46	2140	-	-	-	-	-	2140
08.11.07	«	-4,0	-4,0	2,0	2,44	2125	-	-	-	-	-	2130
09.11.07	Шгх	-14,6	-18,6	4,3	2,42	2110	-	-	-	-	-0,102	1900
10.11.07	Збрг, лдх	-10,8	-29,4	5,4	2,39	2087	-	-	-	-	-0,128	1820
11.11.07	«	-8,9	-38,3	6,2	2,36	2065	-	-	-	-	-0,146	1760
12.11.07	«	-11,8	-50,1	7,1	2,33	2043	-	-	-	-	-0,167	1700
...
17.12.07	Лдст	-12,8	-416,0	20,4	3,14	2684	-	-	-	-	-0,465	1440
18.12.07	«	-19,8	-435,8	20,9	3,13	2676	-	-	-	-	-0,476	1400
19.12.07	«	-10,0	-445,8	21,1	3,11	2659	-	-	-	-	-0,481	1380
20.12.07	«	-8,9	-454,7	21,3	3,07	2625	-	-	-	-	-0,486	1350
21.12.07	«	-30,1	-484,8	22,0	3,03	2592	-	-	-	-	-0,502	1290
22.12.07	«	-8,9	-493,7	22,2	3,00	2567	-	-	-	-	-0,507	1270
23.12.07	«	-8,7	-502,4	22,4	2,95	2526	-	-	-	-	-0,511	1240
24.12.07	«	-12,8	-515,2	22,7	2,90	2485	-	-	-	-	-0,518	1200
25.12.07	«	-17,1	-532,3	23,1	2,86	2453	-	-	-	-	-0,526	1160
26.12.07	«	-24,0	-556,3	23,6	2,84	2437	-	-	-	-	-0,538	1130
27.12.07	«	-21,9	-578,2	24,0	2,83	2429	-	-	-	-	-0,548	1100
28.12.07	«	-8,7	-586,9	24,2	2,82	2421	-	-	-	-	-0,552	1080
29.12.07	«	-8,0	-594,9	24,4	2,81	2413	-	-	-	-	-0,556	1070
30.12.07	«	-10,9	-605,8	24,6	2,79	2397	-	-	-	-	-0,561	1050
31.12.07	«	-12,8	-618,6	24,9	2,77	2381	2,77	1030	2381	-0,567	-0,567	1030

М.2 Расчет ежедневных расходов воды в осенне-зимний период, основанный на закономерности спада зимних расходов воды и истощения стока

М.2.1 Для расчета ЕРВ в осенне-зимний переходный период по модели учета стока, изложенной в 7.6.2, будем использовать те же данные, что и в М.1. В таблице М.2 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета. В графу 6 таблицы М.2 заносятся значения расходов воды, вычисленные по КР свободного русла (М.1).

М.2.2 Первые ледяные образования осенью 2007 года были отмечены 09 ноября (графа 3 таблицы М.2), первое измерение расхода при устойчивом ледоставе произведено 31 декабря (графа 8 таблицы М.2). В качестве Q_0 принимается значение расхода в последний день открытого русла перед началом ледообразования, вычисленное по КР свободного русла (М.1) (2125 м³/с). В качестве Q_T принимается расход, измеренный 31 декабря на 53-й день от первого появления ледяных образований (1030 м³/с). Параметр α_0 вычисляется по формуле (7.27) (графа 9 таблицы М.2)

$$\alpha_0 = \frac{\sqrt{2125/1030-1}}{53} = 0,0082. \quad (\text{М.6})$$

М.2.3 Расчет ЕРВ на любую дату с начала ледовых явлений до первого ИРВ в период устойчивого ледостава производится по формуле (7.26).

М.2.4 Например, на дату 23 ноября (графа 10 таблицы М.2)

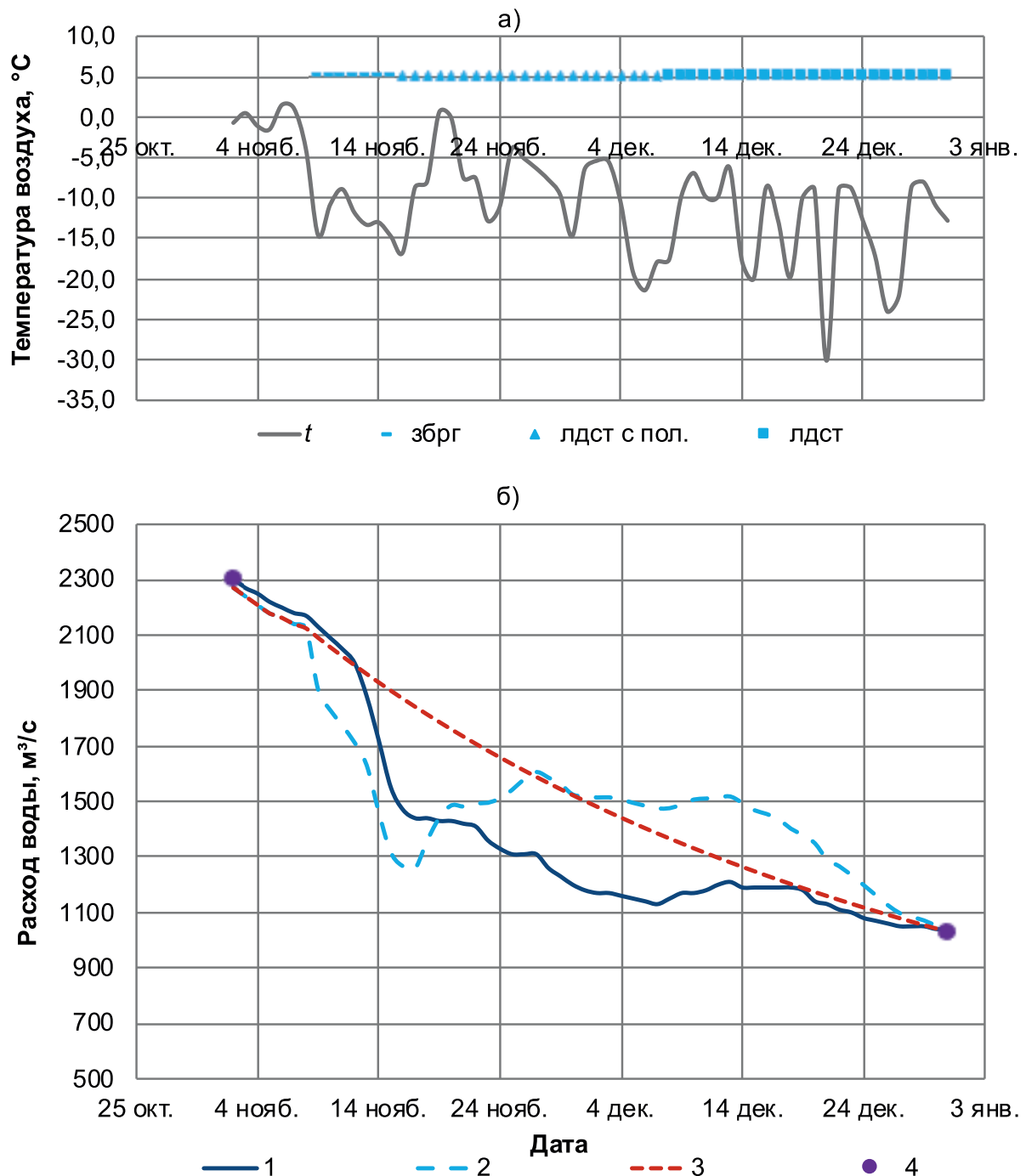
$$Q_{23.11} = \frac{2125}{(1 + 0,0082 \cdot 15)^2} = 1680 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{М.7})$$

Т а б л и ц а М.2 – Расчет ЕРВ р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево за осенне-зимний период 2007 года, основанный на закономерности спада зимних расходов и истощения стока

Дата	T	СВО	t, °C	H, м	Q(H), м ³ /с	H _и , м	Q _и , м ³ /с	α_0	Q _р , м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
08.11.07	-	Св.	-4	2,44	2125	-	-	0,0082	2130
09.11.07	1	Шгх	-14,6	2,42	2110	-	-	-	2090
10.11.07	2	Збрг, лдх	-10,8	2,39	2087	-	-	-	2060
11.11.07	3	«	-8,9	2,36	2065	-	-	-	2020
...
21.11.07	13	Лдст с полын.	-7,5	2,28	2007	-	-	-	1730
22.11.07	14	«	-7,5	2,33	2043	-	-	-	1710
23.11.07	15	«	-12,8	2,38	2080	-	-	-	1680
...
29.12.07	51	Лдст	-8,0	2,81	2413	-	-	-	1050
30.12.07	52	«	-10,9	2,79	2397	-	-	-	1040
31.12.07	53	«	-12,8	2,77	2381	2,77	1030	-	1030

М.3 Сравнение результатов использования алгоритмов, изложенных в М.1 и М.2

М.3.1 На рисунке М.3 приведен хронологический график средней суточной температуры воздуха, ледовых явлений и гидрографы р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево за осенне-зимний период 2007 года, полученные разными способами.



а) – температура воздуха и ледовые явления; б) – гидрограф: 1 – ЕРВ по данным ЕДС; 2 – ЕРВ, вычисленные с использованием данных о среднесуточной температуре воздуха; 3 – ЕРВ, вычисленные на основе закономерности спада зимних расходов и истощения стока; 4 – ИРВ

Рисунок М.3 – Сравнение результатов расчета ЕРВ за период осенне-зимнего ледообразования 2007 года, ГП р. Обь – г. Колпашево

М.3.2 Как видно из рисунка М.3, после резкого падения температуры воздуха и начала ледовых явлений значения расходов, вычисленные по алгоритму, изложенному в М.1, значительно уменьшаются. После установления ледяного покрова с полыньями значения расходов несколько возрастают, а после установления устойчивого ледостава начинают плавно уменьшаться.

М.3.3 Значения ЕРВ, вычисленные по алгоритму, изложенному в М.2, монотонно уменьшаются от даты последнего расхода, измеренного при свободном русле, до даты первого расхода, измеренного при ледоставе.

М.3.4 Значения ЕРВ по данным ЕДС, вычисленные с использованием переходных коэффициентов $K_{зим}$, сначала резко уменьшаются с началом ледовых явлений, а затем остаются примерно постоянными с наступлением ледостава.

М.3.5 С физической точки зрения, наиболее близким к реальному оказывается гидрограф по данным ЕРВ, вычисленным с использованием данных о средней суточной температуре воздуха:

- с появлением ледовых явлений гидравлические сопротивления резко возрастают, что приводит к уменьшению ПСР и уменьшению расходов;

- с установлением ледостава ПСР несколько увеличивается и, как следствие, возрастают расходы;

- с последующим снижением средних суточных температур воздуха происходит нарастание ледяного покрова, что вновь снижает ПСР; кроме того, происходит истощение грунтового питания. Это в сумме приводит к уменьшению расходов воды.

М.4 Расчет ежедневных расходов воды в период весеннего таяния льда с использованием данных о среднесуточной температуре воздуха

М.4.1 Рассмотрим изложенный в 7.6.1 алгоритм на примере расчета ЕРВ р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево за весенний переходный период 2008 года. В таблице М.3 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета.

М.4.2 Наиболее оптимальная аппроксимация зависимости расходов от уровней воды за период свободного русла получена методом кусочно-полиномиальной аппроксимации:

- для диапазона уровней воды от 2,33 до 5,86 м было получено УР в виде полинома методом 2-й степени с ограничением в точке $H_{низш} = 2,00$ м, $Q(H_{низш}) = 2000$ м³/с, имеющее вид

$$Q(H) = 576,91 + 634,01 \cdot H + 38,766 \cdot H^2. \quad (M.8)$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (М.8):

- коэффициент корреляции $R = 0,388$;

- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 3,06$ %;

- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = 0,21 \%$.

- для диапазона уровней воды от 5,86 до 7,41 м было получено УР в виде полинома методом 2-й степени с ограничением в точке $H_{\text{низш}} = 5,84$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 5620$ м³/с, имеющее вид

$$Q(H) = 17815,9 - 5769,9 \cdot H + 630,41 \cdot H^2. \quad (\text{М.9})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (М.9):

- коэффициент корреляции $R = 0,715$;

- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 3,27 \%$;

- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = -0,15 \%$.

М.4.3 Полученная КР показана на рисунке М.4.

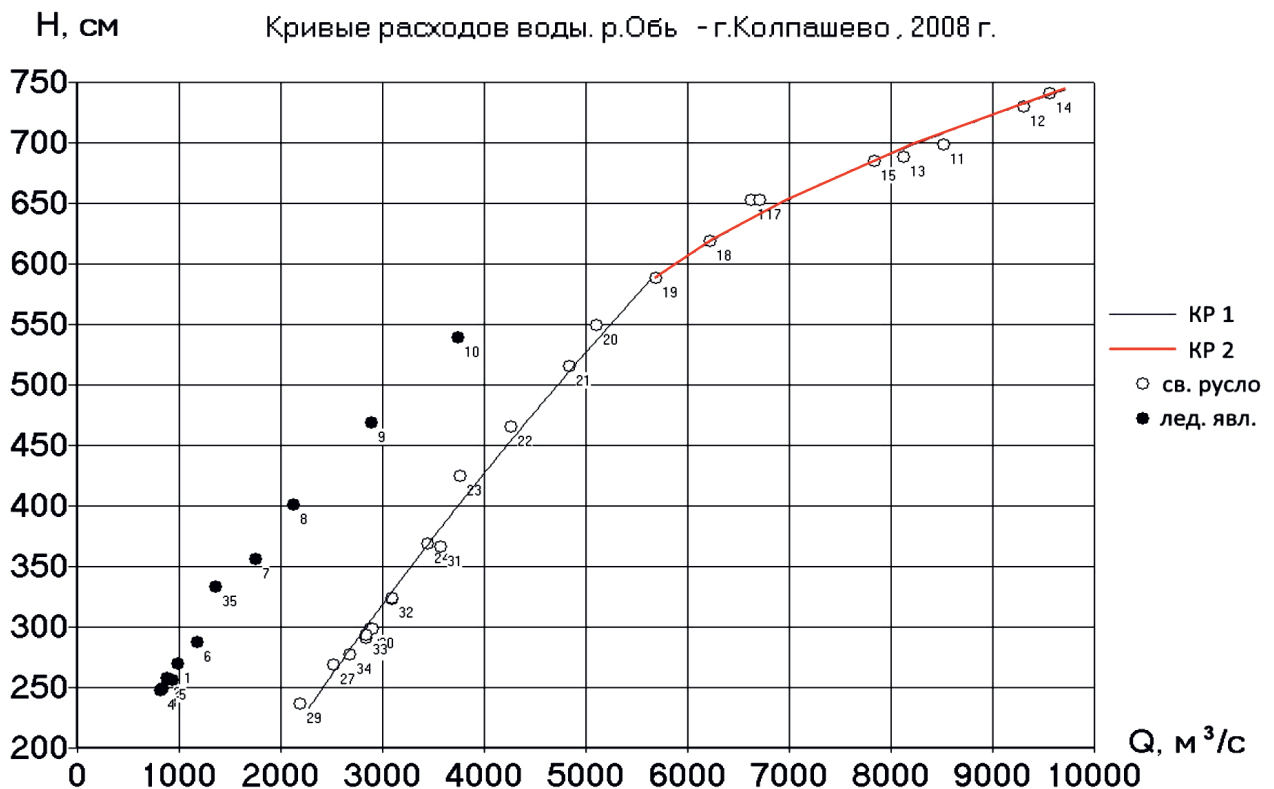


Рисунок М.4 – Годовая зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Обь - г. Колпашево, 2008 год

М.4.4 Рассмотрим алгоритм расчета ЕРВ в осенне-зимний период.

М.4.4.1 Для построения зависимости вида (7.25) необходимо получить последовательную сумму положительных температур воздуха в период весеннего таяния. Устойчивый переход температуры воздуха через 0 °С весной 2008 года произошел 20 апреля

(графа 3 таблицы М.3). В графе 4 показано последовательное суммирование положительных средних суточных температур воздуха.

М.4.4.2 Вычисляются значения расходов воды в период весеннего таяния (19 – 28 апреля) для каждого среднего суточного уровня по формулам (М.8) или (М.9) в зависимости от того, в какой диапазон попадает значение ЕУВ (графа 6 таблицы М.3).

М.4.4.3 Последний расход воды при устойчивом ледоставе, предшествующий устойчивому переходу температуры воздуха через 0 °С, измерен 18 апреля. Вычисляется значение расхода воды для уровня при данном ИПВ по уравнению (М.8) (графа 9 таблицы М.3).

М.4.4.4 Первый расход воды при свободном состоянии русла измерен 30 апреля. Вычисляется значение расхода воды для уровня при данном ИПВ по уравнению (М.9) (графа 9 таблицы М.3).

М.4.4.5 Вычисляются относительные отклонения ИПВ от опорной КР по формуле (5.2) (графа 10 таблицы М.3).

М.4.4.6 На основе данных граф 4 и 10 таблицы М.3 строится график связи вида (7.25). Т. к. годовая КР однозначна, значение \bar{q} первого расхода, измеренного после завершения периода ледовых явлений, может быть принято равным нулю. В результате построения получаем линейную зависимость в виде прямой линии, представленной на рисунке М.5, которая описывается уравнением (М.10).

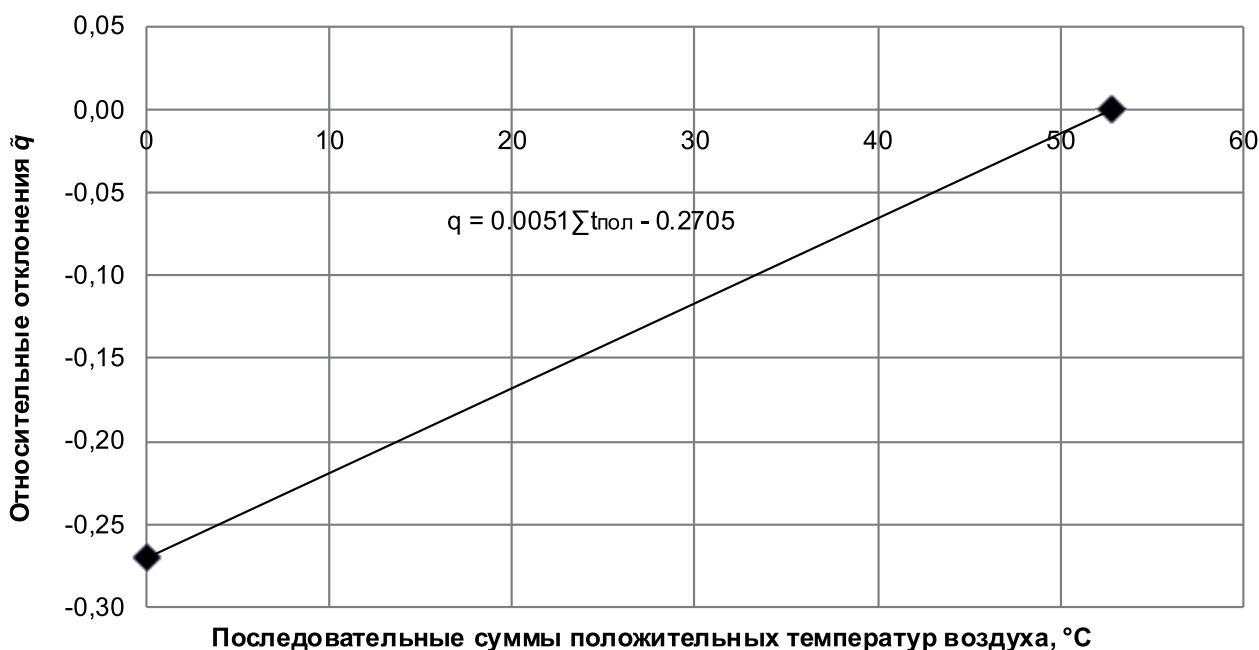


Рисунок М.5 – Зависимость относительных отклонений \bar{q} от нарастающих сумм положительных температур воздуха для ГП р. Обь - г. Колпашево весенний период 2008 года

$$\tilde{q}_в = 0,0051 \cdot \sum t_{\text{пол}} - 0,271. \quad (\text{M.10})$$

М.4.4.7 Уравнение (М.10) используется для расчета значений относительных отклонений в период весеннего таяния вплоть до полного очищения реки от ледяных образований (графа 11 таблицы М.3).

М.4.4.8 ЕРВ периода осенне-зимнего ледообразования (графа 12 таблицы М.3) вычисляются по формуле (5.1) на основе данных граф 6 и 11 таблицы М.3.

М.4.5 Рассмотрим пример расчета РВ на дату 23 апреля.

М.4.5.1 Значение уровня на эту дату (6,44 м) (графа 5 таблицы М.3) попадает в диапазон, описываемый уравнением (М.9). Значение расхода, вычисленное по (М.9) для соответствующего значения уровня составило 6803 м³/с (графа 6 таблицы М.3).

М.4.5.2 Значение нарастающей суммы положительных температур составило 25,2 (графа 4 таблицы М.3). Вычисляем значение относительного отклонения по уравнению (М.10) (графа 11 таблицы М.3)

$$\tilde{q}_{23.04} = 0,0051 \cdot 25,2 - 0,271 = -0,142. \quad (\text{M.11})$$

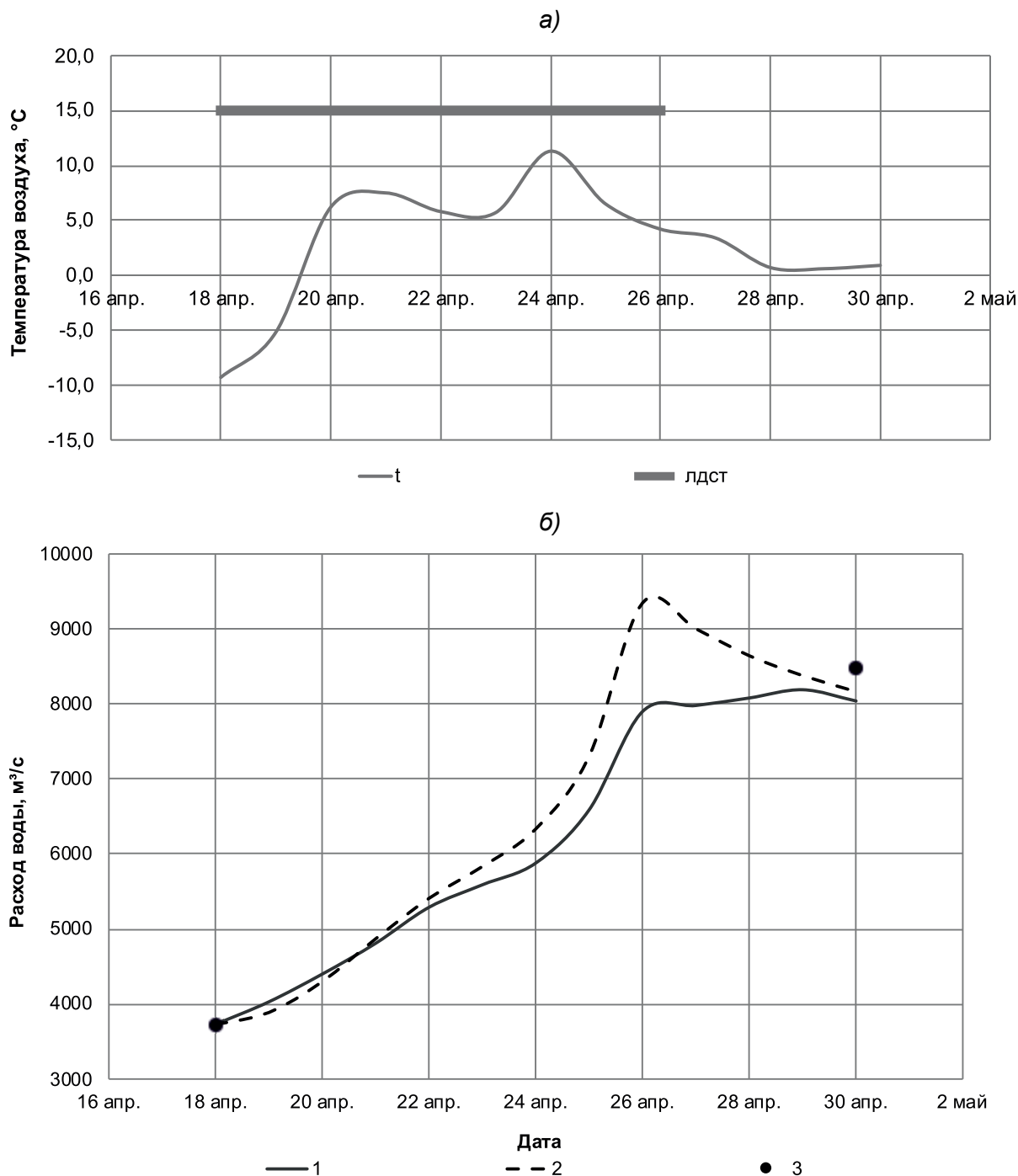
М.4.5.3 Значение расхода воды на дату 23 апреля (графа 12 таблицы М.3)

$$Q_{23.04} = 6803 \cdot (1 - 0,142) = 5830 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{M.12})$$

Т а б л и ц а М.3 – Расчет ЕРВ р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево за весенний период 2008 года

Дата	СВО	$t, ^\circ\text{C}$	Нараст. суммы $t, ^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$Q(H), \text{ м}^3/\text{с}$	$H_{\text{и}}, \text{ м}$	$Q_{\text{и}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q(H_{\text{и}}), \text{ м}^3/\text{с}$	$\tilde{q}_{\text{и}}$	$\tilde{q}_{\text{в}}$	$Q_{\text{р}}, \text{ м}^3/\text{с}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18.04.08	Лдст	-9,3	0	5,38	5110	5,37	3720	5099	-0,271	-0,271	3730
19.04.08	«	-5,2		5,59	5332	-	-	-	-	-0,271	3890
20.04.08	«	6,2	6,2	5,86	5652	-	-	-	-	-0,239	4300
21.04.08	Лед подняло	7,5	13,7	6,11	6096	-	-	-	-	-0,201	4870
22.04.08	Зкр	5,8	19,5	6,32	6530	-	-	-	-	-0,172	5410
23.04.08	«	5,7	25,2	6,44	6803	-	-	-	-	-0,142	5830
24.04.08	Пдвж	11,3	36,5	6,49	6922	-	-	-	-	-0,085	6340
25.04.08	Рзвд, лдх	6,5	43,0	6,79	7703	-	-	-	-	-0,052	7310
26.04.08	Лдх	4,2	47,2	7,40	9640	-	-	-	-	-0,030	9350
27.04.08	«	3,4	50,6	7,25	9120	-	-	-	-	-0,013	9000
28.04.08	«	0,7	51,3	7,13	8725	-	-	-	-	-0,009	8640
29.04.08	Св.	0,6	51,9	7,02	8378	-	-	-	-	-	8380
30.04.08	«	0,9	52,8	6,95	8165	6,95	8480	8165	0,039	-	8170

М.4.5.4 На рисунке М.6 приведен хронологический график средней суточной температуры воздуха, ледовых явлений и гидрографы р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево за период весеннего таяния 2008 года. Как видно из рисунка М.6, после возрастания температур воздуха выше 10 °С происходит интенсивное таяние, что приводит к увеличению расходов воды. После последующего понижения температур воздуха происходит уменьшение расходов.



