МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет)

РЕКОМЕНДАЦИИ

Р 52.08.872–2018

ОПЕРАТИВНЫЙ УЧЕТ СТОКА НА ВОДОТОКАХ
Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды

Санкт-Петербург

ФГБУ «ГГИ»

2018

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАНЫ Федеральным государственным бюджетным учреждением «Государственный гидрологический институт» (ФГБУ «ГГИ»)

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

3 ОДОБРЕНЫ решением методической комиссии ФГБУ «ГГИ», протокол № 3 от 22.12.2016

4 СОГЛАСОВАНЫ:

с Управлением наблюдательной сети и гидрометобеспечения (УНСГ) Росгидромета 09.02.2018;

с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно-производственное объединение «Тайфун» (ФГБУ «НПО «Тайфун») письмом от 19.01.2018 №01-46/100

5 УТВЕРЖДЕНЫ Руководителем Росгидромета 13.02.2018

ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ приказом Росгидромета от 22.02.2018 № 75

6 ЗАРЕГИСТРИРОВАНЫ ФГБУ «НПО «Тайфун» от 22.02.2018 за номером Р 52.08.872–2018

7 ВВЕДЕНЫ ВПЕРВЫЕ

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения и сокращения 2
4 Общие положения 4
5 Методы оперативной обработки измерений уровней воды 6
5.1 Порядок получения и передачи данных наблюдений 6
5.2 Создание рабочей базы данных для оперативного учета стока 8
5.3 Анализ полноты данных автоматизированных гидрологических комплексов 10
5.4 Контроль и оценка качества данных об уровнях воды 11
5.5 Порядок ежедневной оперативной обработки уровней воды 13
6 Методы оперативного учета стока 16
6.1 Задача и основные положения методики оперативного учета стока 16
6.2 Выбор расчетной зависимости расходов от уровней воды и оценка ее однозначности 18
6.3 Оперативный учет стока при наличии однозначной многолетней кривой расходов 20
6.4 Оперативный учет стока при наличии однозначной годовой кривой расходов 23
6.5 Алгоритм оперативного учета стока в условиях свободного состояния русла при отсутствии однозначной кривой расходов 24
6.6 Алгоритм оперативного учета стока в зимний и переходные периоды 31
6.7 Алгоритм оперативный учет стока при зарастании русла 35
7 Пошаговый алгоритм обработки гидрологических данных наблюдений и оперативного учета стока 39
8 Ежедневная обработка данных об уровнях и расходах воды в оперативном режиме и получение обобщенных характеристик 40
Приложение А (рекомендуемое) Формы и примеры заполнения таблиц для оперативного учета стока 42
Приложение Б (обязательное) Алгоритмы аппроксимации зависимостей расходов от уровней воды 45
Приложение В (обязательное) Алгоритм оценки однозначности зависимости расходов от уровней воды 56
Приложение Г (рекомендуемое) Пример выбора наилучшей аппроксимации зависимости расходов от уровней воды 59

Приложение Д (рекомендуемое) Пример кусочно-полиномиальной аппроксимации зависимости расходов от уровней воды..... 61

Приложение Е (рекомендуемое) Пример оперативного учета стока в условиях свободного состояния русла..... 64

Приложение Ж (рекомендуемое) Пример оперативного учета стока в условиях деформации русла с использованием метода оптимальной экстраполяции..... 67

Приложение И (рекомендуемое) Примеры оперативного учета стока в осенний и весенний переходные периоды..... 73

Приложение К (рекомендуемое) Пример оперативного учета стока в осенне-зимний переходный период, основанный на закономерностях спада зимних расходов и истощения стока..... 86

Приложение Л (рекомендуемое) Примеры оперативного учета стока в период зарастания русла..... 90

Библиография..... 104

Введение

Посты гидрологической сети Росгидромета подразделяются на режимные и информационные. Данные с информационных гидрологических постов ежедневно в заданные сроки передаются по каналам связи в районные или областные центры сбора данных, далее передача данных осуществляется в службы автоматизированной системы передачи данных управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС). В ходе модернизации и технического перевооружения гидрологической сети на гидрологических постах устанавливаются автоматизированные гидрологические комплексы, которые выполняют непрерывные наблюдения за уровнями воды и в автоматизированном режиме передают полученные данные в центры сбора данных.

УГМС являются центральными учреждениями, где ежедневно большая часть метеорологических и гидрологических данных собирается, верифицируется, обрабатывается, перерабатывается в прогнозы и передается региональным и локальным потребителям. Оперативные гидрологические данные (показания уровнемеров гидрологического поста) передаются в Гидрометцентр России один раз в день, однако в периоды высоких паводков частота передачи данных возрастает до 6 – 12 раз в день.

В настоящее время в технологии режимной обработки данных при подготовке гидрологического ежегодника частично решена проблема усвоения получаемых с помощью автоматизированных гидрологических постов данных об уровнях, температуре воды и осадках. Однако данные автоматизированной гидрологической сети, так необходимые при оперативном обслуживании потребителей и гидрологическом прогнозировании, большей частью используются только как дополнительная информация. Такая ситуация обусловлена прежде всего тем, что данные гидрологических наблюдений, полученные в учащенном режиме, не могут быть усвоены и обработаны с помощью программного комплекса «АРМ гидролог-прогнозист», который является наиболее распространенным на сегодняшний день инструментом прогнозистов.