а) – температура воздуха и ледовые явления; б) – гидрограф: 1 – ЕРВ по данным ЕДС; 2 – ЕРВ, вычисленные с использованием данных о среднесуточной температуре воздуха; 3 – ИРВ

Рисунок М.6 – Результаты расчета ЕРВ за период весеннего таяния 2008 года, ГП р. Обь – г. Колпашево

М.5 Расчет ежедневных расходов воды в период устойчивого ледостава

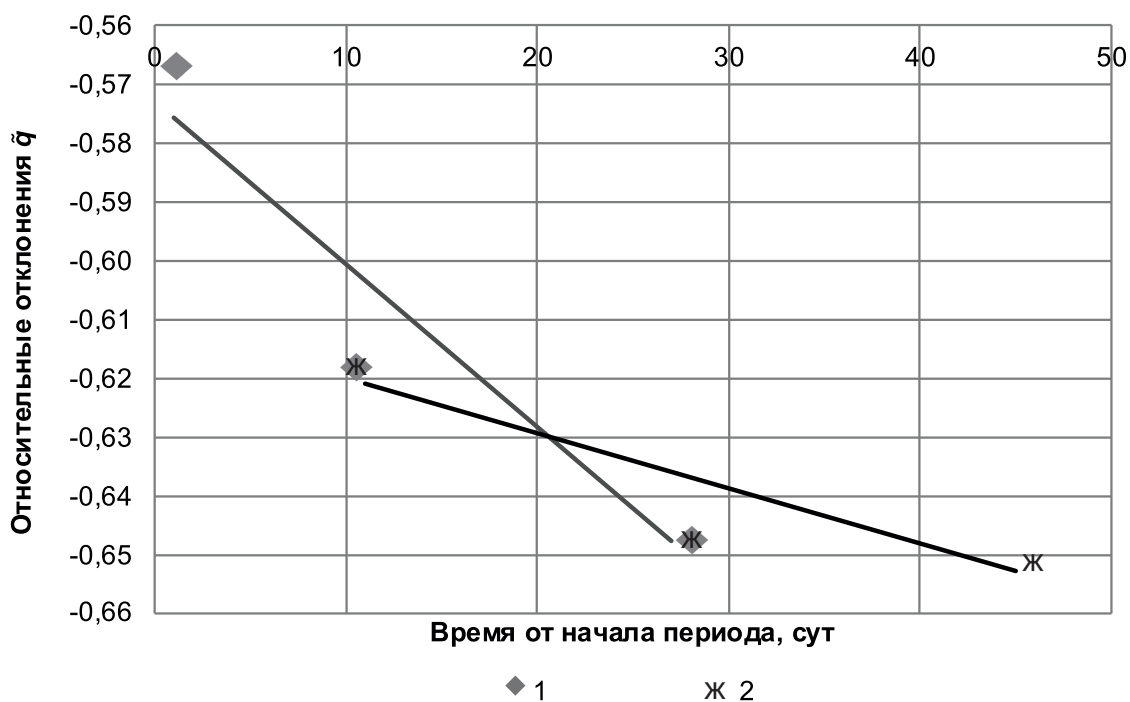
М.5.1 Для расчета ЕРВ р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево за период устойчивого ледостава 2007–2008 годов воспользуемся методом линейной интерполяции элементов предварительно сглаженного временного ряда относительных отклонений, изложенным в 7.1.11. В таблице М.4 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета.

М.5.2 Сглаживание осуществляется уравнением регрессии относительных отклонений \tilde{q} по времени t . В качестве t (графа 2 таблицы М.4) принимаются сутки от даты начала периода устойчивого ледостава (расчетного периода) (31 декабря). Эта процедура эквивалентна представлению элемента ряда \tilde{q} линейной комбинацией соседних с ним элементов. Будем подбирать полином 1-й степени к группе из трех членов ряда $\tilde{q}(t)$ (первого, второго и третьего) и использовать этот полином для определения сглаженного значения \tilde{q} в средней точке группы, соответствующей второму значению \tilde{q} . Затем полином того же порядка подбирается к группе из второго, третьего и четвертого элементов ряда и оценивается значение в точке, соответствующей третьему значению \tilde{q} и т.д. В случае длительного интервала между ИРВ (более 15 сут) линейная зависимость строится по двум смежным значениям ряда $\tilde{q}(t)$. В этом случае оцениваемые значения элементов ряда будут отнесены к серединам интервалов между измерениями.

М.5.2.1 На рисунке М.7 (1) показана прямая зависимость, построенная по данным первых трех ИРВ периода устойчивого ледостава (31 декабря, 10 и 26 января) (графы 2 и 9 таблицы М.4). Эта зависимость которая описывается уравнением (М.13)

$$\tilde{q}_t = -0,5733 - 0.0028 \cdot t \quad (\text{М.13})$$

М.5.2.2 Уравнение (М.13) используется для определения сглаженного значения \tilde{q} на дату 10 января. В графе 11 таблицы М.4 курсивом выделены сглаженные значения относительных отклонений \tilde{q}^\wedge . Первое (31 декабря) и последнее (18 апреля) в расчетном ряду значения \tilde{q} сглаживанию не подлежат.



- 1 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 31 декабря, 10 и 26 января;
 2 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 10 и 26 января, 13 февраля

Рисунок М.7 – Линейное сглаживание трех элементов ряда относительных отклонений \tilde{q} по времени

М.5.2.3 На рисунке М.7 (2) показана прямая зависимость, построенная по данным ИРВ 10 и 26 января и 13 февраля. Эта зависимость описывается уравнением (М.14)

$$\tilde{q}_t = -0,6107 - 0,0009 \cdot t. \quad (\text{М.14})$$

М.5.2.3 Уравнение (М.14) используется для определения сглаженного значения \tilde{q} на дату 26 января.

М.5.2.4 Зависимости, аналогичные представленным на рисунке М.7, строятся для всех последующих комбинаций из трех элементов ряда $\tilde{q}(t)$. На рисунке М.8 представлено линейное сглаживание трех последних элементов ряда $\tilde{q}(t)$. Эта зависимость описывается уравнением (М.15), которое используется для определения сглаженного значения \tilde{q} на дату 14 апреля

$$\tilde{q}_t = -2,7749 + 0,0228 \cdot t. \quad (\text{М.15})$$

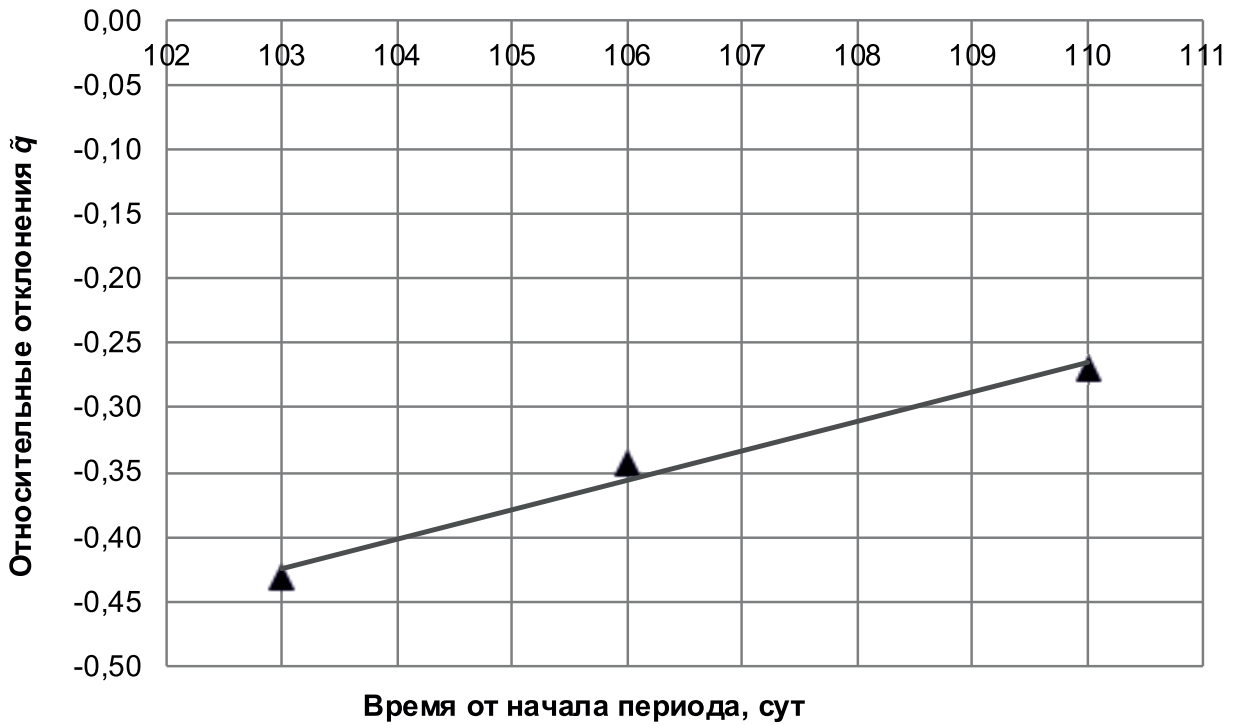


Рисунок М.8 – Линейное сглаживание трех последних элементов ряда относительных отклонений \tilde{q} по времени (11, 14 и 18 апреля)

М.5.3 После сглаживания всего ряда $\tilde{q}(t)$ производится линейная интерполяция между смежными значениями полученного ряда $\tilde{q}^{\wedge}(t)$. Значение относительного отклонения на расчетную дату \tilde{q}_t может быть вычислено по формуле

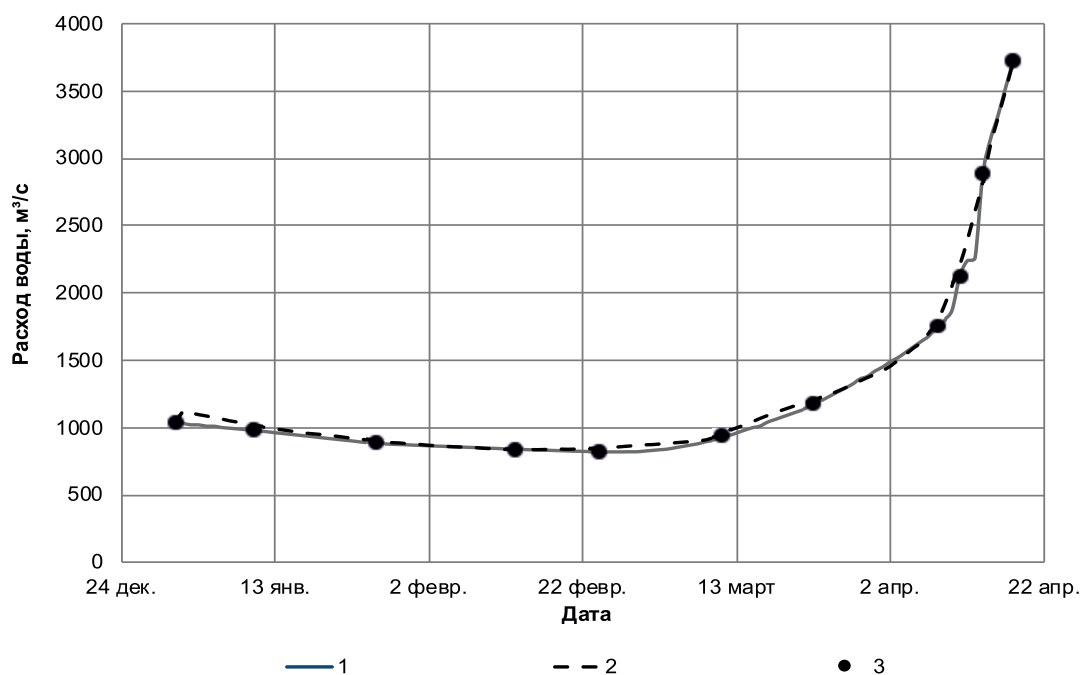
$$\tilde{q}_t = \tilde{q}_{t-1} + \frac{(\tilde{q}_2^{\wedge} - \tilde{q}_1^{\wedge})}{(t_2 - t_1)} \quad (\text{М.16})$$

где \tilde{q}_{t-1} – значение поправки за предшествующие сутки. В начале расчета $\tilde{q}_{t-1} = \tilde{q}_1^{\wedge}$;

\tilde{q}_1^{\wedge} , \tilde{q}_2^{\wedge} – сглаженные значения относительных отклонений от КР соответственно предшествующего и последующего ИРВ.

t_1 , t_2 – число суток, прошедшее от даты начала периода устойчивого ледостава до соответственно предшествующего и последующего ИРВ.

На рисунке М.9 показан хронологический график сглаженных и интерполированных значений относительных отклонений за период ледостава.



1 – относительные отклонения ИРВ от КР свободного русла;
2 – относительные отклонения, вычисленные по методу линейной интерполяции

Рисунок М.9 – Хронологический график относительных отклонений

М.5.4 После вычисления всех значений \tilde{q}_t вычисляются значения ЕРВ по формуле (5.1) (графа 12 таблицы М.4).

М.5.5 Рассмотрим примеры.

М.5.5.1 Расчет ЕРВ на дату 20 января. Расчетная дата находится между датами ИРВ 10 и 26 января.

Сглаживание значения \tilde{q} на 10 января осуществляется по уравнению (М.13) (графа 11 таблицы М.4)

$$\tilde{q}_{10.01} = -0,5733 - 0,0028 \cdot 11 = -0,604 \quad (\text{М.17})$$

Сглаживание значения \tilde{q} на 26 января осуществляется по уравнению (М.14) (графа 11 таблицы М.4)

$$\tilde{q}_{26.01} = -0,6107 - 0,0009 \cdot 27 = -0,635 \quad (\text{М.18})$$

Вычисляем интерполированное значение \tilde{q}_t на расчетную дату (20 января) (графа 11 таблицы М.4)

$$\tilde{q}_{20.01} = -0,621 + \frac{(-0,635 - (-0,604))}{(27 - 11)} = -0,623 \quad (\text{М.19})$$

Вычисляем расход воды на дату 20 января (графа 12 таблицы М.4)

$$Q_{20.01} = 2496 \cdot (1 - 0,623) = 940 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{М.20})$$

М.5.5.2 Расчет ЕРВ на дату 16 апреля. Расчетная дата находится между датами ИРВ 14 и 18 апреля.

Последнее значение \tilde{q} в расчетном периоде (18 апреля), как отмечено в М.3.2.2, сглаживанию не подлежит. Сглаживание значения \tilde{q} на 14 апреля осуществляется по зависимости (М.16) (графа 11 таблицы М.4)

$$\tilde{q}_{14.04} = -2,7749 + 0,0228 \cdot 106 = -0,358 \quad (\text{М.21})$$

Вычисляем интерполированное значение \tilde{q}_t на расчетную дату (16 апреля) (графа 11 таблицы М.4)

$$\tilde{q}_{16.04} = -0,336 + \frac{(-0,271 - (-0,358))}{(110 - 106)} = -0,315 \quad (\text{М.22})$$

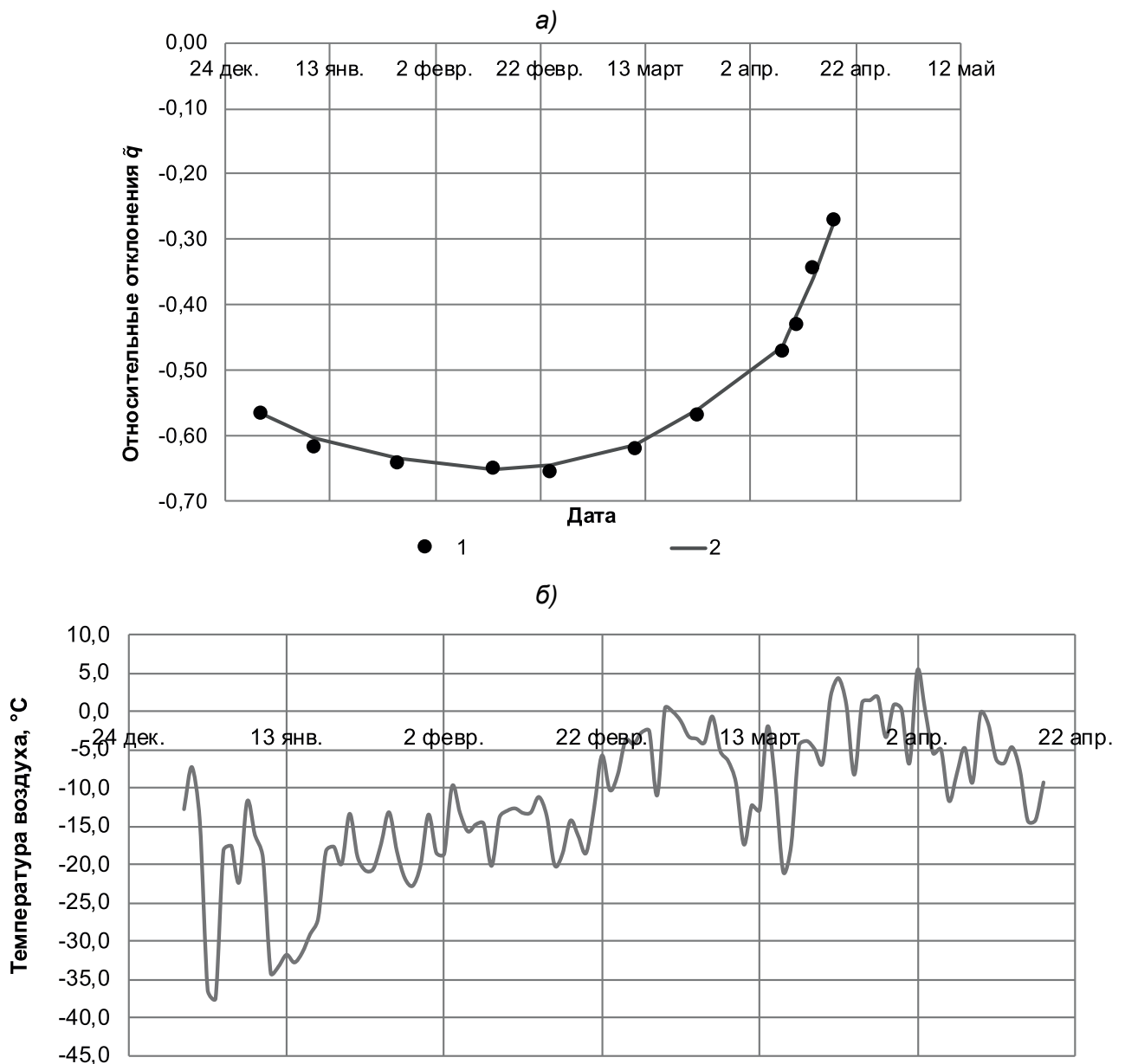
Вычисляем расход воды на дату 16 апреля (графа 12 таблицы М.4)

$$Q_{16.04} = 4819 \cdot (1 - 0,315) = 3300 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{М.23})$$

М.5.6 На рисунке М.10 приведен хронологический график средней суточной температуры воздуха и гидрографы р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево за период ледостава 2007–2008 годов. Как видно из рисунка М.10, гидрограф по данным ЕРВ, вычисленным по изложенному алгоритму, достаточно близко соответствует гидрографу, полученному по данным ЕРВ из ЕДС.

Т а б л и ц а М.4 – Расчет ежедневных расходов воды в гидростворе ГП р. Обь - г. Колпашево за период устойчивого ледостава (зима 2007–2008 годов)

Дата	t от начала расчетного периода, сут	СВО	t, °C	H, м	Q(H), м³/с	H _{лн} , м	Q _{лн} , м³/с	Q(H _{лн}), м³/с	q̄ _{лн}	q̄ _т	Q _р , м³/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
31.12.07	1	Лдст	-12,8	2,77	2381	2,77	1030	2381	-0,567	-0,567	1030
01.01.08	2	«	-7,3	2,75	2614	-	-	-	-	-0,571	1120
...
09.01.08	10	Лдст	-16,2	2,70	2571	-	-	-	-	-0,600	1030
10.01.08	11	«	-19,1	2,69	2563	2,69	980	2563	-0,618	-0,604	1020
...
20.01.08	21	Лдст	-19,9	2,61	2496	-	-	-	-	-0,623	940
21.01.08	22	«	-13,4	2,61	2496	-	-	-	-	-0,625	935
22.01.08	23	«	-19,0	2,60	2487	-	-	-	-	-0,627	927
23.01.08	24	«	-20,8	2,59	2479	-	-	-	-	-0,629	919
24.01.08	25	«	-20,6	2,59	2479	-	-	-	-	-0,631	914
25.01.08	26	«	-17,3	2,58	2471	-	-	-	-	-0,633	907
26.01.08	27	«	-13,2	2,57	2462	2,57	881	2462	-0,642	-0,635	899
27.01.08	28	«	-18,3	2,56	2454	-	-	-	-	-0,636	893
...
12.02.08	44	Лдст	-13,3	2,49	2396	-	-	-	-	-0,651	836
13.02.08	45	«	-13,2	2,49	2396	2,49	839	2396	-0,650	-0,652	834
...
11.04.08	103	Лдст	-1,7	4,01	3743	4,00	2120	3733	-0,432	-0,411	2200
12.04.08	104	«	-6,3	4,22	3943	-	-	-	-	-0,394	2390
13.04.08	105	«	-6,8	4,46	4176	-	-	-	-	-0,376	2610
14.04.08	106	«	-4,7	4,68	4393	4,67	2880	4383	-0,343	-0,358	2820
15.04.08	107	«	-7,7	4,95	4665	-	-	-	-	-0,336	3100
16.04.08	108	«	-14,3	5,10	4819	-	-	-	-	-0,315	3300
17.04.08	109	«	-14,2	5,24	4964	-	-	-	-	-0,293	3510
18.04.08	110	«	-9,3	5,38	5110	5,37	3720	5099	-0,271	-0,271	3730



а) – температура воздуха; б) – гидрограф:
 1 – ЕРВ по данным ЕДС; 2 – ЕРВ, вычисленные с использованием интерполяции сглаженных значений относительных отклонений; 3 – ИРВ

Рисунок М.10 – Температура воздуха и результаты расчета ЕРВ р. Обь в гидростворе ГП г. Колпашево за период ледостава 2007 – 2008 годов

Приложение Н

(обязательное)

Пример расчета ежедневных расходов воды в условиях зарастания русла

Н.1 Пример учета стока в условиях зарастания русла с использованием интерполяционно-гидравлической модели

Н.1.1 Рассмотрим процедуру расчета ЕРВ за период зарастания 2013 года русла р. Воронеж в гидростворе ГП г. Липецк согласно методике, изложенной в 7.7.3. В таблице Н.1 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета.

Н.1.2 Параметр Великанова (графа 9 таблицы Н.1) вычисляется по формуле (7.29) на каждую дату ИРВ в расчетном периоде по данным об измеренных расходах, площадях живого сечения и ширине русла (графы соответственно 6, 7 и 8 таблицы Н.1).