Существенным недостатком применяемых на сети автоматизированных технологий является отсутствие в них блока оперативного учета стока – вычисления расходов воды в реальном времени по данным наблюдений за уровнями воды, поступающим с информационных гидрологических постов. Более того, до настоящего

времени не существует регламентированной методики оперативного учета стока рек, утвержденной методической комиссией ФГБУ «ГГИ» и Росгидрометом.

Оперативный учет стока рек выполняется в режиме реального времени. При этом специалистам приходится опираться как на данные текущих измерений и наблюдений, так и на данные прошлых лет и корректировать их с каждым новым измерением расхода воды.

Решения, предложенные в настоящих рекомендациях, опираются на методические подходы, разработанные в отделе гидрометрии и гидрологической сети (ОГГС) ФГБУ «ГГИ». Они представлены в виде алгоритмов и могут быть использованы для оперативного учета стока в различных условиях протекания потока: свободного состояния речного русла, при его зарастании, в условиях ледостава и ледообразования, а также осеннего и весеннего переходных периодов.

Алгоритмы расчетов, изложенные в рекомендациях, апробированы специалистами ГГИ по оперативным данным более чем 40 гидрологических постов Росгидромета, в том числе в бассейнах рек Дон, Кубань, Краснодарского и Саяно-Шушенского водохранилищ. В приложениях к настоящим рекомендациям приведены примеры использования на практике предложенных алгоритмов.

По всем вопросам, связанным с применением настоящих рекомендаций, следует обращаться в ОГГС ФГБУ «ГГИ» (199053, г. Санкт-Петербург, В.О., 2-я линия, д. 23; тел. +7 (812) 323-11-39, 433-93-32; e-mail: gost.e-ecolog.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ

ОПЕРАТИВНЫЙ УЧЕТ СТОКА НА ВОДОТОКАХ
Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды

Дата введения – 2018-06-01
Срок действия – до 2023-06-01

1 Область применения

1.1 Настоящие рекомендации устанавливают методы оперативной обработки гидрологических данных (уровней и расходов воды) и оперативного учета стока – вычисления срочных и ежедневных расходов воды по оперативным данным наблюденных уровней и расходов воды.

1.2 Рекомендации предназначены для специалистов-гидрологов оперативно-прогностических подразделений гидрологической сети Росгидромета, выполняющих оперативную обработку данных измерений уровней и расходов воды на водотоках и занятых подготовкой оперативной информационной продукции для обеспечения потребителей и задач гидрологического прогнозирования.

Рекомендации могут быть полезны специалистам-гидрологам других ведомств, выполняющим гидрологические наблюдения и текущую оценку водных ресурсов

2 Нормативные ссылки

В настоящих рекомендациях использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 19179–73 Гидрология суши. Термины и определения

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

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

РД 52.19.143–2010 Перечень документов архивного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении

Примечания

1 При пользовании настоящими рекомендациями 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;

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

2 Если ссылочный нормативный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящими рекомендациями 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 настоящих рекомендациях применены термины по ГОСТ 19179, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **автоматизированный гидрологический комплекс;** АГК: Комплекс приборов и оборудования, предназначенных для выполнения автоматизированных наблюдений за гидрологическими и метеорологическими элементами, оснащенный средствами передачи информации в центры сбора данных.

3.1.2 **автоматизированный гидрологический пост;** АГП: Гидрологический пост, на котором для ежедневных наблюдений за гидрологическими характеристиками водного режима используется АГК.

3.1.3 **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.

3.1.4 **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.

3.1.5 **оперативный учет стока:** 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.

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

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

3.2 В настоящих рекомендациях применены следующие сокращения:

АКФ – автокорреляционная функция;

АСПД – автоматизированная система передачи данных;

АРМ – автоматизированное рабочее место;

БД – база данных;

ГМБ – гидрометеорологическое бюро;

ГП – гидрологический пост;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ЕДС – ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши;

ЕРВ – ежедневные расходы воды;

ИРВ – измеренные расходы воды;

КР – кривая расходов;

МКР – многолетняя кривая расходов;

МНК – метод наименьших квадратов;

м.ст. – метеорологическая станция;

НЯ – неблагоприятное гидрологическое явление;

ОЯ – опасное природное явление;

ПО – программное обеспечение;

ПСР – пропускная способность русла;

«РЕКИ-РЕЖИМ» – система обработки режимной информации речных гидрологических постов;

СГМО – специализированная гидрометеорологическая обсерватория;

СИ – средство измерений;

СВО – состояние водного объекта;

СКО – среднее квадратическое отклонение;

ст. – станица;

УГМС – управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды;

УР – уравнение регрессии, аппроксимирующее годовую кривую расходов;

УРМ – уравнение регрессии, аппроксимирующее многолетнюю кривую расходов воды по уровням;

х. – хутор;

ЦГМС – центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды;

ЦСД – центр сбора данных наблюдений.