Н.1.3 В интервалах между датами ИРВ параметр m_3 должен быть проинтерполирован. С этой целью рекомендуется использовать подход, изложенный в 7.1.11. При этом сначала выполняется сглаживание полученного по данным ИРВ ряда m_3 , а затем линейная интерполяция между элементами сглаженного ряда. В данном случае, вследствие достаточно больших промежутков между ИРВ (более 10 сут), полином подбирается к каждой паре смежных членов ряда, иными словами, строится прямая зависимость вида

$$m_3 = a_0 + a_1 \cdot \tau, \quad (\text{Н.1})$$

где a_0, a_1 – константы уравнения;

τ – время от начала периода зарастания, сут.

Н.1.4 На начальную и конечную даты расчетного периода сглаженные значения параметра Великанова принимаются равными m_3 , вычисленным соответственно по данным первого и последнего ИРВ.

Н.1.5 Зависимость вида (Н.1) используется для получения сглаженных значений m_3 в серединах интервалов между ИРВ, после чего выполняется линейная интерполяция между ними.

Н.1.5.1 Например, линейная зависимость между значениями m_3 на даты ИРВ 16 и 23 мая имеет вид

$$m_3 = 0,1336 - 0,0013 \cdot \tau. \quad (\text{Н.2})$$

Вычисляем значение m_3 в середине интервала (19 мая)

$$m_{3\ 19.05} = 0,1336 - 0,0013 \cdot 4 = 0,128 \quad (\text{H.3})$$

Н.1.5.2 Линейная зависимость между значениями m_3 на даты ИРВ 23 мая и 14 июня имеет вид

$$m_3 = 0,1313 - 0,001 \cdot \tau. \quad (\text{H.4})$$

Вычисляем значение m_3 в середине интервала (3 июня)

$$m_{3\ 03.06} = 0,1313 - 0,001 \cdot 19 = 0,112 \quad (\text{H.5})$$

Н.1.6 Линейную интерполяцию между сглаженными значениями m_3 можно выразить формулой

$$m_{3\ \tau} = m_{3\ \tau-1} + \frac{(m_{3\text{к}} - m_{3\text{н}})}{(\tau_{\text{к}} - \tau_{\text{н}})} \quad (\text{H.6})$$

где $m_{3\ \tau}$ – значение параметра Великанова на дату интерполяции;

$m_{3\ \tau-1}$ – значение параметра Великанова за предшествующие сутки; в начале расчета $m_{3\ \tau-1} = m_{3\text{н}}$;

$m_{3\text{н}}$, $m_{3\text{к}}$ – значения параметра Великанова соответственно в начале и в конце интервала интерполяции;

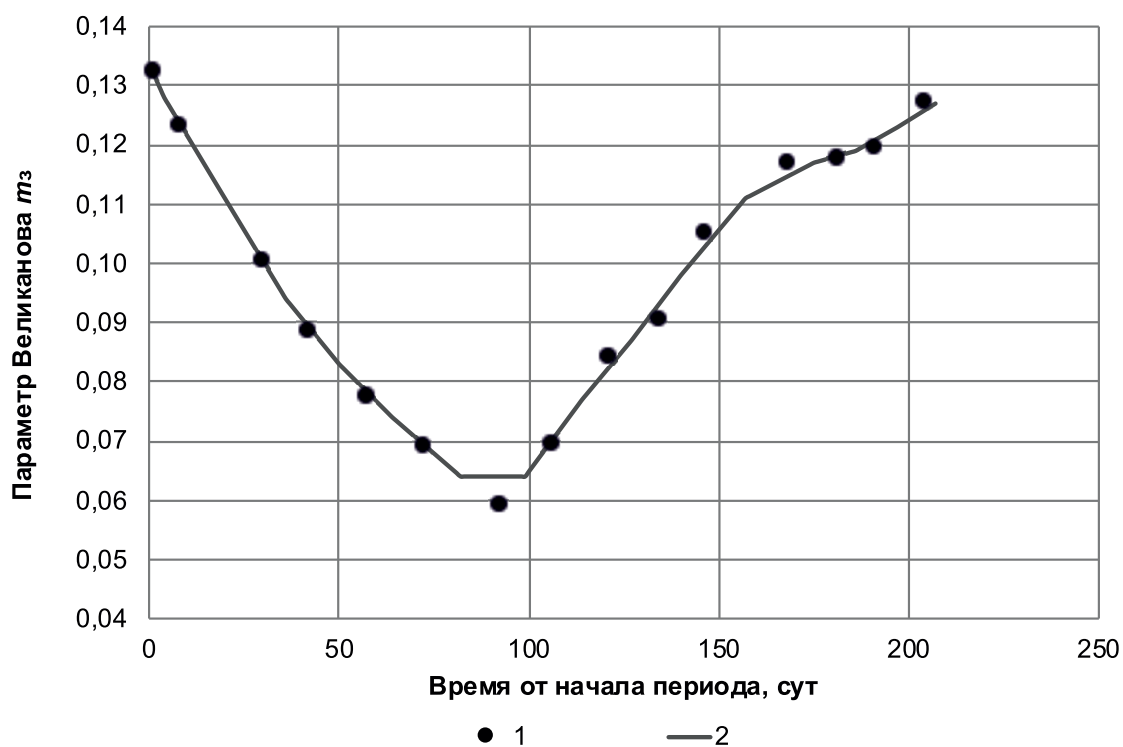
$\tau_{\text{н}}$, $\tau_{\text{к}}$ – время от начала периода зарастания соответственно в начале и в конце интервала интерполяции, сут.

Например, в промежутке между 19 мая и 03 июня интерполяция выглядит так

$$m_{3\ 20.05} = 0,128 + \frac{0,112 - 0,128}{19 - 4} = 0,127; \quad (\text{H.7})$$

$$m_{3\ 21.05} = 0,127 + \frac{0,112 - 0,128}{19 - 4} = 0,126 \text{ и т.д.}$$

Н.1.7 На рисунке Н.1 представлен ход значений m_3 , вычисленных по данным ИРВ, и их сглаженные значения.



1 – значения m_3 , вычисленные по данным ИПВ; 2 – сглаженные значения m_3

Рисунок Н.1 – Хронологический график параметра Великанова m_3

Н.1.8 Для расчета ЕРВ на основе параметра Великанова по формуле (7.30) необходимо получить зависимости площади живого сечения и ширины русла за период зарастания от уровня воды ($\omega_3(H)$ и $B_3(H)$). Для периода зарастания 2013 года эти зависимости выглядят так

$$\omega_3(H) = 22,621 + 121,15 \cdot H - 5,1021 \cdot H^2 \quad (\text{Н.8})$$

$$B_3(H) = 37,462 + 47,723 \cdot H - 8,373 \cdot H^2, \quad (\text{Н.9})$$

Расчеты величин $\omega_3(H)$ и $B_3(H)$ для средних суточных уровней воды представлены соответственно в графах 10 и 11 таблицы Н.1.

Н.1.9 Расчет расхода воды на дату 30 мая (графа 13 таблицы Н.1)

$$Q_{30.05} = 0,116 \cdot \frac{204^{5/3}}{99,4^{2/3}} = 38,3 \text{ м}^3/\text{с} \quad (\text{Н.10})$$

Т а б л и ц а Н.1 – Расчет ЕРВ р. Воронеж в гидростворе ГП г. Липецк в период зарастания русла 2013 года с использованием интерполяционно-гидравлической модели

Дата	τ , сут от нач. зар.	СВО	H_M , м	Q_{M1} , м ³ /с	ω_3 , м ²	B_3 , м	m_3	$m_{3, \text{расч}}$	$\omega_3(H)$	$B_3(H)$	Q_B , м ³ /с
1	2	3	5	6	7	8	9	12	10	11	13
16.05.13	1	Раст. у берега	2,42	57	245	105	0,132	0,132	246	104	56,6
17.05.13	2	«	-	-	-	-	-	0,131	241	104	54,6
18.05.13	3	«	-	-	-	-	-	0,129	224	102	48,6
19.05.13	4	«	-	-	-	-	-	0,128	212	101	44,5
20.05.13	5	«	-	-	-	-	-	0,127	204	99,4	41,7
21.05.13	6	«	-	-	-	-	-	0,126	200	98,8	40,2
22.05.13	7	«	-	-	-	-	-	0,125	196	98,4	38,9
23.05.13	8	«	1,9	36,8	193	100	0,123	0,124	192	97,7	37,4
24.05.13	9	«	-	-	-	-	-	0,123	187	96,9	35,6
25.05.13	10	«	-	-	-	-	-	0,122	187	96,9	35,3
26.05.13	11	«	-	-	-	-	-	0,121	187	96,9	35,0
27.05.13	12	«	-	-	-	-	-	0,119	187	96,9	34,7
28.05.13	13	«	-	-	-	-	-	0,118	189	97,3	35,0
29.05.13	14	«	-	-	-	-	-	0,117	195	98,2	36,3
30.05.13	15	«	-	-	-	-	-	0,116	204	99,4	38,3
31.05.13	16	«	-	-	-	-	-	0,115	211	100	39,9
01.06.13	17	«	-	-	-	-	-	0,114	209	100	39,0
02.06.13	18	«	-	-	-	-	-	0,113	206	99,7	37,8
03.06.13	19	«	-	-	-	-	-	0,112	204	99,4	36,9
04.06.13	20	«	-	-	-	-	-	0,111	202	99,1	36,0
05.06.13	21	«	-	-	-	-	-	0,110	200	98,8	35,1
06.06.13	22	«	-	-	-	-	-	0,109	197	98,5	34,2
07.06.13	23	«	-	-	-	-	-	0,108	195	98,2	33,3
08.06.13	24	«	-	-	-	-	-	0,107	197	98,5	33,5
09.06.13	25	«	-	-	-	-	-	0,106	201	99,0	33,9
10.06.13	26	«	-	-	-	-	-	0,105	201	99,0	33,5
11.06.13	27	«	-	-	-	-	-	0,104	196	98,4	32,2
12.06.13	28	«	-	-	-	-	-	0,102	194	98,1	31,3
13.06.13	29	«	-	-	-	-	-	0,101	192	97,7	30,5
14.06.13	30	«	1,89	30,4	193	98	0,100	0,100	192	97,7	30,2

Н.2 Пример учета стока в условиях зарастания русла с использованием метода оптимальной интерполяции

Н.2.1 Наиболее оптимальная аппроксимация зависимости расходов от уровней воды за период свободного русла для диапазона уровней воды от 2,49 до 4,62 м была получена методом полиномиальной регрессии с ограничением в точке $H_{\text{низш}} = 1,20$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 35,0$ м³/с. Ограничения были назначены из соображений, что точки ИРВ периодов зарастания и ледовых явлений должны находиться слева от КР. Полученная зависимость представлена на рисунке Н.2. Выбранное УР имеет вид

$$Q(H) = -51,48 + 152,71 \cdot H - 89,392 \cdot H^2 + 18,492 \cdot H^3. \quad (\text{Н.11})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (Н.11):

- коэффициент корреляции $R = 0,997$;
- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 7,18$ %;
- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = -0,05$ %.

Наивысший уровень воды за 2013 год составил 4,72 м. В диапазоне уровней от 4,63 до 4,72 м была выполнена экстраполяция КР по методике, изложенной в 5.6.



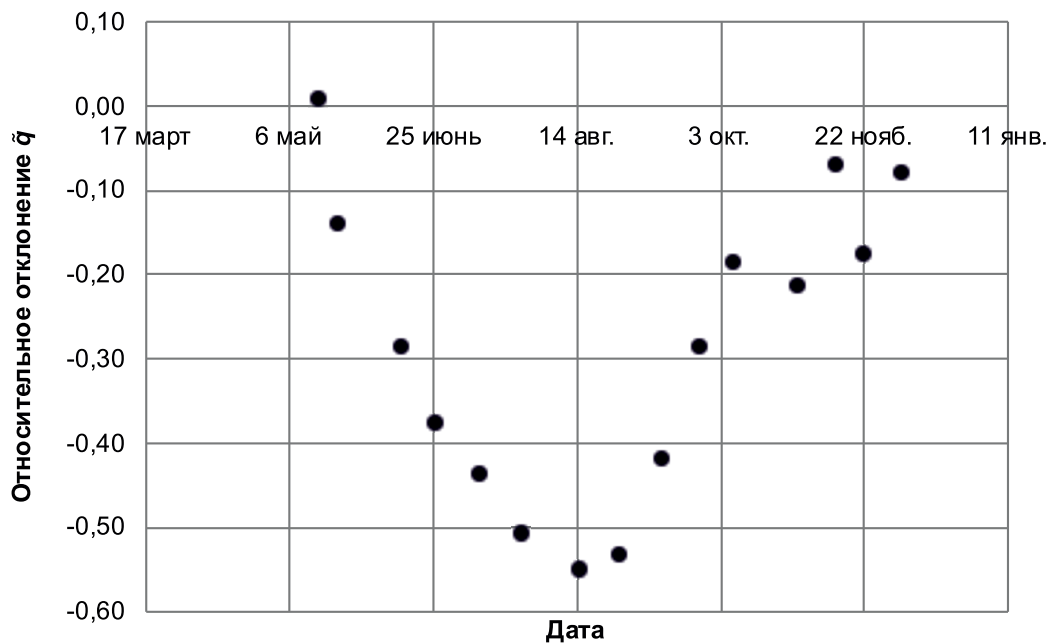
Рисунок Н.2 – Годовая зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Воронеж – г. Липецк, 2013 год

Н.2.2 В 2013 году продолжительность периода зарастания р. Воронеж в гидростворе ГП г. Липецк составила $T_n = 207$ сут (с 16 мая по 8 декабря). В таблице Н.2 приведены ИРВ за период зарастания.

Т а б л и ц а Н.2 – ИРВ за период зарастания, ГП р. Воронеж – г. Липецк, 2013 год

№ ИРВ	Дата ИРВ	СВО	H , см	H , м	Q , м ³ /с	$Q_{ур}$, м ³ /с	\tilde{q}	τ , сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Период нарастания водной растительности								
13	16.05.13	Раст. у берега	242	2,42	57,0	56,6	0,006	-
14	23.05.13		190	1,9	36,8	42,8	-0,140	7
15	14.06.13		189	1,89	30,4	42,7	-0,288	22
16	26.06.13	Раст. по всему сеч. пятнами	183	1,83	26,1	41,9	-0,378	12
17	11.07.13		199	1,99	24,8	44,1	-0,438	15
18	26.07.13		193	1,93	21,3	43,2	-0,507	15
19	15.08.13		209	2,09	20,7	46,0	-0,550	20
Сумма квадратов							0,997	-
Среднее								15
Период спада водной растительности								
20	29.08.13	“	185	1,85	19,7	42,2	-0,533	14
21	13.09.13	Раст. стелется по дну	187	1,87	24,6	42,4	-0,420	15
22	26.09.13	Раст. у берега	236	2,36	38,6	54,1	-0,287	13
23	08.10.13		223	2,23	40,4	49,6	-0,185	12
24	30.10.13		276	2,76	61,2	77,8	-0,214	22
25	12.11.13	Раст. легла на дно	218	2,18	44,8	48,2	-0,070	13
26	22.11.13		183	1,83	34,5	41,9	-0,177	10
27	05.12.13		188	1,88	39,1	42,5	-0,081	13
Сумма квадратов							0,665	-
Среднее								14

Н.2.3 На основе данных граф 2 и 8 таблицы Н.2 построен хронологический график относительных отклонений за период зарастания (рисунок Н.3).

Рисунок Н.3 – Хронологический график относительных отклонений \tilde{q} за период зарастания 2013 года

Н.2.4 Из рисунка Н.3 видно, что максимальное значение относительного отклонения ИРВ от принятой опорной КР (Н.11) достигается 15 августа, что соответствует максимальной степени развития водной растительности, когда она занимает все сечение потока. Исходя из рисунка Н.3, можно выделить два основных периода:

- нарастания растительности длительностью 92 сут (с 16 мая до 15 августа);
- спада растительности длительностью 115 сут (с 15 августа до 08 декабря).

Дату завершения периода зарастания можно считать условной, т.к. в конце осени растительность и ледовые явления оказывают комплексное влияние на ПСР.

Н.2.5 Будем рассматривать отдельно два процесса $\tilde{q}(t)$ – для периодов нарастания и спада растительности. Для использования метода оптимальной интерполяции необходимо определить меру погрешности измерения расходов по формуле (7.3).

Н.2.5.1 За период нарастания значение дисперсии случайного процесса относительных отклонений \tilde{q} составило

$$\sigma_{\tilde{q}}^2 = \frac{\sum_1^n q_i^2}{n-k} = \frac{0,997}{7-4} = 0,33. \quad (\text{Н.12})$$

Погрешность ИРВ примем равной 10 %. Мера погрешности ИРВ за период нарастания

$$\eta = \frac{0,10^2}{0,33 - 0,10^2} = 0,031. \quad (\text{Н.13})$$

Н.2.5.2 За период спада значение дисперсии случайного процесса относительных отклонений \tilde{q} составило

$$\sigma_{\tilde{q}}^2 = \frac{\sum_1^n q_i^2}{n-k} = \frac{0,665}{8-4} = 0,17. \quad (\text{Н.14})$$

Мера погрешности ИРВ за период спада

$$\eta = \frac{0,10^2}{0,17 - 0,10^2} = 0,064. \quad (\text{Н.15})$$

Н.2.6 Далее необходимо определить средний интервал между ИРВ в расчетном периоде (графа 9 таблицы Н.2). В нашем случае для периода нарастания $\tau_{\text{ср н}} = 15$ сут, для периода спада $\tau_{\text{ср с}} = 14$ сут.

Н.2.7 Теоретическая автокорреляционная функция (7.2) принимает вид

- для периода нарастания

$$r = \cos(2\pi t/92), \quad (\text{Н.16})$$

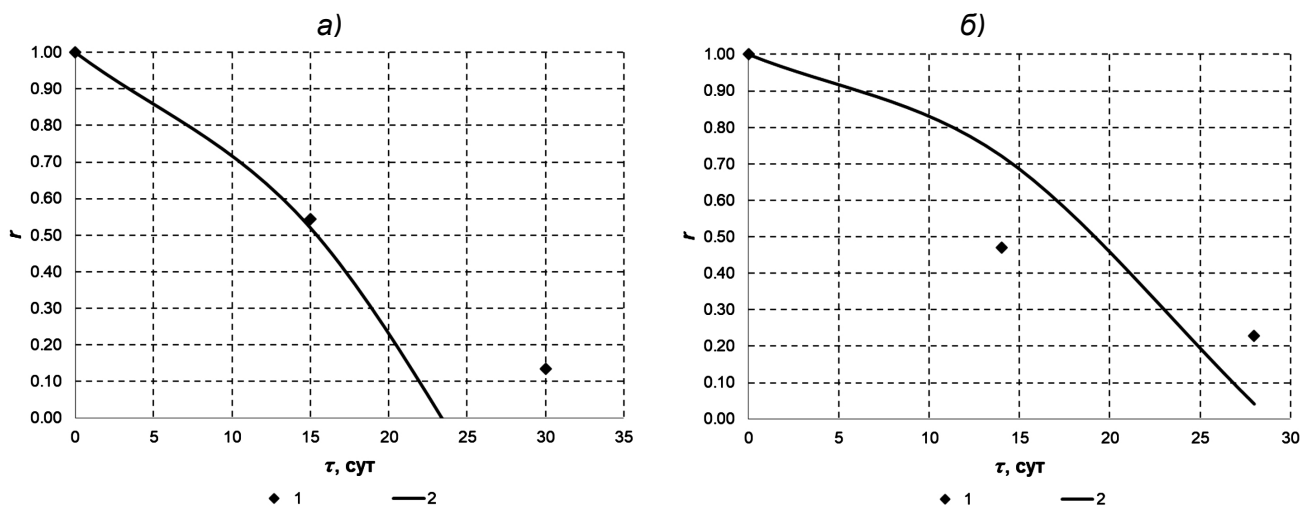
- для периода спада

$$r = \cos(2\pi\tau/115). \quad (\text{H.17})$$

Н.2.8 Значения коэффициентов r эмпирической и теоретической АКФ для соответствующих интервалов τ представлены в таблице Н.3. В графическом виде АКФ представлены на рисунке Н.4.

Т а б л и ц а Н.3 – АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\tilde{q}(t)$

τ , сут	Эмпирическая АКФ	Теоретическая АКФ
1	2	3
Период нарастания водной растительности		
0	1,000	1,000
15	0,545	0,520
30	0,135	-0,459
Период спада водной растительности		
0	1,000	1,000
14	0,470	0,722
28	0,229	0,042



а) – период нарастания; б) – период спада растительности; 1 – эмпирическая; 2 – теоретическая

Рисунок Н.4 – АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\tilde{q}(t)$

Н.2.9 Из рисунка Н.4 видно, что теоретические АКФ достаточно близко аппроксимируют эмпирические точки, следовательно, для расчета ЕРВ р. Воронеж за период зарастания русла 2013 года можно применить метод оптимальной интерполяции.

Н.2.10 В таблице Н.4 показана рекомендуемая форма представления исходных данных и результатов расчета.

Н.2.10.1 Для каждого среднего суточного значения уровня воды по УР (Н.11) вычисляются расходы воды (графа 4 таблицы Н.4). На даты ИРВ по УР (Н.11) вычисляются расходы (графа 7 таблицы Н.4) для каждого уровня во время ИРВ (графа 5 таблицы Н.4).

Н.2.10.2 Для каждого ИРВ вычисляются относительные отклонения по формуле (5.2) (графа 8 таблицы Н.4).

Н.2.10.3 В соответствии со схемой индексных обозначений (см. рисунок 7.3) определяются интервалы τ_{01} (графа 9 таблицы Н.4), τ_{02} (графа 10 таблицы Н.4) и τ_{12} (графа 11 таблицы Н.4).

Н.2.10.4 По формулам (Н.16) или (Н.17) (в зависимости от того, в какой период попадает расчетная дата) вычисляются значения $r(\tau_{01})$ (графа 12 таблицы Н.4), $r(\tau_{02})$ (графа 13 таблицы Н.4) и $r(\tau_{12})$ (графа 14 таблицы Н.4) для соответствующих интервалов.

Н.2.10.5 Вычисляются значения весовых коэффициентов:

- на даты ИРВ по формулам (7.12), (7.13) и (7.14) (графы 15, 16 и 17 таблицы Н.4 соответственно);

- на даты между ИРВ по формулам (7.7) и (7.8) (графы 15 и 16 таблицы Н.4).

Н.2.10.6 Вычисляются сглаженные значения относительных отклонений на даты ИРВ по формуле (7.11) (графа 18 таблицы Н.4).

Н.2.10.7 Вычисляются интерполированные значения относительных отклонений на даты между ИРВ по формуле (7.9) (графа 18 таблицы Н.4).

Н.2.10.8 По формуле (5.1) вычисляются значения ЕРВ (графа 19 таблицы Н.4).

Н.2.11 Рассмотрим несколько примеров.

Н.2.11.1 Расчет ЕРВ на дату 20 мая (период нарастания). Дата находится между ИРВ 16 и 23 мая. Значения интервалов составляют: до предшествующего ИРВ (16 мая) $\tau_{01}=4$ сут, до последующего ИРВ (23 мая) $\tau_{02}=3$ сут (графы 9 и 10 таблицы Н.4). Значение интервала между измерениями составляет $\tau_{12}=7$ сут (графа 11 таблицы Н.4). Вычисляем значения АКФ по формуле (Н.16) (графы 12, 13 и 14 таблицы Н.4)

$$\begin{aligned} r(\tau_{01}) &= \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 4)/92) = 0,963; \\ r(\tau_{02}) &= \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 3)/92) = 0,979; \\ r(\tau_{12}) &= \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 7)/92) = 0,888. \end{aligned} \tag{Н.18}$$

Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.7) и (7.8)) (графы 15 и 16 таблицы Н.4)

$$p_1 = \frac{(1+0,031) \cdot 0,963 - 0,979 \cdot 0,888}{(1+0,031)^2 - 0,888^2} = 0,450 \tag{Н.19}$$

$$p_2 = \frac{(1+0,031) \cdot 0,979 - 0,963 \cdot 0,888}{(1+0,031)^2 - 0,888^2} = 0,562 \tag{Н.20}$$

Значение относительного отклонения на дату 20 мая вычисляется на основе относительных отклонений ИРВ 16 и 23 мая (графа 18 таблицы Н.4)

$$\bar{q}_{20.05} = 0,450 \cdot 0,006 + 0,562 \cdot (-0,140) + (1 - 0,450 - 0,562) \cdot ((0,006 + (-0,140)) / 2) = -0,075. \quad (\text{H.21})$$

Вычисляется расход воды на дату 20 апреля (графа 19 таблицы Н.4)

$$Q_{20.05} = 44,3 \cdot (1 - 0,075) = 41,0 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{H.22})$$

Н.2.11.2 Расчет ЕРВ на дату 29 августа (период спада). В этот день производилось ИРВ. Предшествующее ИРВ – 15 августа, последующее – 13 сентября. Значения интервалов составляют: до предшествующего ИРВ (15 августа) $\tau_{01}=14$ сут, до последующего ИРВ (13 сентября) $\tau_{02}=15$ сут (графы 9 и 10 таблицы Н.4). Значение интервалов между предшествующим и последующим измерениями составляет $\tau_{12}=29$ сут (графа 11 таблицы Н.4). Значения АКФ для этих интервалов, вычисляемые по формуле (Н.17), равны 0,722, 0,683 и минус 0,013 соответственно (графы 12, 13 и 14 таблицы Н.4). Отрицательное значение принимаем равным нулю. Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.12), (7.13) и (7.14)) (графы 15, 16 и 17 таблицы Н.4)

$$p_1 = \frac{(1+0,064)^2 \cdot 0,722 - (1+0,064) \cdot (0 \cdot 0,683 + 0,722) + 0 \cdot 0,683}{(1+0,064)^3 - (1+0,064) \cdot (0^2 + 0,683^2 + 0,722^2) + 2 \cdot 0,722 \cdot 0 \cdot 0,683} = 0,319 \quad (\text{H.23})$$

$$p_0 = \frac{(1+0,064)^2 - (1+0,064) \cdot (0,683^2 + 0,722^2) + 0 \cdot (0,683 \cdot 0,722 + 0,722 \cdot 0,683 - 0)}{(1+0,064)^3 - (1+0,064) \cdot (0^2 + 0,683^2 + 0,722^2) + 2 \cdot 0,722 \cdot 0 \cdot 0,683} = 0,530 \quad (\text{H.24})$$

$$p_2 = \frac{(1+0,064)^2 \cdot 0,683 - (1+0,064) \cdot (0 \cdot 0,722 + 0,683) + 0 \cdot 0,722}{(1+0,064)^3 - (1+0,064) \cdot (0^2 + 0,683^2 + 0,722^2) + 2 \cdot 0,722 \cdot 0 \cdot 0,683} = 0,302 \quad (\text{H.25})$$

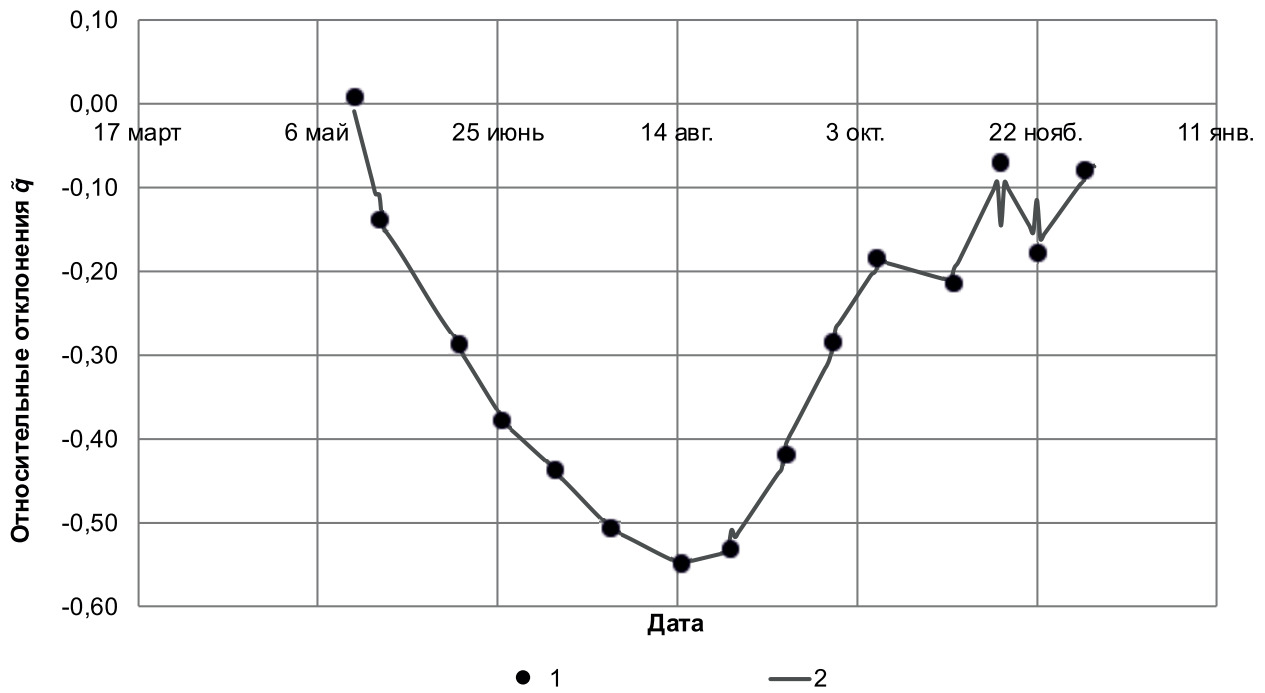
Значение относительного отклонения на дату 29 августа вычисляется на основе относительных отклонений трех ИРВ (15, 29 августа и 13 сентября) (графа 18 таблицы Н.4)

$$\begin{aligned} \bar{q}_{29.08} &= 0,319 \cdot (-0,550) + 0,530 \cdot (-0,533) + 0,302 \cdot (-0,420) + \\ &+ (1 - 0,319 - 0,530 - 0,302) \cdot (((-0,550) + (-0,533) + (-0,420)) / 3) = -0,509. \end{aligned} \quad (\text{H.26})$$

Вычисляем расход воды на дату 29 августа (графа 19 таблицы Н.4)

$$Q_{29.08} = 42,2 \cdot (1 - 0,509) = 20,7 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{H.27})$$

Н.2.12 На рисунке Н.5 показан ход относительных отклонений за период зарастания 2013 года.



1 – относительные отклонения ИПВ от осредняющей КР;
 2 – относительные отклонения, вычисленные по методу оптимальной интерполяции

Рисунок Н.5 – Хронологический график относительных отклонений за период зарастания 2013 года

Т а б л и ц а Н.4 – Расчет ежедневных расходов воды р. Воронеж в гидростворе ГП г. Липецк за период зарастания русла 2013 года

Дата	СВО	H, м	Q(H), м³/с	H _н , м	Q _н , м³/с	Q(H _н), м³/с	q _н	τ ₀₁	τ ₀₂	τ ₁₂	r(τ ₀₁)	r(τ ₀₂)	r(τ ₁₂)	p ₁		p ₂		q̇ _r , q̇ _{t0}	Q _р , м³/с	
														p ₁	p ₂	p ₁	p ₂			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
Период нарастания водной растительности																				
16.05.13		2,42	56,6	2,42	57,0	56,6	0,006		7			0,888		0,000	0,883	0,092		-0,009	56,1	
17.05.13		2,37	54,5	-	-	-	-	1	6	7	0,998	0,917	0,888	0,780	0,218	-		-0,026	53,1	
18.05.13		2,20	48,7	-	-	-	-	2	5	7	0,991	0,942	0,888	0,673	0,335	-		-0,042	46,7	
19.05.13	Раст. у бер.	2,08	45,8	-	-	-	-	3	4	7	0,979	0,963	0,888	0,562	0,450	-		-0,059	43,1	
20.05.13		2,00	44,3	-	-	-	-	4	3	7	0,963	0,979	0,888	0,450	0,562	-		-0,075	41,0	
21.05.13		1,96	43,7	-	-	-	-	5	2	7	0,942	0,991	0,888	0,335	0,673	-		-0,092	39,7	
22.05.13		1,93	43,2	-	-	-	-	6	1	7	0,917	0,998	0,888	0,218	0,780	-		-0,108	38,5	
23.05.13		1,89	42,7	1,90	36,8	42,8	-0,140	4	22	26	0,963	0,069	0,000	0,228	0,756	0,013		-0,109	38,0	
...
Период спада водной растительности																				
15.08.13	Раст.	2,09	46,0	2,09	20,7	46,0	-0,550	20	14	34	0,204	0,577	0,000	0,009	0,954	0,026		-0,549	20,7	
16.08.13	по сеч.	2,09	46,0	-	-	-	-	1	13	14	0,999	0,758	0,722	0,843	0,141	-		-0,548	20,8	
...
25.08.13		1,89	42,7	-	-	-	-	10	4	14	0,855	0,976	0,722	0,335	0,690	-		-0,538	19,7	
26.08.13		1,89	42,7	-	-	-	-	11	3	14	0,825	0,987	0,722	0,271	0,743	-		-0,537	19,7	
27.08.13	Раст. по сеч	1,88	42,5	-	-	-	-	12	2	14	0,793	0,994	0,722	0,206	0,794	-		-0,536	19,7	
28.08.13		1,87	42,4	-	-	-	-	13	1	14	0,758	0,999	0,722	0,141	0,843	-		-0,535	19,7	
29.08.13		1,85	42,2	1,85	19,7	42,2	-0,533	14	15	29	0,722	0,683	0,000	0,319	0,530	0,302		-0,509	20,7	
30.08.13		1,85	42,2	-	-	-	-	1	14	15	0,999	0,722	0,683	0,856	0,129	-		-0,517	20,4	
31.08.13		1,87	42,4	-	-	-	-	2	13	15	0,994	0,758	0,683	0,811	0,192	-		-0,511	20,7	
01.09.13	Раст.	1,88	42,5	-	-	-	-	3	12	15	0,987	0,793	0,683	0,764	0,255	-		-0,505	21,1	
02.09.13	стел.	1,85	42,2	-	-	-	-	4	11	15	0,976	0,825	0,683	0,714	0,317	-		-0,499	21,1	
...
09.09.13		2,04	45,0	-	-	-	-	11	4	15	0,825	0,976	0,683	0,317	0,714	-		-0,454	24,6	
10.09.13	Раст. стел.	1,93	43,2	-	-	-	-	12	3	15	0,793	0,987	0,683	0,255	0,764	-		-0,448	23,9	
11.09.13		1,90	42,8	-	-	-	-	13	2	15	0,758	0,994	0,683	0,192	0,811	-		-0,442	23,9	
12.09.13	по дну	1,88	42,5	-	-	-	-	14	1	15	0,722	0,999	0,683	0,129	0,856	-		-0,435	24,0	
13.09.13		1,87	42,4	1,87	24,6	42,4	-0,420	15	13	28	0,683	0,758	0,042	0,323	0,475	0,362		-0,409	25,1	

Н.3 Сравнение результатов использования интерполяционно-гидравлической модели и метода оптимальной интерполяции для расчета ЕРВ в период зарастания русла

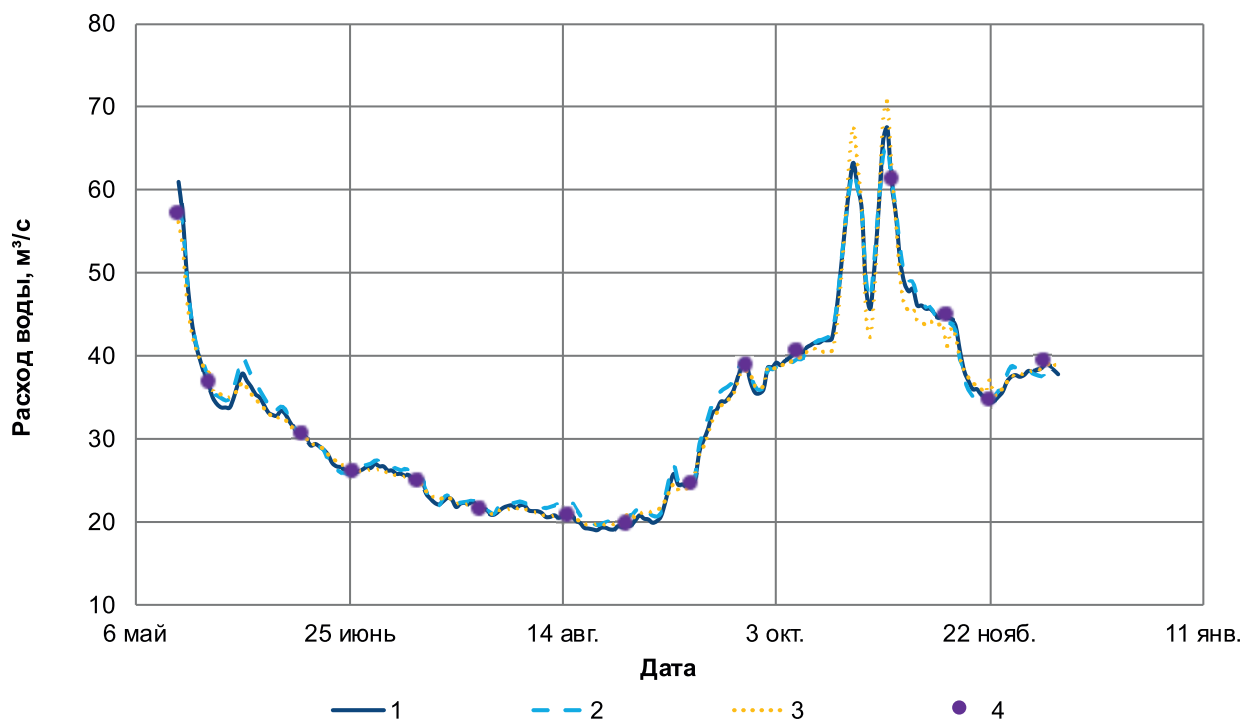
Н.3.1 Оценка эффективности алгоритмов, изложенных в Н.1 и Н.2, была выполнена на основе сравнения вычисленных ЕРВ с ИРВ. Результаты оценки эффективности методик представлены в таблице Н.5.

Т а б л и ц а Н.5 – Сравнение погрешностей определения ЕРВ за период зарастания русла с использованием двух алгоритмов

Метод	Случайная средняя погрешность	Систематическая средняя погрешность, %	Число суток, когда систематическая погрешность превысила 10 %
Интерполяционно-гидравлическая модель	2,9	0,8	0
Метод оптимальной интерполяции	2,7	-0,2	0

Н.3.2 Как видно из таблицы Н.5, высокая эффективность обеих методик позволяет использовать их для расчета ЕРВ периода зарастания.

Н.3.3 На рисунке Н.6 представлены гидрографы, построенные по данным ЕРВ из ЕДС и вычисленных с использованием алгоритмов, изложенных в Н.1 и Н.2.



1 – ЕРВ по данным ЕДС; 2 – ЕРВ, вычисленные на основе интерполяционно-гидравлической модели
3 – ЕРВ, вычисленные на основе метода оптимальной интерполяции; 4 – ИРВ

Рисунок Н.6 – Гидрограф периода зарастания (16 мая – 8 декабря) 2013 года, ГП р. Воронеж – г. Липецк

Приложение П

(обязательное)

Пример расчета ежедневных расходов воды за весь год при различных условиях протекания потока

П.1 Рассмотрим расчет ЕРВ за 2016 год р. Урал в гидростворе ГП г. Оренбург.

П.1.1 В зимний период на р. Урал в гидростворе ГП г. Оренбург наблюдается устойчивый ледостав, в отдельные годы наблюдается образование полыней, подледной шуги и зажоров.

П.1.2 На гидрологический режим р. Урал на участке ГП г. Оренбург оказывают влияние попуски из Ириклинского водохранилища с Ириклинской ГЭС, расположенной на р. Урал в 515 км выше ГП. На уровенный режим на участке поста оказывает влияние переменный подпор от половодья на р. Сакмаре, впадающей в р. Урал в 8,8 км ниже ГП г. Оренбург. Совокупное влияние этих факторов приводит к образованию петлеобразной связи расходов и уровней воды.

П.1.3 В период с июня до появления первых ледяных образований на участке поста у берега наблюдается водная растительность.

П.2 На рисунке П.1 показана КР 2016 года р. Урал в гидростворе ГП г. Оренбург.

П.2.1 Как видно из рисунка П.1, в период свободного русла связь $Q(H)$ принимает петлеобразную форму, что свидетельствует о неустановившемся движении потока в период половодья и/или наличии переменного подпора от р. Сакмара.

П.2.2 Опорная КР при наличии петлеобразной связи $Q(H)$ должна проходить примерно посередине между ветвями подъема и спада половодья. Наиболее оптимальная аппроксимация зависимости расходов от уровней воды за период свободного русла для диапазона уровней воды от 2,69 до 6,97 м была получена методом полиномиальной регрессии с ограничением в точке $H_{\text{низш}} = 1,50$ м, $Q(H_{\text{низш}}) = 30,0$ м³/с. Ограничения были назначены из соображений, что точки ИРВ периодов зарастания и ледовых явлений должны находиться слева от КР. Выбранное УР имеет вид

$$Q(H) = -34,32 + 31,221 \cdot H + 7,7722 \cdot H^2, \quad (\text{П.1})$$

Характеристики оценки точности аппроксимации зависимости $Q(H)$ уравнением (П.1):

- коэффициент корреляции $R = 0,547$;

- СКО относительных остатков регрессии $\sigma_{\bar{q}} = 18,9$ %;

- значение математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\bar{q}} = 0,05$ %.

Задание ограничений позволяет осуществлять расчет расходов по уравнению (П.1) для уровней воды ниже 2,69 м.

Наивысший уровень воды за 2016 года составил 7,12 м. В диапазоне уровней от 6,98 до 7,12 м была выполнена экстраполяция КР по методике, изложенной в 5.6.6. Уравнение КР для диапазона экстраполяции имеет вид

$$Q(H) = -10014,5 + 2869,5 \cdot H - 194 \cdot H^2. \quad (\text{П.2})$$

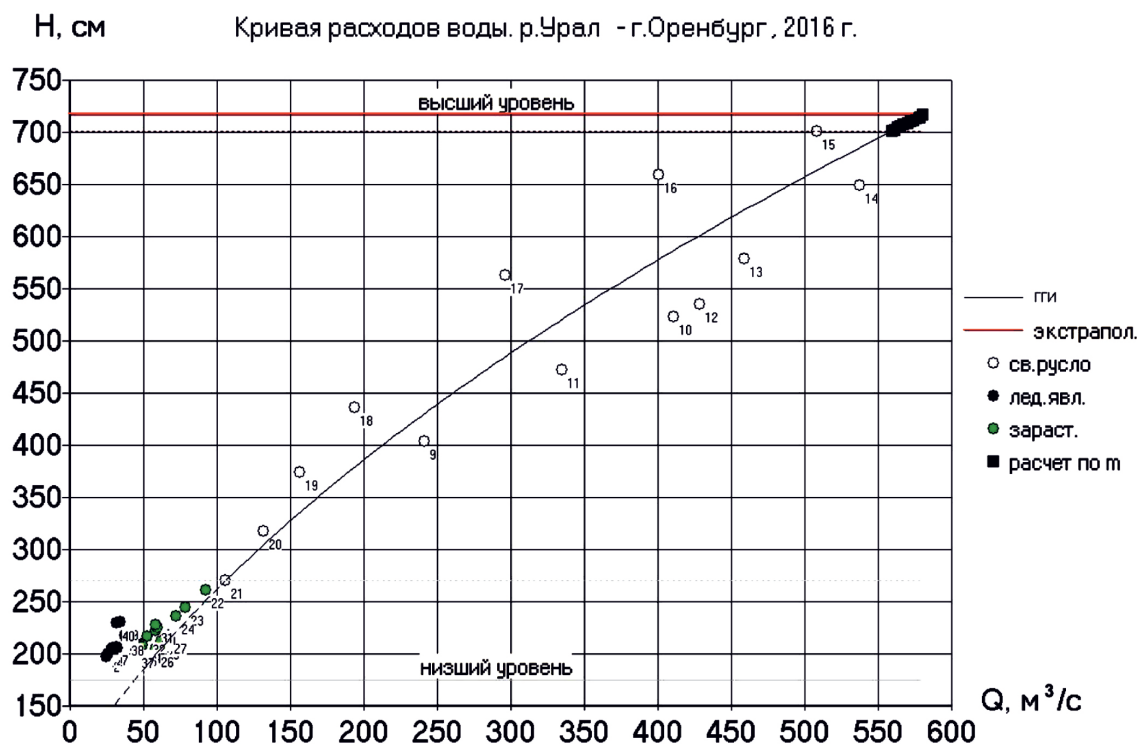


Рисунок П.1 – Годовая зависимость расходов от уровней воды, ГП р. Урал – г. Оренбург, 2016 год

П.3 На рисунке П.2 показан совмещенный хронологический график ежедневных уровней воды $H(t)$ и относительных отклонений $\bar{q}(t)$ с нанесенными сведениями о ледяных образованиях и водной растительности. На основе анализа графика принимается решение о разбиении года на периоды в зависимости от принимаемого метода расчета ЕРВ.

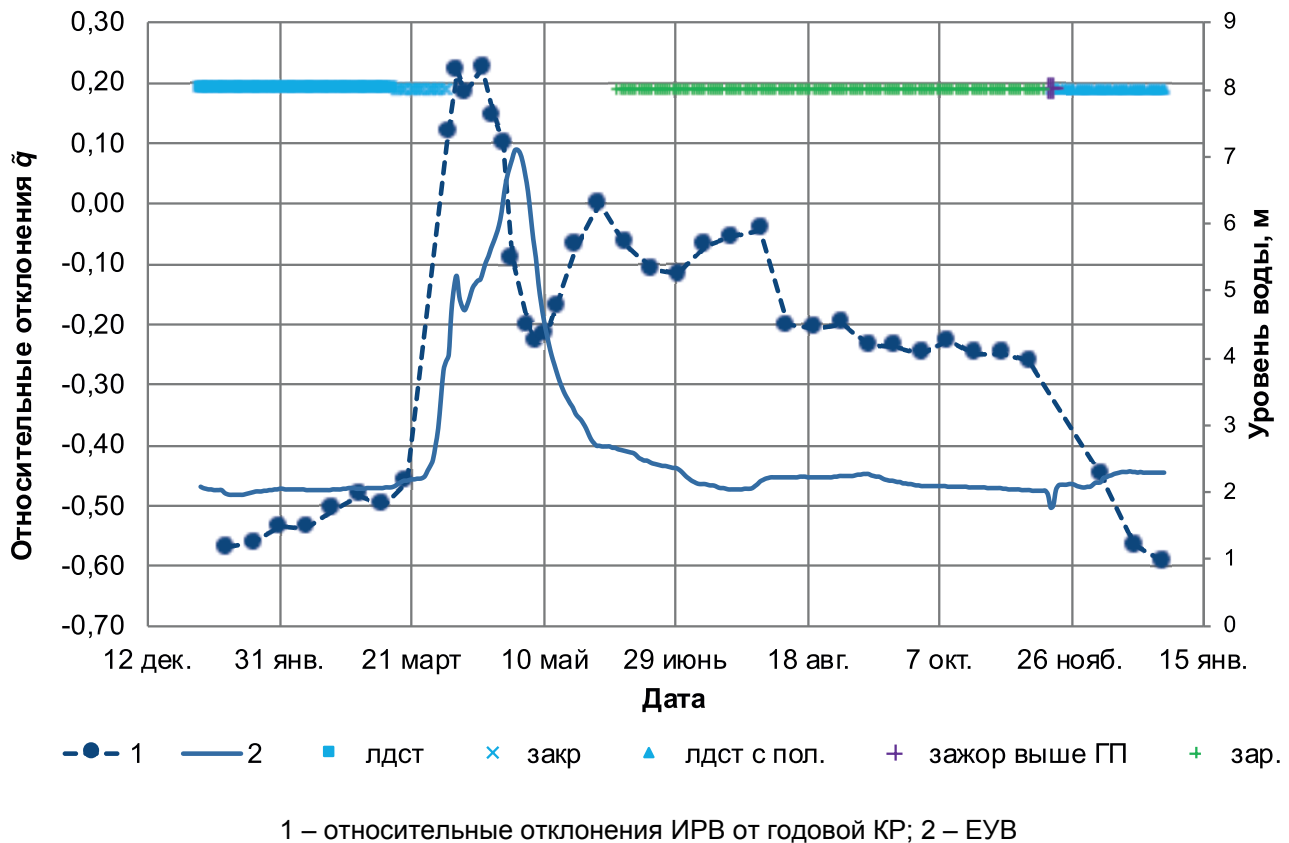


Рисунок П.2 – Совмещенный график хода относительных отклонений, ежедневных уровней воды и состояний водного объекта, ГП р. Урал – г. Оренбург, 2016 год

П.4 Для расчета ЕРВ год разбивается на следующие периоды:

1 (с 01.01 по 19.03) – ледостав, расчет ЕРВ с учетом относительных отклонений \tilde{q}_t , определяемых методом линейной интерполяции элементов относительных отклонений предварительно выравненного временного ряда $\tilde{q}^{\wedge}(t)$;

2 (с 20.03 по 3.04) – закраины, расчет ЕРВ с учетом относительных отклонений \tilde{q}_t , определяемых на основе средних суточных температур воздуха;

3 (с 04.04 по 30.05) – неустановившееся движение/переменный подпор, расчет ЕРВ с учетом отклонений \tilde{q}_t , определяемых методом оптимальной интерполяции;

4 (с 31.05 по 06.06) – расчет по УР;

5 (с 07.06 по 15.11) – зарастание русла, расчет ЕРВ с учетом отклонений \tilde{q}_t , определяемых методом оптимальной интерполяции;

6 (с 16.11 по 07.12) – шугоход, ледостав с полыньями, расчет ЕРВ с учетом относительных отклонений \tilde{q}_t , определяемых на основе средних суточных температур воздуха;

7 (с 08.12 по 31.12) – ледостав, расчет ЕРВ с учетом относительных отклонений \tilde{q}_t , определяемых методом линейной интерполяции элементов относительных отклонений предварительно выравненного временного ряда $\tilde{q}^{\wedge}(t)$.