4 Общие положения

4.1 Наблюдения на гидрологической сети Росгидромета осуществляются в соответствии с требованиями РД 52.08.163, МИ 1759 и наставлений гидрологическим станциям и постам [1] – [3]. Обработка данных наблюдений в оперативном режиме осуществляется в оперативно-прогностических подразделениях (далее – оперативное подразделение) ЦГМС и УГМС, занятых оперативно-прогностической деятельностью и гидрометеорологическим информационным обслуживанием, которое осуществляется в соответствии с требованиями наставления по службе прогнозов [4]. Первичная обработка гидрологических данных в оперативном режиме выполняется по всем информационным гидрологическим постам (ГП), в том числе по всем действующим автоматизированным гидрологическим постам (АГП).

4.2 Обработка данных гидрологических наблюдений в оперативном режиме осуществляется как для АГП, так и для ГП, наблюдения на которых выполняются ручным способом с использованием стандартных средств измерения (СИ): переносной рейки на свае или стационарной рейки.

4.3 Списки ГП, по которым ведется оперативная обработка данных об уровнях воды и вычисляются расходы воды в оперативном режиме формируются в оперативных подразделениях УГМС, ЦГМС, специализированных гидрометеорологических обсерваторий (СГМО) или гидрометеорологических бюро (ГМБ). Списки формируются пообъектно: по бассейнам отдельных рек, водохранилищ и озер. ГП в списках располагаются в соответствии с гидрографической схемой территории. Для формирования таких списков целесообразно использовать файлы технологии «РЕКИ-РЕЖИМ», включающие списки, сформированные в соответствии с публикуемыми справочниками ЕДС (файлы с именами «SPISOKnn.txt»). Каждый файл «SPISOKnn.txt» содержит основные справочные данные ГП, публикуемых в конкретном выпуске ЕДС с номером «nn».

4.4 Для контроля поступающей гидрологической информации и отбраковки данных с грубыми погрешностями целесообразно использовать файлы технологии «РЕКИ-РЕЖИМ» с паспортными данными ГП, размещенные в директории «pas» и содержащие основные, редко изменяющиеся характеристики ГП (кодовый номер ГП и водного объекта, название ГП, площадь водосбора и пр.), а также многолетние предельные значения гидрологических параметров, которые необходимы для выполнения контроля поступающих данных об уровнях воды.

4.5 Оперативная обработка данных ведется в режиме реального времени сразу после поступления информации в оперативное подразделение гидрологической сети. С этой целью в этом подразделении создается рабочая база данных (БД) для оперативного учета стока. Рекомендуемые формы таблиц такой БД приведены в приложении А. Таблицы БД рекомендуется создавать в электронном виде на персональном компьютере гидролога-прогнозиста. Значения расходов воды в оперативном режиме вычисляются для каждого измеренного срочного значения уровня воды.

4.6 Методика обработки данных многосрочных (учащенных) наблюдений за уровнем воды в оперативном режиме разработана с использованием положений методики обработки режимной информации по уровням воды при наличии АГК, утвержденной на методической комиссии ФГБУ «ГГИ» (протокол № 1 от 11.02.2014) и

рекомендованной для использования при обработке данных в технологии «РЕКИ-РЕЖИМ».

В настоящих рекомендациях приведены приемы контроля исходной гидрологической информации, которые используются при обработке данных в технологии «РЕКИ-РЕЖИМ».

4.7 Предлагаемые методы оперативного учета стока опираются на многолетние разработки отдела гидрометрии и гидрологической сети ФГБУ «ГГИ» по вопросам гидрометрического учета стока. В ней используются те же методические подходы, что и для варианта режимного учета стока, уже реализованные в компьютерной технологии «РЕЧНОЙ СТОК».

4.8 Методы оперативного учета стока учитывают различные условия протекания потока и изменения пропускной способности русел рек, включая:

- свободное состояние русла при наличии однозначных многолетних или годовых зависимостей расходов от уровней воды;

- свободное состояние русла и при изменяющихся гидравлических условиях, в том числе при деформациях русла:

- ледостав и ледообразование;

- зарастание русла.

4.9 Разработанные методы расчета изложены в алгоритмической форме и легко могут быть реализованы в виде компьютерной программы.

4.10 Примеры оперативного учета стока представлены в приложениях Г, Д, Е, Ж, И, К, Л к настоящим рекомендациям.

5 Методы оперативной обработки измерений уровней воды

5.1 Порядок получения и передачи данных наблюдений

5.1.1 В ходе и модернизации гидрологической сети Росгидромета пункты наблюдений оснащаются различными комплектами оборудования, которые в зависимости от возможной степени автоматизации наблюдений подразделяются на следующие типы:

- неавтоматизированные ГП с наблюдателем, ежедневные и эпизодические измерения на которых выполняются полностью наблюдателем ГП;

- АГП, работающие в автономном режиме без наблюдателя, где ежедневные измерения выполняются полностью автоматически, а эпизодические измерения расходов воды, наносов, снегосъемки и некоторые другие виды работ – специалистами наблюдательных подразделений с использованием оборудования мобильных гидрологических лабораторий;

- АГП, работающие с наблюдателем, где ежедневные измерения уровней воды выполняются полностью автоматически с использованием АГК, а остальные наблюдения, предусмотренные программой ГП, выполняются наблюдателем ГП.

5.1.2 Данные наблюдений с АГК и от наблюдателя различными путями (с использованием сетей сотовых или спутниковых операторов) автоматически поступают в центры сбора данных (ЦСД), где сохраняются в БД в виде измеренных значений. Измерения, выполненные наблюдателем вручную, также поступают в БД.

В БД ЦСД обязательно должно быть предусмотрено получение и хранение не только данных ежедневных двухсрочных или многосрочных наблюдений, но и данных эпизодических измерений расходов воды. Рабочее место гидролога-прогнозиста может располагаться в ЦГМС, УГМС или в других подчиненных им сетевых подразделениях (например, в СГМО или ГМБ), занимающихся обработкой оперативной информации. Необходимо, чтобы с рабочего места гидролога-прогнозиста был обеспечен свободный доступ к БД ЦСД в любое время суток.

5.1.3 Все измеренные на ГП значения уровня воды, поступившие в БД ЦСД, должны пройти первичный контроль, в процессе которого производится проверка полноты и оценка их качества. При этом выявляются и последовательно устраняются погрешности записи дат, времени или значений уровня, если они имеют место. Выполняется проверка на соответствие наблюденных данных об уровнях воды и величин интенсивности их изменения предельно возможным допустимым значениям. Дополнительная проверка данных АГК проводится на основе их сравнения с данными контрольных измерений по сваям или рейкам ГП.

По результатам выполненного первичного контроля данных АГК гидролог-прогнозист принимает решение о том, принимать данные автоматизированных наблюдений для оперативного учета стока или нет.

5.2 Создание рабочей базы данных для оперативного учета стока

5.2.1 Для оперативной обработки гидрологических и метеорологических данных наблюдений, и выполнения расчетов оперативных расходов воды создается рабочая БД оперативного учета стока. Рекомендуемые формы таблиц рабочей БД приведены в приложении А.

5.2.2 Таблицы А.1 и А.2 (приложение А) формируются на основе прошедших первичный контроль данных автоматизированных наблюдений за уровнем, температурой воды и осадками, находящихся в БД ЦСД. При отсутствии данных автоматизированных наблюдений этих характеристик таблицы формы таблиц А.1 и А.2 (приложение А) формируются по данным ручных наблюдений, выполненных наблюдателем ГП, переданных по каналам связи в коде КН-15 и занесенных в БД ЦСД.

5.2.3 В таблицу А1 (приложение А), аналогичную таблице оперативного журнала формы ГП-25 [4], помещаются сведения по всем информационным ГП. По каждому ГП в таблицу А.1 (приложение А) заносятся данные измерений, выполненные в стандартные сроки (8 и 20 ч местного времени). Кроме данных наблюдений за уровнями воды и значений изменения уровня воды за сутки между 8-ми часовыми сроками в эту таблицу заносится также информация о характерных уровнях на ГП:

- уровень выхода воды на пойму, $H_{\text{поймы}}$, см;
- уровень воды, при котором наблюдается неблагоприятное гидрологическое явление (НЯ), $H_{\text{НЯ}}$, см;
- уровень воды, при котором наблюдается опасное природное (гидрологическое) явление (ОЯ), $H_{\text{ОЯ}}$, см;
- максимальный наблюденный исторический уровень воды (МИУВ), $H_{\text{МИУВ}}$, см.

Все уровни заносятся в едином формате (в сантиметрах над «нулем» поста) с точностью до 1 см.

В графу 10 заносятся значения оперативных расходов воды $Q_{\text{оп}}$ в эти же сроки. Значения $Q_{\text{оп}}$ для сроков 8 и 20 ч выбираются из рабочей таблицы А.2 (приложение А).

В таблицу А.1 (приложение А) заносятся также необходимые для оперативного учета стока и гидрологического прогнозирования следующие данные, наблюденные в стандартные сроки (8 и 20 ч):

- температура воды;
- сумма осадков за 12 ч;

- температура воздуха;

- толщина льда;

- состояние водного объекта (СВО).

5.2.4 Для анализа исходной гидрологической информации для целей оперативного учета стока и гидрологического прогнозирования часто необходимы сведения о температуре воздуха. Эта информация формируется из БД ЦСД по данным ГП или по ближайшей к ГП метеостанции и заносится в соответствующую графу таблицы А.1 (приложение А). Информация о температуре воздуха используется только за стандартные сроки наблюдений 8 или 7 и 20 или 19 ч. Если наблюдения за температурой воздуха на метеостанции производится в 7 и 19 ч, а не в 8 и 20 ч, информация об этом заносится в графу «Примечание».

5.2.5 Сведения о СВО и ледовых явлениях формируются по данным визуальных наблюдений, переданным в БД ЦСД наблюдателем ГП, или, при наличии фоторегистратора на ГП, по фотографиям. СВО кодируется по фотографиям специалистом-гидрологом и отправляется в БД ЦСД.

5.2.6 Данные о толщине льда заносятся в БД ЦСД и таблицу А.1 (приложение А) по мере их поступления.

5.2.7 В таблицу А.1 (приложение А) заносятся также данные по всем ведомственным ГП, которые используются в оперативной работе гидролога-прогнозиста.

5.2.8 Результаты оперативного учета стока (вычисления оперативных расходов воды) помещаются в таблицу А.2 (приложение А), которая формируется для каждого ГП отдельно. Таблица А.2 (приложение А) включает как исходные, так и рассчитанные данные за все сроки, в которые есть наблюдения за уровнем воды.