П.5 В таблице П.1 приведены ИРВ р. Урал в гидростворе ГП г. Оренбург за 2016 год.

Т а б л и ц а П.1 – ИРВ, ГП р. Урал – г. Оренбург, 2016 год

№ ИРВ	Дата ИРВ	СВО	$H_{и, см}$	$H_{и, м}$	$Q_{и, м^3/с}$	$Q_{УР, м^3/с}$	$\bar{q}_{и}$	$\tau, сут$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Период ледовых явлений								
1	11.01.16	Ледостав, подо льдом шуга	197	1,97	24,7	57,3	-0,569	-
2	21.01.16		200	2,00	25,9	59,2	-0,563	-
3	31.01.16		205	2,05	28,9	62,3	-0,536	-
4	10.02.16		203	2,03	28,2	61,1	-0,538	-
5	20.02.16	Ледостав	204	2,04	30,4	61,7	-0,507	-
6	01.03.16		205	2,05	32,2	62,3	-0,484	-
7	10.03.16		206	2,06	31,5	63,0	-0,500	-
8	19.03.16	Закраины	217	2,17	37,7	70,0	-0,462	-
Период половодья, неустановившееся движение, переменный подпор								
9	04.04.16	Свободное русло	402	4,02	242	217	0,116	-
10	07.04.16		520	5,20	412	338	0,218	3
11	10.04.16		470	4,70	336	284	0,183	3
12	17.04.16		532	5,32	430	352	0,222	7
13	21.04.16		575	5,75	460	402	0,144	4
14	25.04.16		645	6,45	539	490	0,099	4
15	28.04.16		697	6,97	510	561	-0,091	3
16	04.05.16		655	6,55	402	504	-0,202	6
17	07.05.16		560	5,60	297	384	-0,227	3
18	11.05.16		434	4,34	194	248	-0,216	4
19	15.05.16		372	3,72	157	189	-0,171	4
20	22.05.16		316	3,16	132	142	-0,070	7
Сумма квадратов							0,356	-
Среднее								4
Однозначная КР								
21	31.05.16	Свободное русло	269	2,69	106	106	0,001	-
Период зарастания								
22	10.06.16	Растительность у берега	260	2,60	92,8	99,4	-0,066	-
23	20.06.16		244	2,44	78,5	88,1	-0,109	10
24	30.06.16		235	2,35	72,3	82,0	-0,118	10
25	10.07.16		212	2,12	62,1	66,8	-0,070	10
26	20.07.16		204	2,04	58,2	61,7	-0,057	10
27	31.07.16		217	2,17	67,0	70,0	-0,043	11
28	10.08.16		222	2,22	58,6	73,3	-0,200	10
29	20.08.16		222	2,22	58,1	73,3	-0,207	10
30	31.08.16		224	2,24	59,8	74,6	-0,199	11
31	10.09.16		227	2,27	58,6	76,6	-0,235	10
32	20.09.16		216	2,16	52,9	69,4	-0,238	10
33	30.09.16		209	2,09	48,7	64,9	-0,249	10
34	10.10.16		208	2,08	49,6	64,2	-0,228	10
35	20.10.16		Растительность легла на дно	207	2,07	47,8	63,6	-0,249
36	31.10.16	205		2,05	46,8	62,3	-0,249	11
37	10.11.16	203		2,03	45,1	61,1	-0,262	10
Сумма квадратов							0,581	-
Среднее								10
Период ледовых явлений								
38	07.12.16	Ледостав, подо льдом шуга	215	2,15	37,9	68,7	-0,449	-
39	20.12.16		230	2,30	34,1	78,6	-0,566	-
40	31.12.16		229	2,29	31,6	77,9	-0,595	-

П.6 Рассмотрим алгоритмы расчета ЕРВ для каждого периода. Расчет ЕРВ за зимне-весенний период представлен в таблице П.4, за весенний период – в таблице П.5, за период зарастания – в таблице П.6, за осенне-зимний период – в таблице П.7.

П.6.1 Для каждого среднего суточного уровня воды (графа 6 таблицы П.4, графы 3 таблиц П.5 и П.6, графа 7 таблицы П.7) в зависимости от того, в какой диапазон он попадает, вычисляются расходы воды УР (П.1) или (П.2) (графа 7 таблицы П.4, графы 4 таблиц П.5 и П.6, графа 8 таблицы П.7).

П.6.2 На даты ИРВ для каждого уровня воды при ИРВ (графа 8 таблицы П.4, графы 5 таблиц П.5 и П.6, графа 9 таблицы П.7) вычисляются расходы воды по УР (П.1) или (П.2) (графа 10 таблицы П.4, графы 7 таблиц П.5 и П.6, графа 11 таблицы П.7).

П.6.3 Для каждого ИРВ вычисляются относительные отклонения по формуле (5.2) (графа 11 таблицы П.4, графы 8 таблиц П.5 и П.6, графа 12 таблицы П.7).

П.6.4 Для расчета ЕРВ за период устойчивого ледостава с 01.01 по 19.03 воспользуемся методом линейной интерполяции элементов предварительно сглаженного временного ряда относительных отклонений, изложенным в 7.1.11.

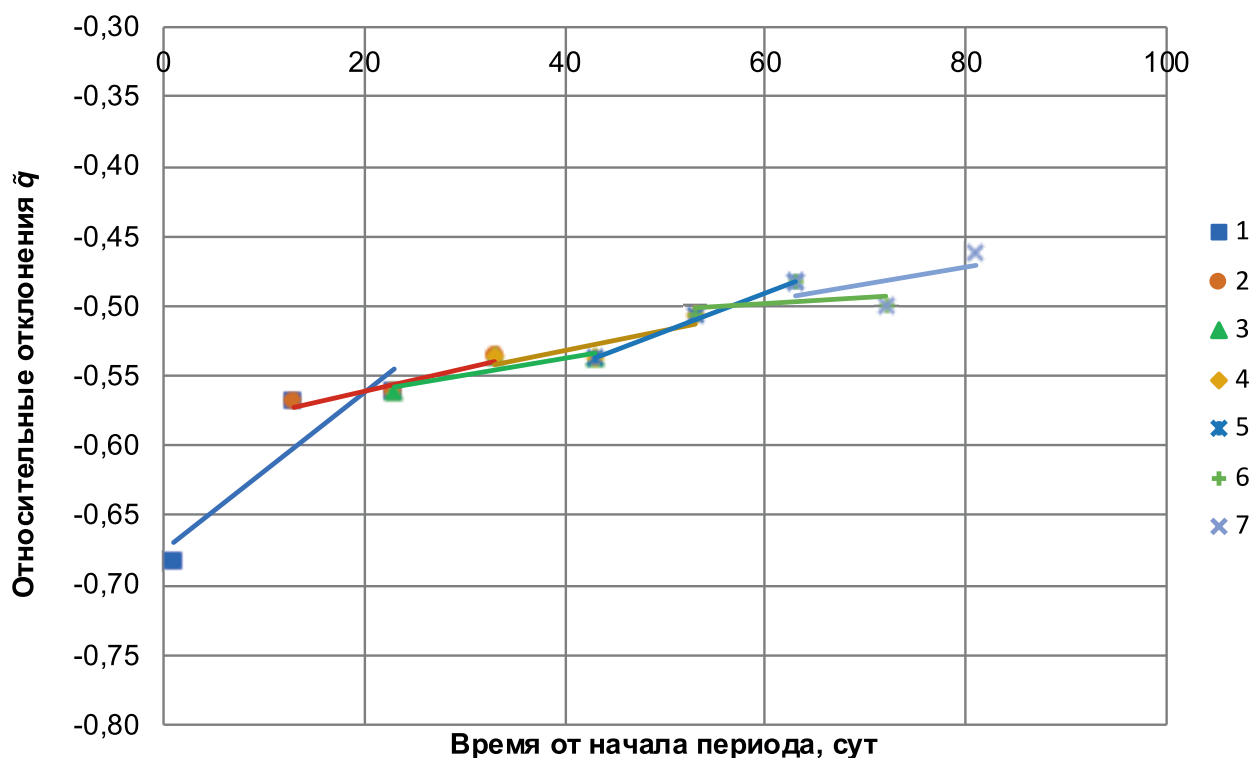
П.6.4.1 Сглаживание осуществляется уравнением регрессии относительных отклонений \tilde{q} по времени t . Для получения сглаженного значения относительного отклонения первого в году ИРВ привлекается последний ИРВ предыдущего года. В качестве t (графа 2 таблицы П.4) принимаются сутки от даты начала расчетного периода (30 декабря предыдущего года). Полином 1-й степени подбирается к группе из трех членов ряда $\tilde{q}(t)$ (первого, второго и третьего) и используется для определения сглаженного значения \tilde{q} в средней точке группы, соответствующей второму значению \tilde{q} . Затем полином того же порядка подбирается к группе из второго, третьего и четвертого элементов ряда и оценивается значение в точке, соответствующей третьему значению \tilde{q} и т.д.

П.6.4.2 На рисунке П.3 показаны прямые зависимости, построенные по данным каждой из групп трех смежных по времени ИРВ периода устойчивого ледостава (графы 2 и 11 таблицы П.4). Прямая зависимость, аппроксимирующая точки (1), построена по данным первой группы из трех ИРВ периода устойчивого ледостава (30 декабря 2015 года, 11 и 21 января 2016 года). Прямая зависимость, аппроксимирующая точки (2), построена по данным следующей группы из трех ИРВ (11, 21 и 31 января) и т.д. Последняя за период ледостава зависимость (7) построена по данным ИРВ 1, 10 и 19 марта.

П.6.4.3 Каждое из полученных в результате построения зависимостей на рисунке П.3 линейное уравнение используется для получения сглаженного ряда относительных отклонений $\tilde{q}^{\wedge}(t)$. Например, уравнение, полученное по данным первых трех ИРВ, имеет вид

$$\tilde{q}_t = -0,675 + 0.0057 \cdot t. \quad (\text{П.3})$$

П.6.4.4 После получения сглаженного ряда $\tilde{q}^{\wedge}(t)$ осуществляется простая линейная интерполяция между членами ряда (графа 12 таблицы П.4).



- 1 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 30 декабря 2015 г., 11 и 21 января;
 2 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 11, 21 и 31 января;
 3 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 21, 31 января и 10 февраля;
 4 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 31 января, 10 и 20 февраля;
 5 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 10, 20 февраля и 1 марта;
 6 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 20 февраля, 1 и 10 марта;
 7 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 1, 10 и 19 марта

Рисунок П.3 – Линейное сглаживание трех элементов ряда относительных отклонений \bar{q} по времени за зимне-весенний период 2016 года

П.6.5 Для расчета ЕРВ за период таяния льда с 20.03 по 03.04 привлекаются данные о положительных средних суточных температурах воздуха (7.6.1).

П.6.5.1 Устойчивый переход температуры воздуха через 0 °С произошел 26 марта (графа 4 таблицы П.4). Производится последовательное суммирование положительных температур воздуха (графа 5 таблицы П.4).

П.6.5.2 Для построения линейной зависимости вида (7.25) используются значения относительных отклонений последнего расхода, измеренного при наличии ледовых явлений (19 марта) и первого расхода, измеренного при свободном русле (4 апреля) (графа 11 таблицы П.4). Сумма положительных температур воздуха на дату 19 марта принимается равной 0 °С, а на дату 04 апреля она оказалась равной 20,7 °С. Полученная зависимость представлена на рисунке П.4.

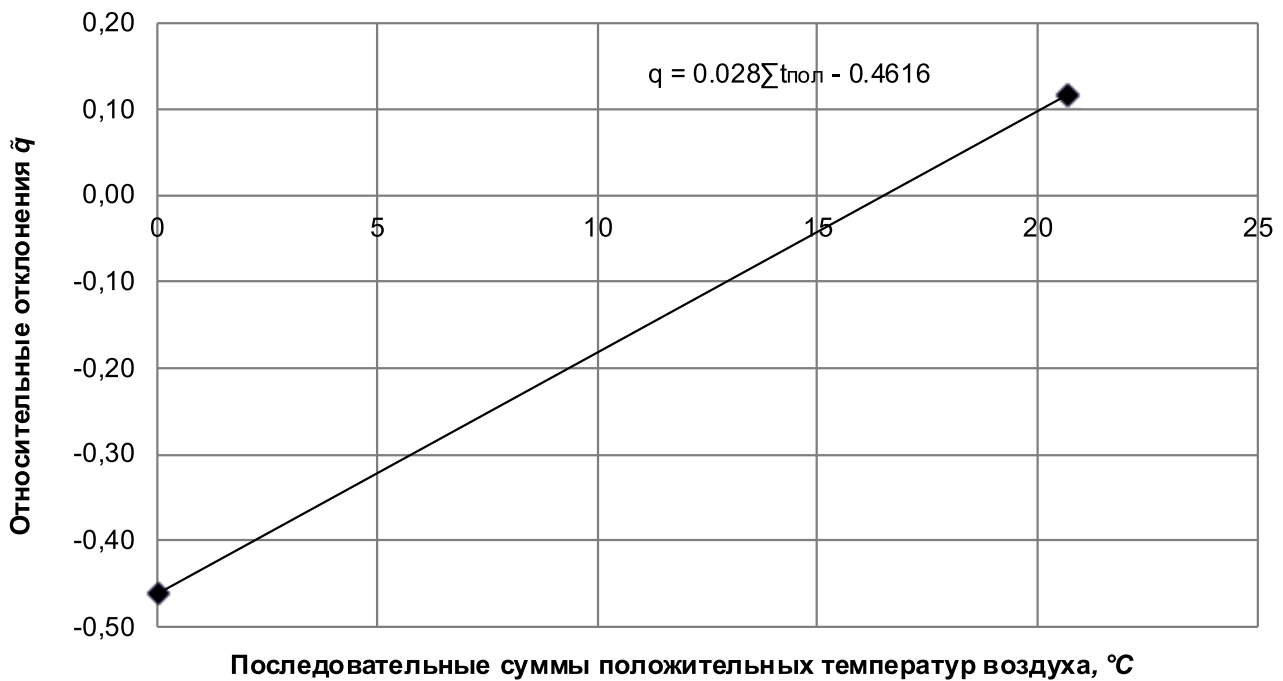


Рисунок П.4 – Зависимость относительных отклонений \bar{q} от нарастающих сумм положительных температур воздуха за весенний период 2016 года

П.6.5.3 В результате построения получаем линейную зависимость в виде уравнения

$$\bar{q}_t = 0,028 \cdot \sum t_{\text{пол}} - 0,4616. \quad (\text{П.4})$$

Уравнение (П.4) используется для расчета поправок \bar{q}_t в за период с 20 марта по 03 апреля (графа 12 таблицы П.4).

П.6.6 Для расчета ЕРВ за период неустановившегося движения/переменного подпора (с 04.04 по 30.05) применяется метод оптимальной интерполяции, изложенный в 7.1.

П.6.6.1 Для использования метода оптимальной интерполяции необходимо определить меру погрешности измерения расходов за период неустановившегося движения потока по формуле (7.3). Количество ИРВ за период половодья составило 12 (таблица П.1). Вычисляем значение дисперсии случайного процесса относительных отклонений \bar{q} :

$$\sigma_{\bar{q}}^2 = \frac{\sum_1^n \bar{q}_t^2}{n - k} = \frac{0,356}{12 - 3} = 0,040. \quad (\text{П.5})$$

Погрешность ИРВ примем равной 6 %. Мера погрешности равна

$$\eta = \frac{0,06^2}{0,040 - 0,06^2} = 0,10. \quad (\text{П.6})$$

П.6.6.2 Далее необходимо определить средний интервал между ИПВ за период половодья (графа 9 таблицы П.1). В нашем случае $\tau_{\text{ср}} = 4$ сут.

П.6.6.3 Продолжительность половодья составила 57 сут. Теоретическая автокорреляционная функция (7.2) принимает вид

$$r = \cos(2\pi\tau/57). \quad (\text{П.7})$$

П.6.6.4 Значения коэффициентов r эмпирической и теоретической АКФ для соответствующих интервалов τ представлены в таблице П.2. В графическом виде АКФ представлены на рисунке П.5.

Т а б л и ц а П.2 – АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\bar{q}(t)$ за период половодья

τ , сут	Эмпирическая АКФ	Теоретическая АКФ
1	2	3
0	1,000	1,000
4	0,858	0,904
8	0,571	0,636
12	0,207	0,246

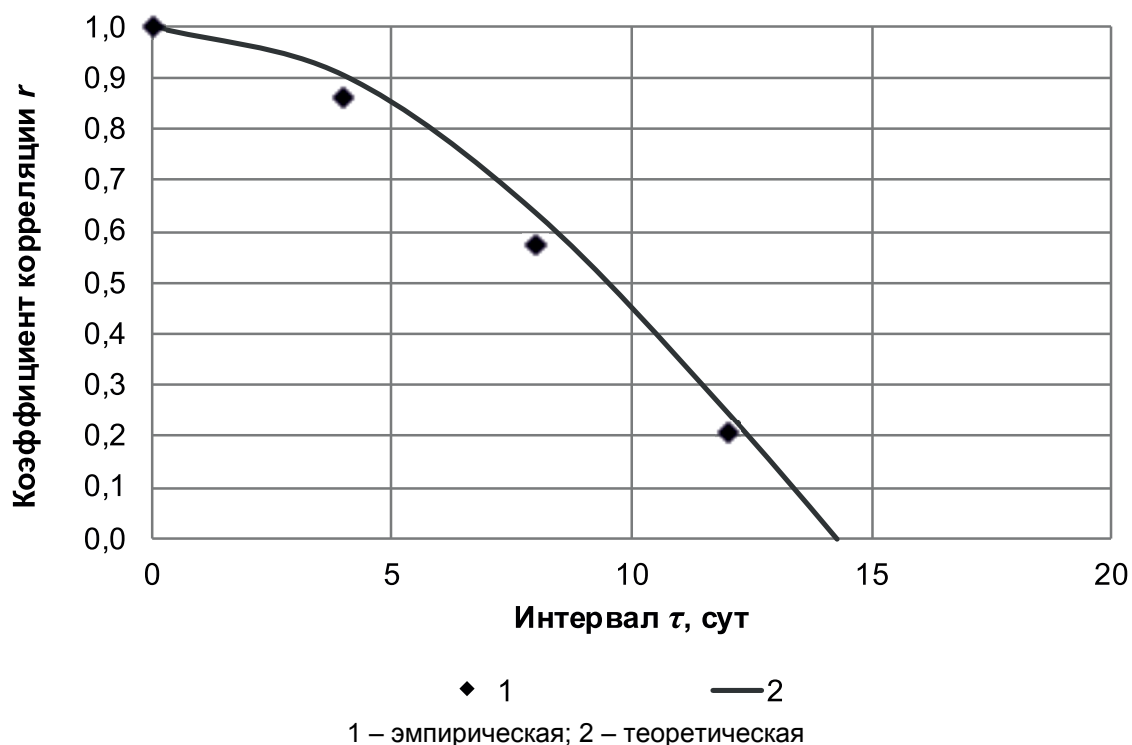


Рисунок П.5 – АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\bar{q}(t)$ за период половодья

Из рисунка П.5 видно, что теоретическая АКФ достаточно близко аппроксимирует эмпирические точки, следовательно, для расчета ЕРВ р. Урал за период половодья 2016 года можно применить метод оптимальной интерполяции.

П.6.6.5 В соответствии со схемой индексных обозначений (см. рисунок 7.3) определяются интервалы τ_{01} , τ_{02} и τ_{12} (соответственно графы 9, 10 и 11 таблицы П.5).

П.6.6.6 По формуле (П.7) вычисляются значения $r(\tau_{01})$, $r(\tau_{02})$ и $r(\tau_{12})$ для соответствующих интервалов (соответственно графы 12, 13 и 14 таблицы П.5).

П.6.6.7 Вычисляются значения весовых коэффициентов:

- на даты ИРВ по формулам (7.12), (7.13) и (7.14) (соответственно графы 15, 16 и 17 таблицы П.5);

- на даты между ИРВ по формулам (7.7) и (7.8) (графы 15 и 16 таблицы П.5).

П.6.6.8 Вычисляются сглаженные значения относительных отклонений на даты ИРВ по формуле (7.11) (графа 18 таблицы П.5).

П.6.6.9 Вычисляются интерполированные значения относительных отклонений на даты между ИРВ по формуле (7.9) (графа 18 таблицы П.5).

П.6.7 За период свободного русла после спада половодья и до начала зарастания (31.05 – 06.06) расчет ЕРВ осуществляется непосредственно по УР (П.1).

П.6.8 Для расчета ЕРВ за период зарастания русла (с 07.06 по 15.11), как и для периода половодья, применяется метод оптимальной интерполяции, изложенный в 7.1.

П.6.8.1 Для использования метода оптимальной интерполяции необходимо определить меру погрешности измерения расходов за период неустановившегося движения потока по формуле (7.3). Количество ИРВ за период зарастания русла составило 16 (таблица П.1). Вычисляем значение дисперсии случайного процесса относительных отклонений \tilde{q} :

$$\sigma_{\tilde{q}}^2 = \frac{\sum_1^n q_i^2}{n-k} = \frac{0,581}{16-3} = 0,045. \quad (\text{П.8})$$

Погрешность ИРВ примем равной 10 %. Мера погрешности равна

$$\eta = \frac{0,10^2}{0,045 - 0,10^2} = 0,29. \quad (\text{П.9})$$

П.6.8.2 Далее необходимо определить средний интервал между ИРВ за период зарастания русла (графа 9 таблицы П.1). В нашем случае $\tau_{\text{ср}} = 10$ сут.

П.6.8.3 Длительность периода зарастания составила 162 сут. Теоретическая автокорреляционная функция (7.2) принимает вид

$$r = \cos(2\pi\tau/162) \quad (\text{П.10})$$

П.6.8.4 Значения коэффициентов r эмпирической и теоретической АКФ для соответствующих интервалов τ представлены в таблице П.3. В графическом виде АКФ представлены на рисунке П.6.

Т а б л и ц а П.3 – АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ за период зарастания русла

τ , сут	Эмпирическая АКФ	Теоретическая АКФ
1	2	3
0	1,000	1,000
10	0,739	0,926
20	0,549	0,714
30	0,410	0,397
40	0,273	0,020

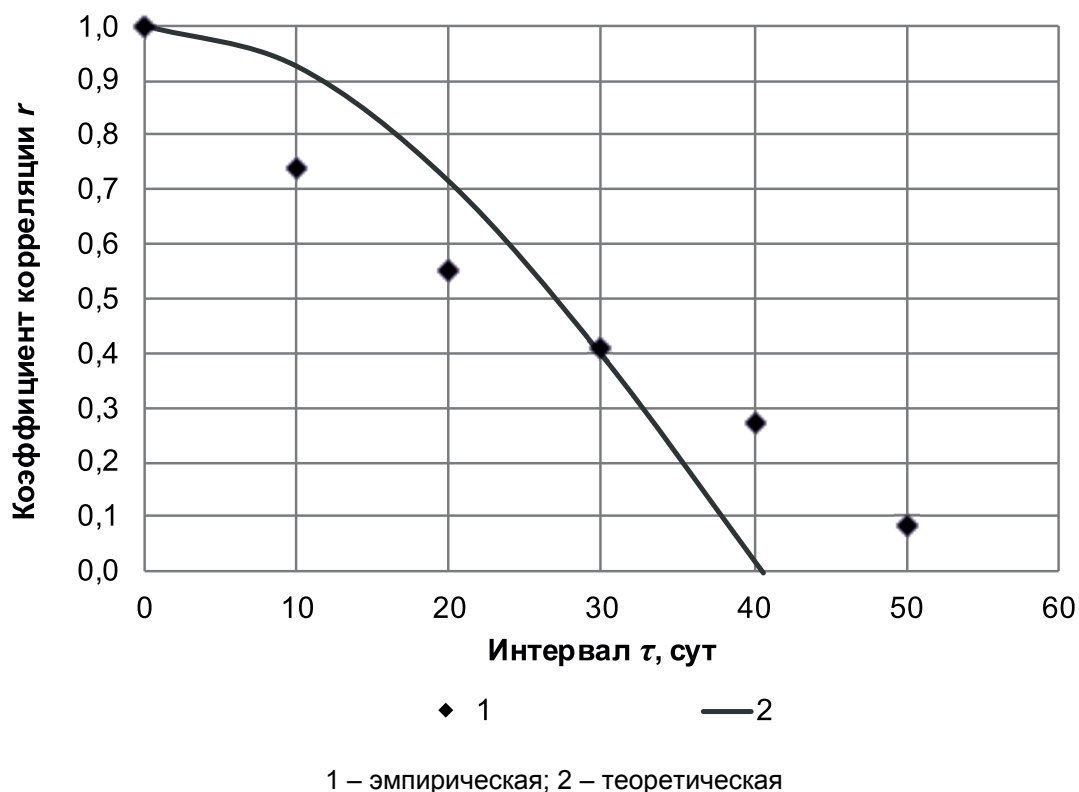


Рисунок П.6 – АКФ случайного временного процесса относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ за период зарастания русла

Из рисунка П.6 видно, что теоретическая АКФ достаточно близко аппроксимирует эмпирические точки, следовательно, для расчета ЕРВ р. Урал за период зарастания русла 2016 года можно применить метод оптимальной интерполяции.