5.2.9 По каждому ГП за каждый имеющийся срок наблюдения в таблицу А.2 (приложение А) заносится следующая исходная информация об уровнях воды:

- дата в формате «ЧЧ.ММ.ГГГГ»;

- время срока наблюдения в формате «ЧЧ.ММ» с точностью до минут;

- СВО;

- срочный наблюденный уровень воды, H, см

5.2.10 Помимо перечисленных в 5.2.9 характеристик в таблицу А.2 (приложение А) заносятся полученные в результате оперативной обработки следующие данные:

- расход воды, вычисленный по опорной кривой расходов $Q_{КР}$, м^3/с;

- метод расчета оперативного расхода воды;

- значение оперативного расхода воды $Q_{оп}$, м^3/с;

- средний суточный уровень воды за предшествующие сутки $H_{ср}$, см;

- средний суточный оперативный расход воды за предшествующие сутки $Q_{ср}$, м^3/с;

- низший уровень воды за предшествующие сутки $H_{низш}$, см;

- наименьший оперативный расход воды за предшествующие сутки $Q_{наим}$, м^3/с;

- срок наблюдения низшего уровня воды за предшествующие сутки;

- высший уровень воды за предшествующие сутки $H_{высш}$, см;

- наибольший оперативный расход воды за предшествующие сутки $Q_{наиб}$, м^3/с;

- срок наблюдения высшего уровня воды за предшествующие сутки.

В графу «Метод расчета» заносится код принятого метода расчета оперативного расхода воды в соответствии с таблицей А.3 (приложение А).

Средние суточные значения уровня $H_{ср}$ и оперативного расхода воды $Q_{ср}$, а также их высшие ($H_{высш}$, $Q_{наиб}$) и низшие значения ($H_{низш}$, $Q_{наим}$) с указанием срока их наблюдения помещаются в строке, соответствующей последнему сроку наблюдения в расчетные сутки.

5.2.11 Для целей оперативного учета стока также формируется таблица А.4 (приложение А) измеренных расходов воды (ИРВ), значения которых поступают в БД ЦСД автоматически или заносятся гидрологом-прогнозистом на следующий день после измерения расхода воды.

5.2.12 Данные АГК при формировании файла исходных данных округляются и заносятся с точностью, принятой для измерений ручным способом уровень воды с точностью до сантиметра, температура воды и воздуха – до десятых долей градуса, сумма осадков – до десятых долей миллиметра, толщины льда – до 1 см.

5.3 Анализ полноты данных автоматизированных гидрологических комплексов

5.3.1 Анализ полноты данных АГК заключается в проверке наличия данных АГК за каждый срок, установленный по программе работы АГК.

Для каждого параметра (уровня воды, температуры воды, осадков) проверяется наличие данных АГК за каждые сутки.

5.3.2 Если в конкретные сутки данные по АГК полностью или частично отсутствуют, то в графу «Примечание» таблицы А.1 (приложение А) рабочей БД заносится сообщение следующего содержания:

- «информация по АГК за ЧЧ.ММ.ГГ отсутствует», если данные в течение суток отсутствуют полностью;

- «информация по АГК за ЧЧ.ММ.ГГ отсутствует с ЧЧ.ММ по ЧЧ.ММ», если данные в течении суток отсутствуют частично.

Данные за сутки считаются частично отсутствующими, если в эти сутки нет значения параметра в сроки 8 ч или 20 ч, при этом проверяются только часы без учета минут.

5.3.3 Для суток с частично отсутствующими данными гидролог-прогнозист принимает решение об использовании на этапе обработки данных АГК за прошедшие сутки или игнорирует неполные данные АГК и дополняет их или заменяет данными измерений стандартными СИ, которые также считываются из ЦСД. Таким образом, для суток с частично отсутствующими данными АГК выполняется объединение данных АГК и ручных измерений.

5.4 Контроль и оценка качества данных об уровнях воды

5.4.1 Все поступающие данные об уровнях воды автоматизированных ($H_{АГК}$) и ручных ($H_р$) наблюдений должны быть подвергнуты проверке на достоверность. С этой целью выполняется контроль соответствия наблюденных данных об уровнях воды и величин интенсивности их изменения предельно возможными допустимым значениям этих характеристик. Дополнительная проверка данных АГК проводится на основе их сравнения с данными контрольных измерений по сваям или рейкам ГП.

5.4.2 При сравнении поступившего значения уровня воды с экстремально низким $H_{э.низш}$ и экстремально высоким значением $H_{э.высш}$ на данном ГП должны выполняться следующие соотношения:

- для данных АГК

$$H_{э.низш} < H_{АГК} < H_{э.высш}; \quad (1)$$

- для данных ручных наблюдений

$$H_{э.низш} < H_р < H_{э.высш}. \quad (2)$$

5.4.3 Сведения об экстремально возможных значениях уровня воды в сантиметрах и интенсивности его изменения в сантиметрах в час (см/ч) приведены в файлах паспортов ГП, использующихся для автоматизированного контроля данных в технологии «РЕКИ-РЕЖИМ» (директория «pas»).

Интенсивность изменения уровня воды выражается в единицах измерения «см/ч» и рассчитывается как частное от деления $\Delta H/\Delta t$, где $\Delta H = H_{(i+1)} - H_i$ – разность значений уровней воды между ($i+1$)-м и i-м сроками наблюдений; а Δt – интервал времени между ($i+1$)-м и i-м сроками наблюдений. Интенсивность изменения уровня воды рассчитывается для интервалов времени $\Delta t \geq 1$ ч.

5.4.4 При сравнении интенсивности изменения уровня воды между сроками наблюдений с допустимым наибольшим возможным изменением его величины для данного ГП должны выполняться следующие соотношения:

- для данных АГК

$$\Delta H_{АГКч} < \Delta H_{ч}, \quad (3)$$

- для данных ручных наблюдений

$$\Delta H_{р.ч} < \Delta H_{ч}, \quad (4)$$

где $\Delta H_{ч}$ – допустимое наибольшее возможное изменение уровня воды за 1 час.

5.4.5 При сравнении данных АГК и ручных измерений наблюдателя в стандартные сроки. должны выполняться соотношения (5) и (6).

$$| H_{АГК8\text{-}00} - H_{р.8\text{-}00} | \leq 3 \text{ см}; \quad (5)$$

$$| H_{АГК20\text{-}00} - H_{р.20\text{-}00} | \leq 3 \text{ см}. \quad (6)$$

Для результатов сравнения данных АГК и данных ручных наблюдений формируется таблица А.5 (приложение А).

В графе «Примечание» таблицы А.5 (приложение А) указывается выявленная причина расхождения между данными АГК и наблюдателя, если оно превышает допустимые значения по критериям (5) и (6).

Данные, для которых не выполняются критерии (1) – (6), должны быть помечены как сомнительные, и гидрологом-прогнозистом принято решение об отбраковке данных АГК или проведении дополнительного анализа для выявления причин нарушения критериев (1) – (6).

5.4.6 Для оценки достоверности данных АГК и наблюдателя и выявления причин недопустимых расхождений выполняется сравнение данных АГК по ГП, для которого выполняется анализ достоверности данных, с данными АГК на смежных ГП на той же реке или на ближайших ГП на реках того же бассейна. Такое сравнение выполняется на основе построения совмещенных по нескольким ГП хронологических графиков хода уровня воды. Если на водосборе, который замыкает расчетный створ ГП, не наблюдалось аномальных явлений, уровни воды на смежных ГП должны изменяться синхронно. С этой же целью выполняется анализ совмещенных хронологических графиков хода уровней воды, осадков, температуры воздуха, состояния водного объекта. Резкие изменения уровня воды могут быть обусловлены:

- прохождением дождевого паводка, сформировавшегося на водосборе;
- увеличением интенсивности снеготаяния, а, следовательно, и поступления воды в русло при повышении температуры воздуха;
- заторными или зажорными явлениями в русле;
- установлением ледостава или вскрытием ледяного покрова.

5.4.7 Если причину резкого изменения уровня воды в данных АГК установить не удалось, необходимо срочно принять меры по их выявлению: выполнить контрольное измерение уровня воды с использованием стандартных СИ, проверить исправность всех элементов оборудования АГК.

5.4.8 Для вычисления оперативных расходов воды используются только данные об уровнях воды, прошедшие первичный контроль и признанные достоверными.

5.5 Порядок ежедневной оперативной обработки уровней воды

5.5.1 При ежедневной оперативной обработке данных гидрологических наблюдений задача состоит в обеспечении использования в системе оперативного учета стока данных АГК и объединении потока данных от АГК и потока данных наблюдений и измерений, выполненных ручным способом.

В процессе объединения особую сложность представляют следующие моменты:

- АГК может начать работу с любого времени любой даты месяца;

- в течение суток интервал измерений уровней воды с помощью АГК может изменяться. Например, интервал измерений в обычном режиме может составлять один час, а в штормовом режиме – 15 мин и менее;

- данные АГК могут отсутствовать или быть забракованы в какой-то период времени в течение суток;

- данные АГК по уровням воды обязательно должны быть дополнены сведениями о состоянии водного объекта, без которых невозможен оперативный учет стока в условиях зарастания русла в летний период, ледообразования и разрушения льда в переходные периоды осенью и весной, при устойчивом ледоставе в зимний период.

5.5.2 Ежедневная оперативная обработка информации по уровням воды выполняется сразу после поступления данных с ГП, в том числе и АГП. Вся поступившая информация подвергается анализу и контролю качества по 5.3 и 5.4. Далее в оперативной обработке используются уже признанные достоверными данные наблюдений.

5.5.3 Ежедневная оперативная обработка уровней воды выполняется в следующей последовательности.

5.5.3.1 В таблицу А2 (приложение А) по каждому ГП заносится информация об уровнях воды за каждый имеющийся срок наблюдения в соответствии с 5.2.9;

5.5.3.2 В таблицу А1 (приложение А) заносится информация в стандартные сроки наблюдений:

- срочный уровень за 20-ти часовой срок предшествующих суток;

- срочный уровень за 8-ми часовой срок текущих суток;

В условиях паводков, когда необходимо отслеживать изменение уровня воды в учащенном режиме, для целей оперативного учета стока на реках с быстро развивающимися паводками в таблицу А.1 (приложение А) необходимо заносить уровни во все наблюденные сроки вплоть до интервала в 15 мин и менее.

Необходимость использования учащенных данных наблюдений за уровнем воды для целей оперативного учета стока может возникать также в условиях изменения пропускной способности русла при ледообразовании, разрушении льда, переменном подпоре, неустановившемся движении, обусловленным попусками с вышерасположенной гидроэлектростанции В таких случаях таблица А.1 (приложение А)

формируется по всему списку информационных постов за все стандартные и нестандартные, определенные гидрологом-прогнозистом, сроки наблюдений.