П.6.8.5 В соответствии со схемой индексных обозначений (см. рисунок 7.3) определяются интервалы τ_{01} , τ_{02} и τ_{12} (соответственно графы 9, 10 и 11 таблицы П.6).

П.6.8.6 По формуле (П.10) вычисляются значения $r(\tau_{01})$, $r(\tau_{02})$ и $r(\tau_{12})$ для

соответствующих интервалов (соответственно графы 12, 13 и 14 таблицы П.6).

П.6.8.7 Вычисляются значения весовых коэффициентов:

- на даты ИРВ по формулам (7.12), (7.13) и (7.14) (соответственно графы 15, 16 и 17 таблицы П.6);

- на даты между ИРВ по формулам (7.7) и (7.8) (графы 15 и 16 таблицы П.6).

П.6.8.8 Вычисляются сглаженные значения относительных отклонений на даты ИРВ по формуле (7.11) (графа 18 таблицы П.6).

П.6.8.9 Вычисляются интерполированные значения относительных отклонений на даты между ИРВ по формуле (7.9) (графа 18 таблицы П.6).

П.6.9 Для расчета ЕРВ за период ледообразования с 16.11 по 07.12 привлекаются данные об отрицательных средних суточных температурах воздуха (7.6.1).

П.6.9.1 Устойчивый переход температуры воздуха через 0° произошел 13 ноября (графа 4 таблицы П.7). Производится последовательное суммирование отрицательных температур воздуха (графа 5 таблицы П.7) и расчет квадратных корней их модулей (графа 6 таблицы П.7).

П.6.9.2 Для построения линейной зависимости вида (7.24) используются значения относительных отклонений последнего расхода, измеренного до появления ледовых явлений (10 ноября) и первого расхода, измеренного при устойчивом ледоставе (07 декабря) (графа 12 таблицы П.7). Значение квадратного корня из модуля суммы отрицательных температур воздуха на дату 10 ноября принимается равным 0, а на дату 07 декабря оно оказалось равным 14,3. Полученная зависимость представлена на рисунке П.7.



Рисунок П.7 – Зависимость относительных отклонений \bar{q} от корня квадратного из модуля нарастающей суммы отрицательной температуры воздуха за осенне-зимний период 2016 года

П.6.9.3 В результате построения получаем линейную зависимость в виде уравнения

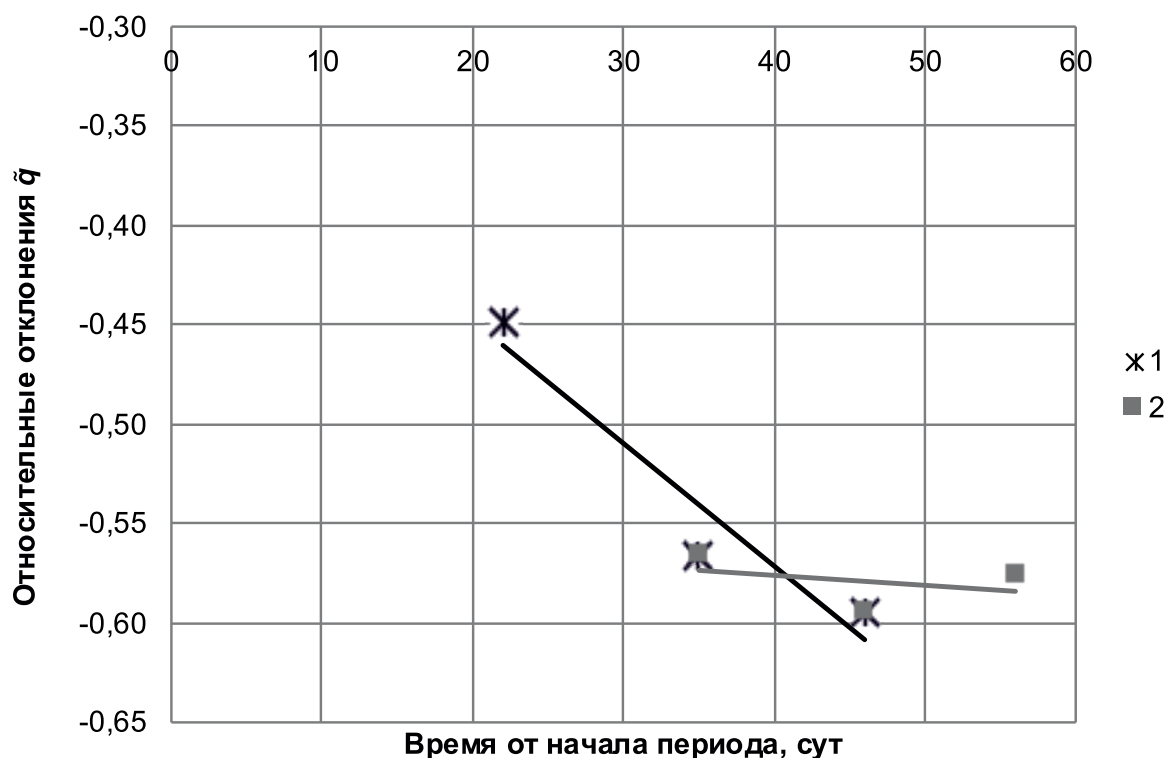
$$\tilde{q}_t = -0,013 \cdot \sqrt{|\sum t_{\text{отр}}|} - 0,2617. \quad (\text{П.11})$$

Уравнение (П.11) используется для расчета поправок \tilde{q}_t за период с 16 ноября по 06 декабря (графа 13 таблицы П.7).

П.6.10 Расчет ЕРВ за период устойчивого ледостава с 07.12 по 31.12 осуществляется аналогично методике, изложенной в П.6.4

П.6.10.1 Для получения сглаженного значения относительного отклонения последнего в году ИРВ привлекается первый ИРВ следующего года. В качестве t (графа 2 таблицы П.4) принимаются сутки от даты начала периода ледовых явлений (16 ноября).

П.6.10.2 На рисунке П.8 показаны прямые зависимости, построенные по данным каждой из групп трех смежных по времени ИРВ периода устойчивого ледостава (графы 2 и 12 таблицы П.7).



1 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 7, 20 и 31 декабря 2016 года;
2 – линейное сглаживание относительных отклонений ИРВ 20, 31 декабря 2016 года
и 10 января 2017 года

Рисунок П.8 – Линейное сглаживание трех элементов ряда относительных отклонений \tilde{q} по времени за зимний период 2016 года

П.6.10.3 Каждое из полученных в результате построения зависимостей на рисунке П.8 линейное уравнение используется для получения сглаженного ряда относительных

отклонений $\tilde{q}^{\wedge}(t)$. Например, уравнение, полученное по данным ИРВ 07, 20 и 31 декабря, имеет вид

$$\tilde{q}_t = -0,3246 - 0,0062 \cdot t. \quad (\text{П.12})$$

П.6.10.4 После получения сглаженного ряда $\tilde{q}^{\wedge}(t)$ осуществляется простая линейная интерполяция между членами ряда (графа 13 таблицы П.7).

П.6.11 После вычисления поправок \tilde{q}_t на каждые сутки всех периодов вычисляются значения ЕРВ по формуле (5.1) (графа 13 таблицы П.4, графы 19 таблиц П.5 и П.6, графа 14 таблицы П.7).

П.7 Рассмотрим несколько примеров.

П.7.1 Расчет ЕРВ на дату 15 января. Дата соответствует периоду устойчивого ледостава, следовательно, расчет производится по алгоритму, изложенному в П.6.4.

Расчетная дата находится между датами ИРВ 11 и 21 января.

Сглаживание значения \tilde{q} на 11 января осуществляется по зависимости (П.3) (графа 12 таблицы П.4)

$$\tilde{q}_{11.01} = -0,675 + 0,0057 \cdot 13 = -0,601. \quad (\text{П.13})$$

Сглаживание значения \tilde{q} на 21 января осуществляется по аналогичной зависимости (графа 12 таблицы П.4)

$$\tilde{q}_{21.01} = -0,5939 + 0,0016 \cdot 23 = -0,557. \quad (\text{П.14})$$

Вычисляем интерполированное значение \tilde{q}_t на расчетную дату (15 января) (графа 12 таблицы П.4)

$$\tilde{q}_{15.01} = -0,588 + \frac{(-0,557 - (-0,601))}{(23 - 13)} = -0,583. \quad (\text{П.15})$$

Вычисляем расход воды на дату 15 января (графа 13 таблицы П.4)

$$Q_{15.01} = 56,7 \cdot (1 - 0,583) = 23,6 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.16})$$

П.7.2 Расчет ЕРВ на дату 30 марта. Дата соответствует периоду весеннего таяния, следовательно, расчет производится по алгоритму, изложенному в П.6.5.

Значение нарастающей суммы положительных температур воздуха на дату 30 марта составило 8,4 (графа 5 таблицы П.4). Вычисляем значение относительного отклонения по формуле (П.4) (графа 12 таблицы П.4)

$$\bar{q}_{30.03} = 0,028 \cdot 8,4 - 0,4616 = -0,226. \quad (\text{П.17})$$

Вычисляем расход воды на дату 30 марта (графа 13 таблицы П.4)

$$Q_{30.03} = 107 \cdot (1 - 0,226) = 82,5 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.18})$$

П.7.3 Расчет ЕРВ на дату 07 апреля. Дата соответствует периоду весеннего половодья в условиях неустановившегося движения потока и переменного подпора, следовательно, расчет производится по алгоритму, изложенному в П.6.6 (то же в П.7.4 – П.7.6).

Значение среднего суточного уровня воды (5,22 м) (графа 3 таблицы П.5) попадает в диапазон, описываемый УР (П.1).

07 апреля производилось ИРВ. Предшествующее ИРВ – 04 апреля, последующее – 10 апреля. Значения интервалов составляют: до предшествующего ИРВ (04 апреля) $\tau_{01}=3$ сут, до последующего ИРВ (10 апреля) $\tau_{02}=3$ сут (графы 9 и 10 таблицы П.5). Значение интервалов между предшествующим и последующим измерениями составляет $\tau_{12}=6$ сут (графы 11 таблицы П.5). Значения АКФ для этих интервалов вычисляются по формуле (П.7) (графы 12, 13 и 14 таблицы П.5)

$$\begin{aligned} r(\tau_{01}) &= \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 3)/57) = 0,946, \\ r(\tau_{02}) &= \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 3)/57) = 0,946, \\ r(\tau_{12}) &= \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 6)/57) = 0,789. \end{aligned} \quad (\text{П.19})$$

Мера погрешности вычислена по формуле (П.6). Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.12), (7.13) и (7.14)) (графы 15, 16 и 17 таблицы П.5)

$$\rho_1 = \frac{(1+0,10)^2 \cdot 0,946 - (1+0,10) \cdot (0,789 \cdot 0,946 + 0,946) + 0,789 \cdot 0,946}{(1+0,10)^3 - (1+0,10) \cdot (0,789^2 + 0,946^2 + 0,946^2) + 2 \cdot 0,946 \cdot 0,789 \cdot 0,946} = 0,327, \quad (\text{П.20})$$

$$\rho_0 = \frac{(1+0,10)^2 - (1+0,10) \cdot (0,946^2 + 0,946^2) + 0,789 \cdot (0,946 \cdot 0,946 + 0,946 \cdot 0,985 - 0,946)}{(1+0,10)^3 - (1+0,10) \cdot (0,789^2 + 0,946^2 + 0,946^2) + 2 \cdot 0,946 \cdot 0,789 \cdot 0,946} = 0,346, \quad (\text{П.21})$$

$$\rho_2 = \frac{(1+0,10)^2 \cdot 0,946 - (1+0,10) \cdot (0,789 \cdot 0,946 + 0,946) + 0,789 \cdot 0,946}{(1+0,10)^3 - (1+0,10) \cdot (0,789^2 + 0,946^2 + 0,946^2) + 2 \cdot 0,946 \cdot 0,789 \cdot 0,946} = 0,327. \quad (\text{П.22})$$

Значение относительного отклонения на дату 07 апреля вычисляется на основе относительных отклонений трех ИРВ (4, 7 и 10 апреля) (графа 18 таблицы П.5)

$$\bar{q}_{07.04} = 0,327 \cdot 0,116 + 0,346 \cdot 0,218 + 0,327 \cdot 0,183 + (1 - 0,327 - 0,346 - 0,327) \cdot ((0,116 + 0,218 + 0,183) / 3) = 0,173. \quad (\text{П.23})$$

Вычисляется расход воды на дату 07 апреля (графа 19 таблицы П.5)

$$Q_{07.04} = 340 \cdot (1 + 0,173) = 399 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.24})$$

П.7.4 Расчет ЕРВ на дату 30 апреля. Значение среднего суточного уровня воды (7,10 м) (графа 3 таблицы П.5) попадает в диапазон, описываемый уравнением экстраполяции (П.2).

Дата находится между ИРВ 28 апреля и 04 мая, однако, поскольку происходит смена фаз водного режима с подъема половодья на его спад, для расчета ЕРВ можно использовать только одно значение ИРВ. 30 апреля наблюдается пик половодья, поэтому можно использовать либо предшествующее, либо последующее значение ИРВ. Будем использовать ближайшее – 28 апреля. Значение интервала до предшествующего ИРВ составляет $\tau_{01}=2$ сут (графа 9 таблицы П.5). Значение АКФ, вычисленное по формуле (П.7), составило 0,976 (графа 12 таблицы П.5). Вычисляется только один весовой коэффициент, т. к. используется только одно ИРВ (графа 15 таблицы П.5)

$$p_1 = \frac{0,976}{(1+0,10)} = 0,887. \quad (\text{П.25})$$

Значение относительного отклонения на дату 30 апреля вычисляется на основе относительного отклонения ИРВ 28 апреля (графа 18 таблицы П.5)

$$\bar{q}_{30.04} = 0,887 \cdot (-0,091) = -0,080. \quad (\text{П.26})$$

Вычисляется расход воды на дату 30 апреля (графа 19 таблицы П.5)

$$Q_{30.04} = 579 \cdot (1 - 0,080) = 533 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.27})$$

П.7.5 Расчет ЕРВ на дату 01 мая. Значение среднего суточного уровня воды (7,05 м) (графа 3 таблицы П.5) попадает в диапазон, описываемый уравнением экстраполяции (П.2).

Произошла смена фаз водного режима с подъема половодья на его спад, поэтому для расчета ЕРВ можно использовать только последующее значение ИРВ (04 мая). Значение интервала до последующего ИРВ составляет $\tau_{02}=3$ сут (графа 10 таблицы П.5). Значение АКФ, вычисленное по формуле (П.7), составило 0,946 (графа 13 таблицы П.5). Вычисляется только один весовой коэффициент, т. к. используется только одно ИРВ (графа 16 таблицы П.5)

$$p_2 = \frac{0,946}{(1+0,10)} = 0,860. \quad (\text{П.28})$$

Значение относительного отклонения на дату 01 мая вычисляется на основе относительного отклонения ИРВ 04 мая (графа 18 таблицы П.5)

$$\tilde{q}_{01.05} = 0,860 \cdot (-0,202) = -0,173. \quad (\text{П.29})$$

Вычисляется расход воды на дату 01 мая (графа 19 таблицы П.5)

$$Q_{01.05} = 573 \cdot (1 - 0,173) = 474 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.30})$$

П.7.6 Расчет ЕРВ на дату 22 мая. Значение среднего суточного уровня воды (3,17 м) (графа 3 таблицы П.5) попадает в диапазон, описываемый УР (П.1).

В этот день производилось последнее в расчетном периоде ИРВ. Предшествующее ИРВ производилось 15 мая, следовательно, для расчета можно используются два значения ИРВ (15 и 22 мая). Интервал $\tau_{01} = 7$ сут (графа 9 таблицы П.5), АКФ $r(\tau_{01})=0,717$ (графа 12 таблицы П.5) Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.12), (7.13) и (7.14)). Весовой коэффициент p_2 в данном случае равен 0 (графы 15, 16 и 17 таблицы П.5)

$$p_1 = \frac{(1+0,10)^2 \cdot 0,717 - (1+0,10) \cdot (0+0,717)+0}{(1+0,10)^2 - (1+0,10) \cdot (0+0,717^2)+0} = 0,103, \quad (\text{П.31})$$

$$p_0 = \frac{(1+0,10)^2 - (1+0,10) \cdot (0+0,717^2)+0}{(1+0,10)^2 - (1+0,10) \cdot (0+0,717^2)+0} = 0,842. \quad (\text{П.32})$$

Значение относительного отклонения на дату 22 мая вычисляется на основе относительных отклонений ИРВ 15 и 22 мая (графа 18 таблицы П.5)

$$\tilde{q}_{22.05} = 0,103 \cdot (-0,171) + 0,842 \cdot (-0,070) + (1-0,103-0,842) \cdot (((-0,171)+(-0,070))/2) = -0,083. \quad (\text{П.33})$$

Вычисляется расход воды на дату 22 мая (графа 19 таблицы П.5)

$$Q_{22.05} = 143 \cdot (1 + (-0,083)) = 131 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.34})$$

П.7.7 Расчет ЕРВ на дату 3 июня. Расчетная дата относится к периоду свободного русла после спада половодья и до начала зарастания, поэтому расчет производится непосредственно по УР (1) (графа 19 таблицы П.5)

$$Q_{03.06} = -34,32 + 31,221 \cdot 2,68 + 7,7722 \cdot 2,68^2 = 105 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.35})$$

П.7.8 Расчет ЕРВ на дату 10 июня. В этот день производилось первое ИРВ за период зарастания русла, следовательно, расчет производится по алгоритму, изложенному в П.6.8 (то же в П.7.9 и П.7.10).

Следующее ИРВ производилось 20 июня, а значит, для расчета можно использовать два значения ИРВ (10 и 20 июня). Интервал $\tau_{02} = 10$ сут (графа 10 таблицы П.6). Вычисляем значение АКФ по формуле (П.10) (графа 13 таблицы П.6)

$$r = \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 10)/162) = 0,926. \quad (\text{П.36})$$

Мера погрешности вычислена по формуле (П.9). Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.12), (7.13) и (7.14)). Весовой коэффициент p_1 в данном случае равен 0 (графы 15, 16 и 17 таблицы П.6)

$$p_0 = \frac{(1+0,29)^2 - (1+0,29) \cdot (0,926^2 + 0) + 0}{(1+0,29)^3 - (1+0,29) \cdot (0+0,926^2 + 0) + 0} = 0,537, \quad (\text{П.37})$$

$$p_2 = \frac{(1+0,29)^2 \cdot 0,926 - (1+0,29) \cdot (0 \cdot 0 + 0,926) + 0}{(1+0,29)^3 - (1+0,29) \cdot (0+0,926^2 + 0) + 0} = 0,333. \quad (\text{П.38})$$

Значение относительного отклонения на дату 10 июня вычисляется на основе относительных отклонений ИРВ 10 и 20 июня (графа 18 таблицы П.6)

$$\tilde{q}_{10.06} = 0,537 \cdot (-0,066) + 0,333 \cdot (-0,109) + (1 - 0,537 - 0,333) \cdot ((-0,066) + (-0,109)/2) = -0,083. \quad (\text{П.39})$$

Вычисляется расход воды на дату 10 июня (графа 19 таблицы П.6)

$$Q_{10.06} = 100 \cdot (1 - 0,083) = 91,8 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.40})$$

П.7.9 Расчет ЕРВ на дату 27 июня. Дата находится между ИРВ 20 и 30 июня. Значения интервалов составляют: до предшествующего ИРВ (20 июня) $\tau_{01}=7$ сут, до последующего ИРВ (30 июня) $\tau_{02}=3$ сут (графы 9 и 10 таблицы П.6). Значение интервалов между измерениями составляет $\tau_{12}=10$ сут (графа 11 таблицы П.6).

Значения АКФ для этих интервалов вычисляются по формуле (П.10) (графы 12, 13 и 14 таблицы П.6)

$$\begin{aligned} r(\tau_{01}) &= \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 7)/162) = 0,963, \\ r(\tau_{02}) &= \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 3)/162) = 0,993, \end{aligned} \quad (\text{П.41})$$

$$r(\tau_{12}) = \cos((2 \cdot 3,14 \cdot 10)/162) = 0,926.$$

Вычисляем весовые коэффициенты (формулы (7.7) и (7.8)) (графы 15 и 16 таблицы П.6)

$$p_1 = \frac{(1+0,29) \cdot 0,963 - 0,993 \cdot 0,926}{(1+0,29)^2 - 0,926^2} = 0,401, \quad (\text{П.42})$$

$$p_2 = \frac{(1+0,29) \cdot 0,993 - 0,963 \cdot 0,926}{(1+0,29)^2 - 0,926^2} = 0,483. \quad (\text{П.43})$$

Значение относительного отклонения на дату 27 июня вычисляется на основе относительных отклонений ИРВ 20 и 30 июня (графа 18 таблицы П.6)

$$\begin{aligned} \bar{q}_{27.06} = 0,401 \cdot (-0,109) + 0,483 \cdot (-0,118) + (1 - 0,401 - 0,483) \cdot (((-0,109) + (-0,118))/2) = \\ -0,114. \end{aligned} \quad (\text{П.44})$$

Вычисляется расход воды на дату 27 июня (графа 19 таблицы П.6)

$$Q_{27.06} = 83,3 \cdot (1 - 0,114) = 73,8 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.45})$$

П.7.10 Расчет ЕРВ на дату 12 ноября. Для расчета можно использовать только значение ИРВ, выполненного 10 ноября, т.к. следующее ИРВ производилось уже в период ледовых явлений. Интервал в этом случае $\tau_{01} = 2$ сут (графа 9 таблицы П.6), АКФ $r(\tau_{01})=0,997$ (графа 12 таблицы П.6).

Вычисляется только один весовой коэффициент, т.к. используется только одно ИРВ (графа 15 таблицы П.6)

$$p_1 = \frac{0,997}{(1+0,09)} = 0,917. \quad (\text{П.46})$$

Значение относительного отклонения на дату 12 ноября вычисляется на основе относительного отклонения ИРВ 10 ноября (графа 18 таблицы П.6)

$$\bar{q}_{12.11} = 0,917 \cdot (-0,262) = -0,240. \quad (\text{П.47})$$

Вычисляется расход воды на дату 12 ноября (графа 19 таблицы П.6)

$$Q_{12.11} = 60,5 \cdot (1 - 0,240) = 46,0 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.48})$$

П.7.11 Расчет ЕРВ на дату 25 ноября. Дата приходится на период осеннего ледообразования, следовательно, расчет производится по алгоритму, изложенному в П.6.9.

Значение корня квадратного из нарастающей суммы отрицательных температур воздуха на дату 25 ноября составило 11,7 (графа 6 таблицы П.7). Вычисляем значение относительного отклонения по формуле (П.11) (графа 13 таблицы П.7)

$$\tilde{q}_{25.11} = -0,013 \cdot 11,7 - 0,2617 = -0,414. \quad (\text{П.49})$$

Значение расхода воды на дату 25 ноября (графа 14 таблицы П.7)

$$Q_{25.11} = 66,8 \cdot (1 - 0,414) = 39,1 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.50})$$

П.7.12 Расчет ЕРВ на дату 15 декабря. Дата соответствует периоду устойчивого ледостава, следовательно, расчет производится по алгоритму, изложенному в П.6.4.

Расчетная дата находится между датами ИРВ 7 и 20 декабря.