5.5.3.3 Определяются и заносятся в таблицу А2 (приложение А) средний и характерные (высший и низший) уровни воды за предшествующие сутки.

5.3.4 Для вычисления среднего суточного уровня за предшествующие сутки необходимо проанализировать полученные данные срочных наблюдений за уровнями воды.

5.5.4.1 Если в полученной таблице А.2 (приложение А) за прошедшие сутки нет пропусков наблюдений и наблюдения выполнены через равные промежутки времени в течение всех суток, то средний суточный уровень воды за прошедшие сутки определяется как среднее арифметическое из всех наблюденных значений уровня воды.

5.5.4.2 Если для рассматриваемых суток специалист-гидролог принял решение об игнорировании неполных данных АГК и использовании занесенных вручную данных, то для расчета среднего суточного уровня воды используются только данные ручных измерений. Средний суточный уровень воды вычисляется как среднее арифметическое из значений, наблюденных в 8 и 20 ч.

При отсутствии реального значения уровня воды хотя бы в один из двух стандартных сроков средний суточный уровень воды не определяется, формируется признак пропуска наблюдений.

5.5.4.3 Если интервал между измерениями уровня воды с помощью АГК или ручным способом изменялся в течение прошедших суток, то определение среднего суточного уровня воды производится по всем имеющимся в файле данных АГК измерениям уровня воды следующим образом.

Средний суточный уровень воды $H_{ср}$, см определяется по формуле среднего взвешенного значения. При этом, если имеется уровень в 0 ч текущих суток, то он также участвует в расчете и принимается за 24 ч предшествующих суток.

$$H_{ср} = ((H_1 + H_2)(T_2 - T_1)/2 + (H_2 + H_3)(T_3 - T_2)/2 + \ldots + (H_{n-1} + H_n)(T_n - T_{n-1})/2) / (T_n - T_1), \quad (7)$$

где $H_{ср}$ – средний суточный уровень воды, см;

T_1, T_2, …, T_n – сроки наблюдений, следующие в хронологически возрастающем порядке, в сутках;

H_1, H_2, ..., H_n – значения уровня воды в сантиметрах в соответствующие сроки T_1, T_2, ..., T_n.

Вычисление производится по неокругленным данным, затем средний суточный уровень воды округляется до целых сантиметров.

Таким же образом рассчитывается средний суточный уровень воды по данным ручных наблюдений в стандартные и нестандартные сроки. При этом, значение уровня воды на 1 ч предшествующих суток и 0 ч текущих (или 24 ч предшествующих) суток вычисляются методом линейной интерполяции между смежными наблюденными значениями, в интервал между которыми попадает срок 1 или 24 ч предшествующих суток.

5.5.5 Высший $H_{высш}$ и низший $H_{низш}$ уровни воды за сутки определяются из тех же значений уровня воды, прошедших первичный контроль, что и средний суточный уровень. Выбранные значения округляются до целых сантиметров.

5.5.6 По занесенным кодам СВО в рассматриваемые сутки проверяется наличие затора, зажора, сгона, нагона, а также подпора от плотины, озера (реки), засорения русла, мостовых переправ. Если хоть одно из этих явлений имело место, то выбранным экстремальным за сутки уровням присваивается признак подпора, отметка о котором делается в графе «Примечание» таблицы А1 (приложение А). Этот же признак присваивается среднему суточному уровню воды.

6 Методы оперативного учета стока

6.1 Задача и основные положения методики оперативного учета стока

6.1.1 Задача оперативного учета стока заключается в получении срочных и ежедневных значений расходов воды (ЕРВ) по данным актуальных (оперативных) наблюдений за уровнем воды и совокупности ИРВ, выполненных в период, предшествующий моменту расчета. Отличие оперативного учета стока от режимного заключается в следующем. Режимные характеристики 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. При этом специалист-гидролог располагает сведениями о состоянии пропускной способности русла (ПСР) реки на моменты

измерений расходов воды и должен воспроизвести эти характеристики в интервалах между измерениями, т. е. выполнить их интерполяцию в ретроспективном варианте. Оперативный же учет стока ведется в условиях существенно меньшей определенности, связанной с необходимостью прогнозировать (экстраполировать) характеристики ПСР в промежутке времени от даты состоявшегося измерения до текущего момента времени. Поэтому важно, чтобы оба варианта учета стока опирались на единую объективную основу, учитывающую особенности изменения ПСР в конкретном гидрометрическом створе. Это позволит преодолеть разрыв между оперативными и режимными данными. До настоящего времени нередко оперативные значения расходов воды до 30 % – 50 %, а иногда и до 100 % отличаются от данных, публикуемых в ежегодниках.

6.1.2 Как в режимном, так и в оперативном вариантах учета стока в качестве первого приближения к значению расхода воды при фиксированном уровне принимается значение расхода воды, полученное по опорной кривой расходов (КР) (зависимости расходов от уровней воды $Q(H_t)$ для текущего уровня воды H_t. Для уточнения расхода, вычисленного по опорной КР, используются поправки к ней $\tilde{q}_t$, которые вычисляются с использованием того или иного способа экстраполяции характеристик изменения ПСР [5] – [7].