Значение относительного отклонения первого в расчетном периоде ИРВ (07 Декабря) сглаживанию не подлежит. Сглаживание значения \tilde{q} на 20 декабря осуществляется по зависимости (П.12) (графа 13 таблицы П.7)

$$\tilde{q}_{20.12} = -0,3246 - 0,0062 \cdot 35 = -0,542. \quad (\text{П.51})$$

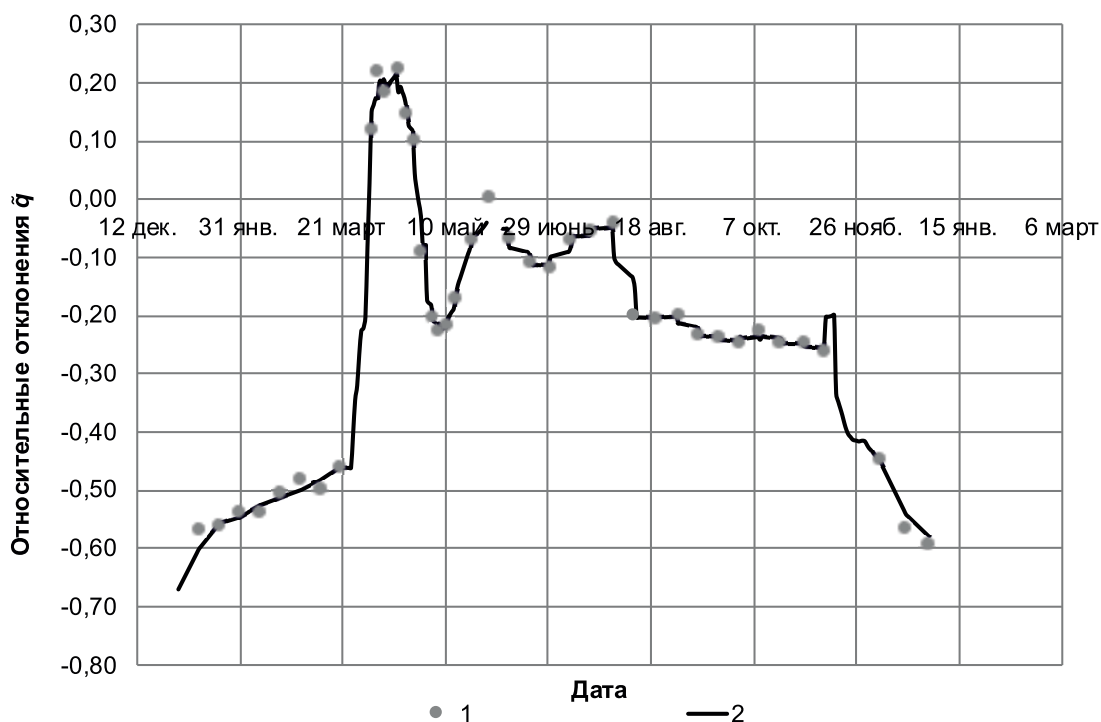
Вычисляем интерполированное значение \tilde{q}_t на расчетную дату (15 декабря) (графа 13 таблицы П.7)

$$\tilde{q}_{15.12} = -0,499 + \frac{(-0,542 - (-0,448))}{(35 - 22)} = -0,506. \quad (\text{П.52})$$

Вычисляем расход воды на дату 15 декабря (графа 14 таблицы П.7)

$$Q_{15.12} = 78,6 \cdot (1 - 0,506) = 38,9 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{П.53})$$

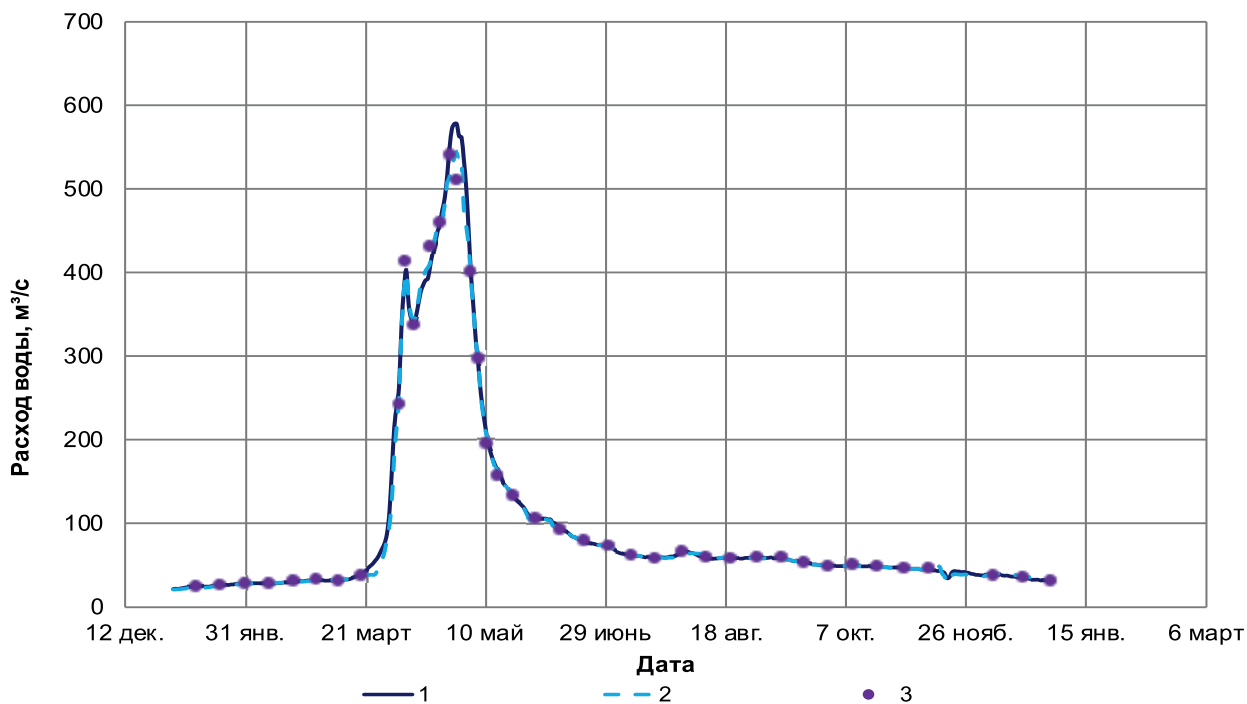
П.8 На рисунке П.9 показан ход относительных отклонений ИРВ р. Урал в гидростворе ГП г. Оренбург за 2016 год от опорной КР.



1 – относительные отклонения ИРВ от осредняющей КР;
 2 – относительные отклонения \bar{q} , вычисленные с использованием различных методик

Рисунок П.9 – Хронологический график относительных отклонений за 2016 год

П.9 На рисунке П.10 представлены гидрографы 2016 года р. Урал в гидростворе ГП г. Оренбург. Линией 1 показан гидрограф, построенный по данным ЕРВ из ЕДС, линией 2 – гидрограф, построенный по ЕРВ, вычисленных с использованием методик, изложенных в П.6.4 – П.6.9.



1 – ЕРВ по данным ЕДС; 2 – ЕРВ, вычисленные с использованием различных методик; 3 – ИРВ

Рисунок П.10 – Гидрограф 2016 года, ГП р. Урал – г. Оренбург

Т а б л и ц а П.4 – Расчет ежедневных расходов воды в гидростворе ГП р. Урал – г. Оренбург за зимне-весенний период 2016 года

Дата	t от нач. расч. пер., сут	СВО	t, °C	Нараст. суммы t, °C	H, м	Q(H), м³/с	H _и , м	Q _и , м³/с	Q(H _и), м³/с	q _и	q _г , q _в	Q _р , м³/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
30.12.15	1	Ледостав, подо льдом шуга	-	-	-	-	2,09	20,5	64,9	-0,684	-	-
31.12.15	2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
01.01.16	3		-	-	2,08	64,2	-	-	-	-	-0,670	21,2
02.01.16	4		-	-	2,06	63,0	-	-	-	-	-0,663	21,2
...
10.01.16	12	Ледостав, подо льдом шуга	-	-	1,99	58,6	-	-	-	-	-0,608	23,0
11.01.16	13		-	-	1,97	57,3	1,97	24,7	57,3	-0,569	-0,601	22,9
12.01.16	14		-	-	1,96	56,7	-	-	-	-	-0,597	22,9
13.01.16	15		-	-	1,96	56,7	-	-	-	-	-0,592	23,1
14.01.16	16		-	-	1,96	56,7	-	-	-	-	-0,588	23,4
15.01.16	17		-	-	1,96	56,7	-	-	-	-	-0,583	23,6
16.01.16	18		-	-	1,96	56,7	-	-	-	-	-0,579	23,9
17.01.16	19		-	-	1,96	56,7	-	-	-	-	-0,575	24,1
18.01.16	20		-	-	1,97	57,3	-	-	-	-	-0,570	24,6
19.01.16	21		-	-	1,98	58,0	-	-	-	-	-0,566	25,2
20.01.16	22	-	-	1,99	58,6	-	-	-	-	-0,561	25,7	
21.01.16	23	-	-	2,00	59,2	-	2,00	25,9	59,2	-0,563	26,2	
...
19.03.16	-	Закраины	1,2	0	2,17	70,0	2,17	37,7	70,0	-0,462	-0,462	37,7
20.03.16	-		-6,8	0	2,18	70,7	-	-	-	-	-0,462	38,1
21.03.16	-		-7,7	0	2,19	71,3	-	-	-	-	-0,462	38,4
22.03.16	-		-4,5	0	2,19	71,3	-	-	-	-	-0,462	38,4
23.03.16	-		0,8	0	2,20	72,0	-	-	-	-	-0,462	38,8
...
29.03.16	-	Закраины	1,9	7,0	2,48	90,9	-	-	-	-	-0,267	66,6
30.03.16	-		1,5	8,4	2,70	107	-	-	-	-	-0,226	82,5
31.03.16	-		0,2	8,6	2,95	125	-	-	-	-	-0,222	97,6
01.04.16	-		0,7	9,3	3,38	160	-	-	-	-	-0,203	128
02.04.16	-		4,3	13,6	3,81	197	-	-	-	-	-0,082	181
03.04.16	-	Ледоход Св. русло	3,9	17,5	3,95	210	-	-	-	-	0,027	216
04.04.16	-		3,2	20,7	4,05	220	4,02	242	217	0,116	0,149	252

Т а б л и ц а П.5 – Расчет ежедневных расходов воды в гидростворе ГП р. Урал – г. Оренбург за период свободного русла 2016 года

Дата	СВО	H_t , м	$Q(H_t)$, M^3/C	$H_{тн}$, м	$Q_{тн}$, M^3/C	$Q(H_{тн})$, M^3/C	$\tilde{q}_{тн}$	τ_{01}	τ_{02}	τ_{12}	$r(\tau_{01})$	$r(\tau_{02})$	$r(\tau_{12})$	p_1		p_2		$\tilde{q}_t, \tilde{q}_{t_0}$	Q_p , M^3/C	
														p_1	p_0	p_2	p_z			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
04.04.16		4,05	220	4,02	242	217	0,116	3	3			0,946		0,000	0,651	0,300	0,149	252		
05.04.16		4,69	283	-	-	-	-	1	2	3	0,994	0,976	0,946	0,540	0,423	-	0,161	329		
06.04.16		5,05	322	-	-	-	-	2	1	3	0,976	0,994	0,946	0,423	0,540	-	0,173	377		
07.04.16	Св. русло	5,22	340	5,20	412	338	0,218	3	3	6	0,946	0,946	0,789	0,327	0,346	0,327	0,173	399		
08.04.16		4,91	306	-	-	-	-	1	2	3	0,994	0,976	0,946	0,540	0,423	-	0,203	368		
09.04.16		4,77	291	-	-	-	-	2	1	3	0,976	0,994	0,946	0,423	0,540	-	0,198	349		
10.04.16		4,71	285	4,70	336	284	0,183	3	7	10	0,946	0,717	0,452	0,422	0,407	0,213	0,205	344		
...		
25.04.16		6,46	492	6,45	539	490	0,099	4	3	7	0,904	0,946	0,717	0,292	0,358	0,362	0,044	513		
26.04.16		6,68	521	-	-	-	-	1	2	3	0,994	0,976	0,946	0,540	0,423	-	0,015	529		
27.04.16		6,83	541	-	-	-	-	2	1	3	0,976	0,994	0,946	0,423	0,540	-	-0,007	538		
28.04.16		6,96	559	6,97	510	561	-0,091	3	-	-	0,946	-	-	0,300	0,651	0,000	-0,029	543		
29.04.16		7,09	578	-	-	-	-	1	-	-	0,994	-	-	0,903	-	-	-0,082	531		
30.04.16	Св. русло	7,10	579	-	-	-	-	2	-	-	0,976	-	-	0,887	-	-	-0,080	533		
01.05.16		7,05	573	-	-	-	-	-	3	-	-	0,946	-	-	0,860	-	-0,173	474		
02.05.16		6,92	554	-	-	-	-	-	2	-	-	0,976	-	-	0,887	-	-0,179	455		
03.05.16		6,72	526	-	-	-	-	-	1	-	-	0,994	-	-	0,903	-	-0,182	430		
04.05.16		6,48	494	6,55	402	504	-0,202	-	-	-	-	-	-	0,000	0,651	0,300	-0,210	391		
...		
15.05.16		3,77	194	3,72	157	189	-0,171	4	7	11	0,904	0,717	0,351	0,401	0,414	0,254	-0,165	162		
16.05.16		3,65	183	-	-	-	-	1	6	7	0,994	0,789	0,717	0,758	0,224	-	-0,147	156		
17.05.16		3,55	174	-	-	-	-	2	5	7	0,976	0,852	0,717	0,664	0,341	-	-0,137	151		
18.05.16		3,46	167	-	-	-	-	3	4	7	0,946	0,904	0,717	0,563	0,455	-	-0,126	146		
19.05.16	Св. русло	3,39	161	-	-	-	-	4	3	7	0,904	0,946	0,717	0,455	0,563	-	-0,115	142		
20.05.16		3,32	155	-	-	-	-	5	2	7	0,852	0,976	0,717	0,341	0,664	-	-0,104	139		
21.05.16		3,26	150	-	-	-	-	6	1	7	0,789	0,994	0,717	0,224	0,758	-	-0,094	136		
22.05.16		3,17	143	3,16	132	142	-0,070	7	-	-	0,717	-	-	0,103	0,842	0,000	-0,083	131		
23.05.16		3,12	139	-	-	-	-	1	-	-	0,994	-	-	0,903	-	-	-0,063	130		
...		
31.05.16		2,69	106	2,69	106	106	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	106		
01.06.16	Св. русло	2,68	105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105		
02.06.16		2,68	105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105		
03.06.16		2,68	105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105		

Т а б л и ц а П.6 – Расчет ежедневных расходов воды в гидростворе ГП р. Урал – г. Оренбург за период зарастания русла 2016 года

Дата	СВО	H, м	Q(H), м³/с	H _н , м	Q _н , м³/с	Q(H _н), м³/с	q _н	τ ₀₁	τ ₀₂	τ ₁₂	r(τ ₀₁)	r(τ ₀₂)	r(τ ₁₂)	ρ		q _t , q _{t0}	Q _p , м³/с	
														ρ ₁	ρ ₂			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
07.06.16		2,64	102	-	-	-	-	-	3	-	-	0,993	-	-	0,771	-	-0,051	97,0
08.06.16		2,63	102	-	-	-	-	-	2	-	-	0,997	-	-	0,774	-	-0,051	96,3
09.06.16		2,62	101	-	-	-	-	-	1	-	-	0,999	-	-	0,776	-	-0,051	95,6
10.06.16		2,61	100	2,60	92,8	99,4	-0,066	-	10	-	-	0,926	-	0,000	0,537	0,333	-0,083	91,8
11.06.16		2,6	99,4	-	-	-	-	1	9	10	0,999	0,940	0,926	0,520	0,356	-	-0,084	91,0
12.06.16		2,59	98,7	-	-	-	-	2	8	10	0,997	0,952	0,926	0,502	0,379	-	-0,085	90,3
13.06.16		2,58	98,0	-	-	-	-	3	7	10	0,993	0,963	0,926	0,483	0,401	-	-0,086	89,5
14.06.16		2,55	95,8	-	-	-	-	4	6	10	0,988	0,973	0,926	0,463	0,422	-	-0,087	87,5
15.06.16		2,51	93,0	-	-	-	-	5	5	10	0,981	0,981	0,926	0,443	0,443	-	-0,088	84,8
16.06.16		2,49	91,6	-	-	-	-	6	4	10	0,973	0,988	0,926	0,422	0,463	-	-0,089	83,5
17.06.16		2,47	90,2	-	-	-	-	7	3	10	0,963	0,993	0,926	0,401	0,483	-	-0,090	82,1
18.06.16		2,47	90,2	-	-	-	-	8	2	10	0,952	0,997	0,926	0,379	0,502	-	-0,090	82,1
19.06.16		2,45	88,8	-	-	-	-	9	1	10	0,940	0,999	0,926	0,356	0,520	-	-0,091	80,7
20.06.16		2,43	87,4	2,44	78,5	88,1	-0,109	10	10	20	0,926	0,926	0,714	0,308	0,333	0,308	-0,098	78,9
21.06.16		2,42	86,8	-	-	-	-	1	9	10	0,999	0,940	0,926	0,520	0,356	-	-0,113	77,0
22.06.16		2,41	86,1	-	-	-	-	2	8	10	0,997	0,952	0,926	0,502	0,379	-	-0,113	76,3
23.06.16		2,4	85,4	-	-	-	-	3	7	10	0,993	0,963	0,926	0,483	0,401	-	-0,113	75,7
24.06.16		2,39	84,7	-	-	-	-	4	6	10	0,988	0,973	0,926	0,463	0,422	-	-0,113	75,1
25.06.16		2,39	84,7	-	-	-	-	5	5	10	0,981	0,981	0,926	0,443	0,443	-	-0,114	75,1
26.06.16		2,38	84,0	-	-	-	-	6	4	10	0,973	0,988	0,926	0,422	0,463	-	-0,114	74,4
27.06.16		2,37	83,3	-	-	-	-	7	3	10	0,963	0,993	0,926	0,401	0,483	-	-0,114	73,8
28.06.16		2,36	82,6	-	-	-	-	8	2	10	0,952	0,997	0,926	0,379	0,502	-	-0,114	73,2
29.06.16		2,36	82,6	-	-	-	-	9	1	10	0,940	0,999	0,926	0,356	0,520	-	-0,114	73,2
30.06.16		2,34	81,3	2,35	72,3	82,0	-0,118	10	10	20	0,926	0,926	0,714	0,308	0,333	0,308	-0,100	73,2
10.11.16		2,03	61,1	2,03	45,1	61,1	-0,262	10	-	-	0,926	-	-	0,249	0,708	0,000	-0,258	45,3
11.11.16		2,02	60,5	-	-	-	-	1	-	-	0,999	-	-	0,919	-	-	-0,240	45,9
12.11.16		2,02	60,5	-	-	-	-	2	-	-	0,997	-	-	0,917	-	-	-0,240	46,0
13.11.16		2,02	60,5	-	-	-	-	3	-	-	0,993	-	-	0,913	-	-	-0,239	46,0
14.11.16		2,02	60,5	-	-	-	-	4	-	-	0,988	-	-	0,908	-	-	-0,238	46,1
15.11.16		2,02	60,5	-	-	-	-	5	-	-	0,981	-	-	0,902	-	-	-0,236	46,2

Т а б л и ц а П.7 – Расчет ежедневных расходов воды в гидростворе ГП р. Урал – г. Оренбург за осенне-зимний период 2016 года

Дата	t от нач. расч. пер., сут	СВО	t, °C	Нараст. суммы t, °C	$\sqrt{\sum t_{\text{отр}}}$	H, м	Q(H), м³/с	H _н , м	Q _н , м³/с	Q(H _н), м³/с	q _н	q̄ _н	Q _ф , м³/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10.11.16	-		5,9		0	2,03	61,1	2,03	45,1	61,1	-0,262	-0,258	45,3
11.11.16	-	Растительность легла на дно	4,5		-	2,02	60,5	-	-	-	-	-0,240	45,9
12.11.16	-		4,0		-	2,02	60,5	-	-	-	-	-0,240	46,0
13.11.16	-		-0,1	-0,1	0,3	2,02	60,5	-	-	-	-	-0,239	46,0
14.11.16	-		-2,7	-2,8	1,7	2,02	60,5	-	-	-	-	-0,238	46,1
15.11.16	-		-13,2	-16,0	4,0	2,02	60,5	-	-	-	-	-0,236	46,2
16.11.16	1	Шугоход	-14,9	-30,8	5,5	2,02	60,5	-	-	-	-0,334	-0,334	40,3
...
25.11.16	10	Ледостав с полыньями	-2,4	-137,9	11,7	2,12	66,8	-	-	-	-	-0,414	39,1
26.11.16	11		-1,1	-139,0	11,8	2,12	66,8	-	-	-	-	-0,415	39,1
27.11.16	12		-2,4	-141,4	11,9	2,11	66,2	-	-	-	-	-0,416	38,6
...
02.12.16	17	Ледостав, подо льдом шуга	-11,1	-163,4	12,8	2,08	64,2	-	-	-	-	-0,428	36,8
03.12.16	18		-7,4	-170,8	13,1	2,08	64,2	-	-	-	-	-0,432	36,5
04.12.16	19		-10,9	-181,7	13,5	2,11	66,2	-	-	-	-	-0,437	37,3
05.12.16	20		-9,7	-191,3	13,8	2,14	68,1	-	-	-	-	-0,442	38,0
06.12.16	21		-9,4	-200,7	14,2	2,14	68,1	-	-	-	-	-0,446	37,7
07.12.16	22		-5,2	-205,9	14,3	2,15	68,7	2,15	37,9	68,7	-0,449	-0,448	37,9
08.12.16	23		-23,4	-229,3	15,1	2,21	72,6	-	-	-	-	-0,455	39,6
09.12.16	24		-10,6	-239,8	15,5	2,22	73,3	-	-	-	-	-0,463	39,4
10.12.16	25		-3,7	-243,5	15,6	2,24	74,6	-	-	-	-	-0,470	39,6
11.12.16	26		-8,9	-252,4	15,9	2,25	75,3	-	-	-	-	-0,477	39,4
12.12.16	27	-20,8	-273,2	16,5	2,27	76,6	-	-	-	-	-0,484	39,5	
13.12.16	28	-15,1	-288,3	17,0	2,28	77,3	-	-	-	-	-0,491	39,3	
14.12.16	29	-21,5	-309,7	17,6	2,29	77,9	-	-	-	-	-0,499	39,1	
15.12.16	30	-25,6	-335,3	18,3	2,3	78,6	-	-	-	-	-0,506	38,9	
...
20.12.16	35	Ледостав	-12,5	-422,9	20,6	2,3	78,6	2,3	34,1	78,6	-0,566	-0,542	36,0
...
31.12.16	46	Ледостав	-6,0	-551,2	23,5	2,29	77,9	2,29	31,6	77,9	-0,595	-0,579	32,8
10.01.17	56	Ледостав	-	-	-	-	-	2,26	32,2	75,9	-0,576	-	-

Приложение Р

(обязательное)

Пример анализа надежности гидрометрического учета стока воды на основе расчета русловых водных балансов для участка реки

Р.1 Рассмотрим пример составления РВБ за декадные и месячные интервалы времени 2018 года для участка р. Кубань от ГП с. Успенское до ГП г. Армавир ($L = 45$ км).

Река Кубань на рассматриваемом участке характеризуется неустойчивым характером зависимости расходов от уровней воды $Q(H)$ вследствие русловых деформаций.

На участке р. Кубань от ГП с. Успенского до ГП г. Армавир впадает один приток – р. Уруп. Учет стока притока осуществляется в гидростворе ГП х. Стеблицкий, расположенного в 16 км от устья притока.

Р.2 Для расчета РВБ рекомендуется составить таблицу вида Р.1 для декадных РВБ и Р.2 для месячных РВБ.

Р.2.1 В графы таблицы Р.1 заносятся следующие элементы:

- 3 и 8 – значения уровней воды в начале расчетного интервала (средние суточные за первые сутки каждой декады) для верхнего и нижнего гидростворов участка, соответственно;
- 4 и 9 – значения средних декадных расходов воды в верхнем и нижнем гидростворах участка, соответственно;
- 5 и 10 – значения площадей водного сечения в верхнем и нижнем гидростворах участка, соответственно, вычисленных по соответствующим зависимостям $\omega(H)$ для значений уровней из граф 3 и 8;
- 6 и 11 – значения изменения площадей водного сечения за расчетный интервал, вычисляемые по формуле

$$\Delta\omega = \omega_k - \omega_n, \quad (\text{Р.1})$$

где ω_n – значение площади водного сечения на момент начала расчетного периода;

ω_k – значение площади водного сечения на момент окончания расчетного периода (начала следующего периода);

- 7 – значения средних декадных расходов воды притока, впадающего на рассматриваемом участке (в примере один приток). Если притоков больше одного, добавляется графа для подсчета суммарного расхода притоков.

Р.2.2 При наличии неучтенного бокового притока в таблицу Р.1 добавляется графа для его расчета по формуле (10.5).

Р.2.3 При наличии водозаборов и сбросов в таблицу Р.1 добавляются дополнительные графы.

Р.2.4 После занесения всех имеющихся сведений в графе 12 таблицы Р.1 производится вычисление изменения объема воды на участке реки по формуле (10.9).

Р.2.5 Расход руслового регулирования в графе 13 таблицы Р.1 вычисляется по формуле (10.8). Расчетный интервал времени T равен количеству суток в расчетном периоде (месяце, декаде).

Р.2.6 В графе 14 таблицы Р.1 вычисляется остаточный член уравнения РВБ по формуле (10.2) с учетом всех составляющих РВБ на рассматриваемом участке реки.

Р.2.7 Суммарная погрешность определения учтённых элементов с доверительным интервалом вычисляется по формулам (10.10) и (10.11) и заносится в две последние графы расчетной таблицы.

Р.3 Рассмотрим пример расчета РВБ на вторую декаду июня 2018 г. (17-ю декаду года).

Р.3.1 Средние суточные уровни воды 11 июня (1-е сутки декады) в гидростворах ГП с. Успенское и г. Армавир составили соответственно 1,69 и 4,04 м (графы 3 и 8 таблицы Р.1).

Р.3.2 Средние декадные расходы воды за 17-ю декаду года в гидростворах ГП с. Успенское и г. Армавир составили соответственно 331 и 481 м³/с (графы 4 и 9 таблицы Р.1).

Р.3.3 Площади водных сечений, вычисленные по соответствующим зависимостям $\omega(H)$ составили 251 и 230 м² (графы 5 и 10 таблицы Р.1).

Р.3.4 В графах 6 и 11 вычисляются изменения площадей водного сечения в гидростворах ГП с. Успенское и г. Армавир за расчетный интервал

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{\text{в}} &= 240 - 251 = -11 \text{ м}^2, \\ \Delta\omega_{\text{н}} &= 223 - 230 = -7 \text{ м}^2.\end{aligned}\tag{P.2}$$

Р.3.5 Средний декадный расход притока (р. Уруп) составил 60,4 м³/с (графа 7 таблицы Р.1).

Р.3.6 Вычисляется изменение объема воды на участке (графа 12 таблицы Р.1)

$$\Delta W = \frac{-11 + (-7)}{2} \cdot 45000 = -392570 \text{ м}^3.\tag{P.3}$$

Р.3.7 Вычисляется русловое регулирование на участке (графа 13 таблицы Р.1)

$$Q_{\text{р.р}} = -\frac{(-392570)}{86400 \cdot 10} = 0,45 \text{ м}^3/\text{с}.\tag{P.4}$$

Р.3.8 Вычисляется остаточный член уравнения РВБ (графа 14 таблицы Р.1)

$$Q_0 = Q_B + Q_{\text{бп. г.}} + Q_{\text{р. р.}} - Q_H = 331 + 60,4 + 0,45 - 481 = -89,1 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{P.5})$$

Р.3.9 В графах 15 и 16 таблицы Р.1 вычисляется суммарная погрешность определения учтённых элементов с доверительным интервалом

$$m_{oi} = \pm 1,96 \sqrt{331^2 \cdot 0,06^2 + 60,4^2 \cdot 0,06^2 + 0,45^2 \cdot 0,2^2 + 481^2 \cdot 0,06^2} = \pm 40 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (\text{P.6})$$

Р.3.10 Аналогично выполнен расчет РВБ за месячные интервалы, представленный в таблице Р.2.

Р.4 По данным граф 14, 15 и 16 таблицы Р.1 строится хронологический график невязок декадных РВБ, представленный на рисунке Р.1. По данным граф 13, 14 и 15 таблицы Р.2 строится хронологический график невязок месячных РВБ, представленный на рисунке Р.2.

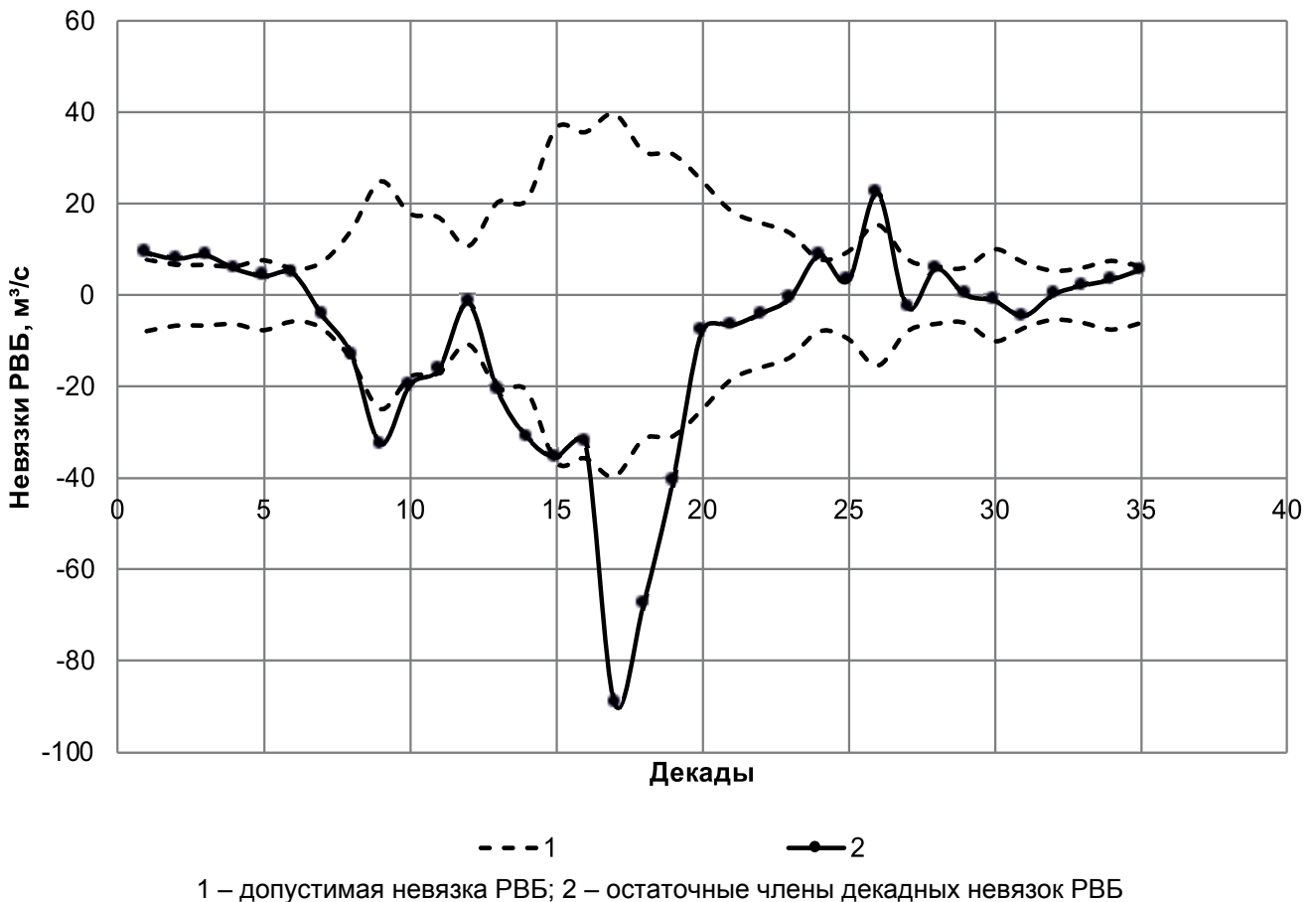


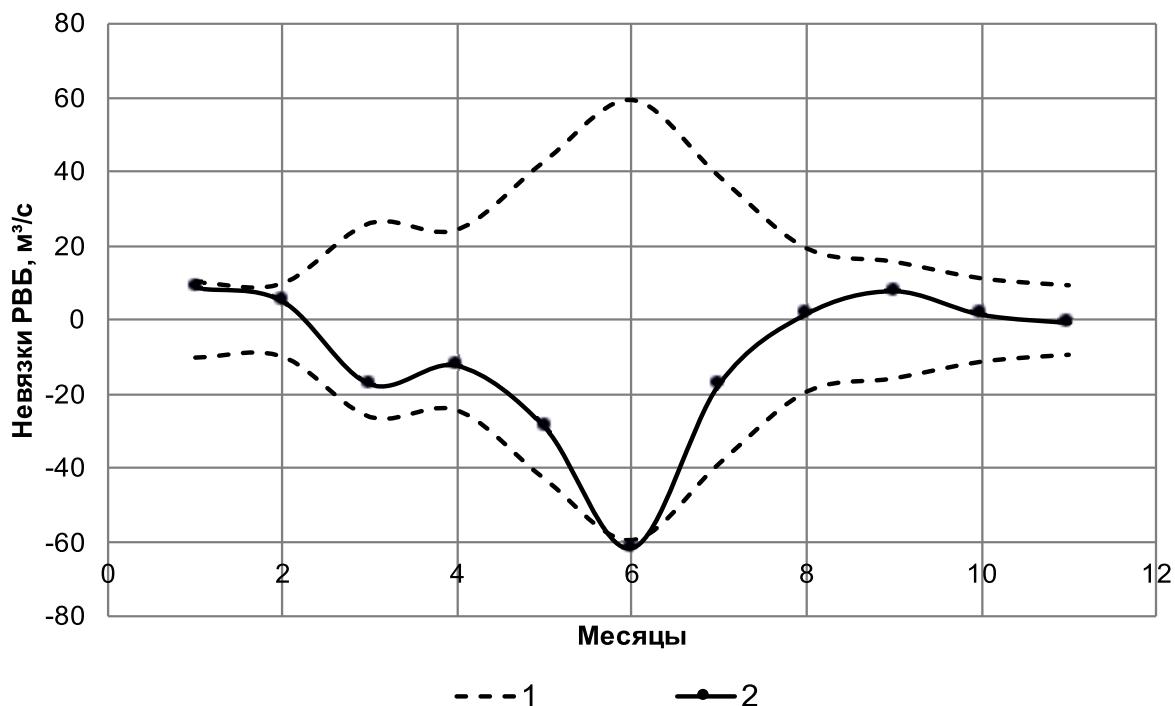
Рисунок Р.1 – Хронологический график невязок декадных РВБ на участке р. Кубань от ГП с. Успенское до ГП г. Армавир за 2018 год

Т а б л и ц а Р.1 Расчет РВБ на участке р. Кубань от ГП с. Успенское до ГП г. Армавир за декадные интервалы 2018 года

Месяц	Декада	H _б , м	Q _б , м³/с	ω _б , м²	Δω _б , м²	Q _{бп.г.}	H _г , м	Q _г , м³/с	ω _г , м²	Δω _г , м²	ΔW, м³	Q _{р.р.} , м³/с	Q _о , м³/с	+m _о , м³/с	-m _о , м³/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
январь	1	0,25	62,2	79,4	10,7	22,4	2,77	75,0	107	3,3	314748	-0,36	9,2	8	-8
	2	0,34	55,0	90,2	-9,5	9,77	2,81	57,2	110	-4,1	-306188	0,35	7,9	7	-7
	3	0,26	54,9	80,6	0,0	10,8	2,76	57,0	106	-1,6	-36316	0,04	8,7	7	-7
февраль	4	0,26	51,6	80,6	-3,6	11,7	2,74	57,5	104	3,2	-7549	0,01	5,8	6	-6
	5	0,23	62,5	77,1	-17,9	16,4	2,78	75,3	108	-4,0	-492961	0,57	4,2	8	-8
	6	0,08	46,0	59,2	4,8	13,4	2,73	54,6	103	-2,4	53322	-0,07	4,7	6	-6
март	7	0,12	58,1	64,0	67,9	15,6	2,70	75,0	101	49,3	2637860	-3,05	-4,4	7	-7
	8	0,69	114	132	22,6	37,7	3,27	164	150	5,7	636696	-0,74	-13,0	14	-14
	9	0,88	205	154	29,8	50,9	3,33	287	156	27,6	1291552	-1,36	-32,5	25	-25
апрель	10	1,13	148	184	-39,3	30,5	3,61	200	184	-30,5	-1569950	1,82	-19,7	18	-18
	11	0,80	142	145	-19,1	23,0	3,30	182	153	-17,5	-822325	0,95	-16,0	17	-17
	12	0,64	88,7	126	-4,8	17,2	3,11	108	136	-5,3	-227262	0,26	-1,8	11	-11
май	13	0,60	170	121	53,6	25,6	3,05	214	130	40,2	2111098	-2,44	-20,8	20	-20
	14	1,05	172	175	25,0	39,0	3,48	241	171	15,1	902941	-1,05	-31,0	21	-21
	15	1,26	302	200	28,6	69,3	3,63	406	186	5,2	759419	-0,80	-35,5	37	-37
июнь	16	1,50	300	228	22,6	37,3	3,68	368	191	39,0	1387060	-1,61	-32,3	36	-36
	17	1,69	331	251	-10,7	60,4	4,04	481	230	-6,7	-392570	0,45	-89,1	40	-40
	18	1,60	264	240	-33,4	34,9	3,98	368	223	-31,2	-1453524	1,68	-67,4	31	-31
июль	19	1,32	260	207	-48,8	29,1	3,69	332	192	-37,8	-1948743	2,26	-40,6	31	-31
	20	0,91	210	158	-17,9	29,6	3,31	248	154	-9,3	-612217	0,71	-7,7	25	-25
	21	0,76	152	140	-10,7	32,9	3,21	192	145	-6,4	-385011	0,41	-6,7	18	-18
август	22	0,67	125	129	36,9	47,2	3,14	174	138	48,3	1918252	-2,22	-4,0	16	-16
	23	0,98	109	166	-77,4	35,4	3,64	149	187	-74,3	-3414649	3,95	-0,6	14	-14
	24	0,33	65,4	89,0	-2,4	10,4	2,84	67,3	112	-6,6	-201113	0,21	8,7	8	-8
сентябрь	25	0,31	79,6	86,6	10,7	11,9	2,76	87,8	106	9,1	444968	-0,52	3,2	10	-10
	26	0,40	130	97,3	2,4	14,3	2,87	122	115	0,8	72463	-0,08	22,2	15	-15
	27	0,42	65,5	99,7	-25,0	12,4	2,88	81,3	116	-4,2	-656577	0,76	-2,6	8	-8
октябрь	28	0,21	51,5	74,7	-31,0	10,3	2,83	57,4	112	-19,9	-1144496	1,32	5,7	6	-6
	29	-0,05	50,1	43,7	19,1	7,11	2,58	56,5	91,7	4,6	533070	-0,62	0,1	6	-6
	30	0,11	83,8	62,8	28,6	14,4	2,64	98,3	96,4	20,3	1099306	-1,16	-1,3	10	-10
ноябрь	31	0,35	59,0	91,3	-36,9	11,3	2,89	76,2	117	-15,5	-1180663	1,37	-4,5	7	-7
	32	0,04	44,2	54,4	6,0	8,06	2,70	52,0	101	0,0	134010	-0,16	0,1	5	-5
	33	0,09	49,8	60,4	29,8	7,06	2,70	53,9	101	5,6	796568	-0,92	2,0	6	-6
декабрь	34	0,34	62,9	90,2	-26,2	8,10	2,77	68,5	107	-8,0	-769543	0,89	3,4	8	-8
	35	0,12	50,6	64,0	-2,4	7,81	2,67	52,8	98,7	4,8	53662	-0,06	5,5	6	-6
январь	36	0,10	42,6	61,6		7,29	2,73	55,4	103						
	1														

Т а б л и ц а Р.2 Расчет РВБ на участке р. Кубань от ГП с. Успенское до ГП г. Армавир за месячные интервалы 2018 года

Месяц	H_b, M	$Q_b, M^3/C$	ω_b, M^2	$\Delta\omega_b, M^2$	$Q_{бп.г.}$	H_h, M	$Q_h, M^3/C$	ω_h, M^2	$\Delta\omega_h, M^2$	$\Delta W, M^3$	$Q_{р.р.}, M^3/C$	$Q_0, M^3/C$	$+m_0, M^3/C$	$-m_0, M^3/C$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
январь	0,25	57,3	79,4	1,2	14,2	2,77	62,9	107	-2,4	-27757	0,01	8,6	10	-10
февраль	0,26	53,9	80,6	-16,7	13,9	2,74	63,0	104	-3,2	-447188	0,18	5,0	10	-10
март	0,12	128	64,0	120,3	35,3	2,70	179	101	82,6	4566108	-1,70	-17,4	26	-26
апрель	1,13	126	184	-63,1	23,6	3,61	163	184	-53,3	-2619538	1,01	-12,4	24	-24
май	0,60	217	121	107,2	45,4	3,05	290	130	60,5	3773458	-1,41	-29,0	43	-43
июнь	1,50	299	228	-21,4	44,2	3,68	405	191	1,0	-459034	0,18	-61,6	59	-59
июль	1,32	206	207	-77,4	30,6	3,69	255	192	-53,5	-2945971	1,10	-17,3	39	-39
август	0,67	98,7	129	-42,9	30,3	3,14	128	138	-32,6	-1697510	0,63	1,6	19	-19
сентябрь	0,31	91,7	86,6	-11,9	12,9	2,76	96,9	106	5,7	-139146	0,05	7,8	16	-16
октябрь	0,21	62,5	74,7	16,7	10,7	2,83	71,6	112	5,0	487879	-0,18	1,4	11	-11
ноябрь	0,35	51,0	91,3	-1,2	8,81	2,89	60,7	117	-9,9	-250085	0,10	-0,8	9	-9
Декабрь	0,34	51,7	90,2		7,72	2,77	58,8	107						
январь														



1 – допустимая невязка РВБ; 2 – остаточные члены месячных невязок РВБ

Рисунок Р.2 – Хронологический график невязок месячных РВБ на участке р. Кубань от ГП с. Успенское до ГП г. Армавир за 2018 год

Р.5 Из рисунка Р.2 видно, что значение остаточного члена РВБ незначительно превышает допустимую невязку в июне 2018 года. На графике невязок декадных РВБ (см. рисунок Р.1) это превышение гораздо значительнее в 17, 18 и 19 декадах года. Чтобы разобраться в возможных причинах такого превышения, рассмотрим совмещенные гидрографы р. Кубань в гидростворах ГП с. Успенское и г. Армавир за 2018 год, представленные на рисунке Р.3.

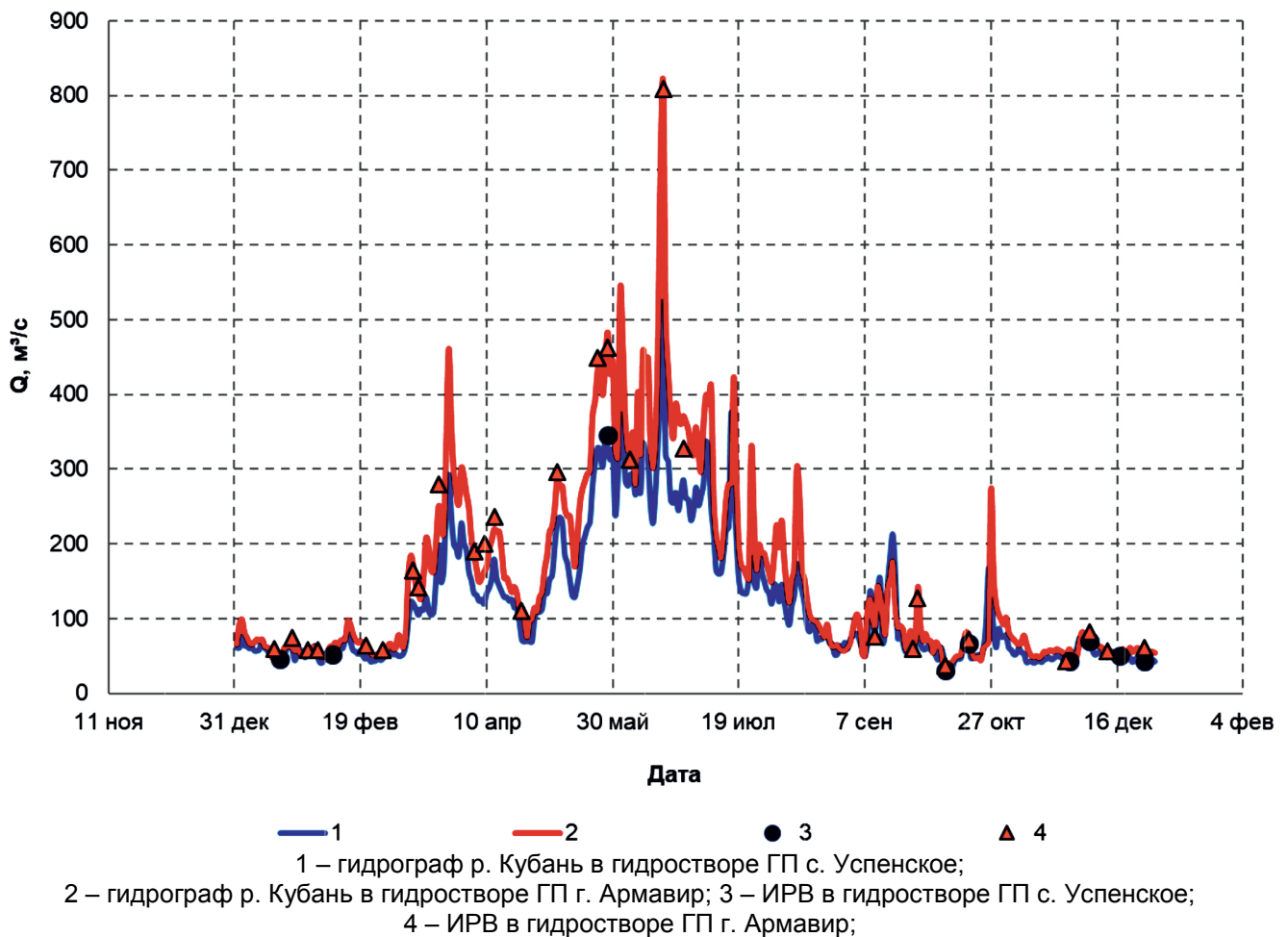


Рисунок Р.3 – Совмещенные гидрографы р. Кубань в гидростворах
ГП с. Успенское и г. Армавир с нанесенными ИРВ

Как видно из рисунка Р.3, в июне 2018 года наблюдался наивысший в году паводок. Максимальные расходы воды этого паводка на ГП с. Успенское значительно ниже соответствующих расходов воды на ГП г. Армавир. На ГП с. Успенское в 2018 году было произведено всего 9 измерений расходов, при этом только один в период повышенной водности. Построение надежной годовой КР, которая могла бы использоваться для расчета ЕРВ на всей амплитуде уровней воды, не представляется возможным. Кроме того, в период с 2012 по 2017 годы на ГП с. Успенское расходы воды не измерялись, что исключает возможность построения МКР. Таким образом, составление РВБ на участке р. Кубань позволило наглядно продемонстрировать недоучет стока воды на ГП с. Успенское вследствие недостаточного количества измерений расходов воды.

Библиография

- [1] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Ч. III. Составление и подготовка к печати гидрологического ежегодника. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – 292 с.
- [2] Методические рекомендации по автоматизированному вычислению ежедневных расходов воды. – Обнинск: ФООП ВНИИГМИ МЦД, 1991. – 38 с.
- [3] Методические указания по ведению Государственного водного кадастра, раздел 1, выпуск 3, часть 1 (Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши). – Л.: ГГИ, 1979
- [4] Дополнения и изменения к Методическим указаниям по ведению Государственного водного кадастра, раздел 1, выпуск 3, часть 1. – Л.: ГГИ, 1980
- [5] Методические указания по ведению Государственного водного кадастра, раздел 1, выпуск 4, часть 1 (Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши). – Л.: Гидрометеиздат, 1981
- [6] Карасев И. Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 310 с.
- [7] Kennedy E.J. Discharge ratings at gaging stations. – US Government printing office, Washington, 1984. – 59 p.
- [8] Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
- [9] Manual on Stream Gauging. Volume II. Computation of Discharge. World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.
- [10] Статистические методы в гидрологии/под ред. Русинова М.И. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 200 с.
- [11] Яковлева Т.И. Усовершенствование и адаптация моделей гидрометрического учета стока при неоднозначных зависимостях расходов от уровней воды. – Сборник работ по гидрологии ГГИ, 2003, № 26. С. 58–69
- [12] Карасев И. Ф., Яковлева Т. И. Усовершенствованные методы гидрометрического учета стока. Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда, Секция 1. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 200. С. 195–202
- [13] Яковлева Т.И. Оценка изменчивости пропускной способности русла на основе модели "сигнал плюс шум". Вопросы гидрологии суши Доклады молодых ученых и специалистов. 1991, с. 209–214.
- [14] Карасев И.Ф., Яковлева Т.И. Экстраполяционно-аналитический метод оперативного учета стока рек с неустойчивым руслом (на примере р. Амударья) – Труды ГГИ, 1988, вып. 325. С. 19-30.
- [15] Zakwan M. Spreadsheet-based modelling of hysteresis-affected curves. – Applied Water Science, 2018, № 8. Article number: 101
- [16] Petersen-Øverleir A. Modelling stage–discharge relationships affected by hysteresis using the Jones formula and nonlinear regression. – Hydrological Sciences Journal, 2006. P. 365-388
- [17] Kolupaila St. Hidrometrija, T.1, Kaunas, 1939. – 396 с.

- [18] Поляков Б. В. Гидрологические исследования нижней Волги. – М.: Госстройиздат, 1938. – 160 с.
- [19] Соколов Б. Л. Наледи и речной сток. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 190 с.
- [20] Методические рекомендации по учету стока на реках в зимний и переходный периоды. – Л.: ГГИ, 1980. – 80 с.
- [21] Пономарев В.П. Подземное питание горных рек юга Дальнего Востока. – Труды ГГИ, 1979. – Вып. 272.
- [22] Карасев И.Ф. Векшина Т.В. Режим гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел. – Труды Академии проблем водохозяйственных наук, вып. 9: Проблемы русловедения, М.: 2003. С. 112–122.
- [23] Методические указания управлениям гидрометслужбы, № 90 – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 104 с.

Ключевые слова: расходы воды, уровни воды, справочник водного кадастра, обработка и обобщение наблюдений, сток воды

Лист регистрации изменений

Номер изме- нения	Номер страницы				Номер регистрации изменения в ГОС, дата	Подпись	Дата	
	изме- ненной	заме- ненной	новой	аннулиро- ванной			внесения изменений	введения изменений

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

РД 52.08.915–2021

Обработка и обобщение данных наблюдений за стоком воды на реках и каналах при подготовке справочных изданий водного кадастра

Компьютерная верстка и печать ООО "РИАЛ"
Подписано в печать 28.03.2022. Тираж 350 экз. Заказ №16/03-22.

УДК 556.02

© ФГБУ ГГИ, 2022

ISBN 978-5-907276-41-3

© ООО РИАЛ, 2022