6.1.3 В общем случае значение оперативного расхода воды на момент (срок) t $Q_{оп}$, м^3/с, вычисляется по формуле

$$Q_{оп}=Q(H_t)(1+\tilde{q}_t). \quad (8)$$

В качестве характеристик изменения ПСР во времени используются относительные отклонения ИРВ $\tilde{q}_и$ от опорной зависимости $Q(H)$

$$\tilde{q}_и=\frac{Q_и - Q(H_и)}{Q(H_и)}, \quad (9)$$

где $Q_и$ – ИРВ, м^3/с;

$Q(H_и)$ – расход воды, полученный по КР $Q(H)$ для уровня $H_и$, зафиксированного во время измерения расхода воды $Q_и$, м^3/с.

Изменения ПСР происходят 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 ниже притоков или размещенных в русле гидротехнических сооружений и т.п. Влияние этих факторов обусловливает разброс точек ИРВ относительно аппроксимирующей зависимости $Q(H)$ и составляет физическую причину отклонений $\tilde{q}_и$. Хронологическая последовательность отклонений $\tilde{q}(t)$ рассматривается при этом как случайный временной процесс и, следовательно, для анализа и расчета характеристик этого процесса могут использоваться различные методы интерполяции и экстраполяции случайных временных рядов.

Наиболее обоснованным и простым при расчетах оказывается оперативный учет стока в условиях свободного состояния русла при наличии многолетней кривой расходов (МКР) $Q(H)$, освещенной измерениями в широком диапазоне изменения уровней воды, включая их минимальные и максимальные многолетние значения, и подтвержденной измерениями расходов воды расчетного года. В этом случае оперативные значения ЕРВ определяются непосредственно по многолетней кривой расходов (МКР) или соответствующему ей аналитическому уравнению регрессии (УРМ), аппроксимирующему многолетнюю кривую расходов воды по уровням. Поправка $\tilde{q}_t$ в уравнении (8) в этом случае в условиях свободного состояния русла равна 0. Если же зависимость $Q(H)$ сохраняет свою однозначность лишь в течение одного года, задача вычисления оперативных ЕРВ становится не столь тривиальной. Располагая неполной совокупностью измерений расходов воды, состоявшихся от начала года до момента расчета, невозможно получить надежную зависимость $Q(H)$ во всем диапазоне изменения уровня воды, поэтому задача оперативного учета стока дополняется необходимостью экстраполяции этой зависимости за пределы диапазона измерений расходов воды.

Нарушение однозначности КР происходит также в условиях сезонного изменения ПСР при наличии ледовых явлений в зимний и переходные периоды и зарастания в теплое время года.

6.2 Выбор расчетной зависимости расходов от уровней воды и оценка ее однозначности

6.2.1 В соответствии с основными положениями методики, изложенными в 6.1, прежде всего для исследуемого гидрометрического створа необходимо выбрать

опорную КР, которая будет использоваться для расчета оперативных расходов воды. В качестве опорной КР для оперативного учета стока рекомендуется принимать:

- МКР в случаях, когда в течение последних нескольких лет не происходило существенных изменений русла и режима реки;

- КР, полученную по данным ИРВ одного-двух последних лет, если такие изменения прослеживались.

Об изменениях, происходящих в русле реки, можно судить на основе анализа положения годовых КР на графике *Q(H)* и хронологических графиков изменения средних и минимальных отметок дна в исследуемом гидрометрическом створе в течение ряда лет.

6.2.2 Для удобства выполнения расчетов необходимо представить зависимость в виде аналитического выражения, то есть выполнить аппроксимацию зависимости расходов от уровней воды *Q(H)*. Уравнение аналитической зависимости расходов от уровней воды может быть получено непосредственно по данным совокупности ИРВ за многолетие при использовании в качестве опорной МКР или по совокупности данных одного или двух последних лет. Аналитическое уравнение может быть получено также по данным (опорным точкам) таблицы координат выбранной для использования опорной КР.

Для аналитической аппроксимации зависимости расходов Q от уровней воды H рекомендуется использовать следующие уравнения [5]:

параболу Глушкова

$$Q(H) = a(H - H_0)^b, \quad (10)$$

или полиномиальную зависимость в виде

$$Q = a_0 + a_1 H + a_1 H^2 + \ldots + a_m H^m, \quad (11)$$

где Q – расход воды, м^3/с;

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

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

a и b – параметры уравнения (10), определяемые при аппроксимации по данным совокупности ИРВ;

$a_{0,\ldots}$, a_m – параметры уравнений регрессии (УР) расходов по уровням воды в форме полинома (11).

Аппроксимация зависимости расходов от уровней воды выполняется с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [8]. Для удобства представления коэффициентов аналитических уравнений при выполнении расчетов по МНК значения уровней рекомендуется выражать не в сантиметрах над «нулем» поста, как это принято в гидрологии, а в метрах над «нулем» поста.

Подробный алгоритм аппроксимации изложен в приложении Б, примеры такой аппроксимации даны в приложениях Г и Д.

6.2.3 Для принятия решения об использовании того или иного метода учета стока необходимо выполнить оценку однозначности полученной опорной зависимости расходов от уровней воды. Такая оценка выполняется на основе анализа рядов относительных отклонений ИРВ $\tilde{q}_и$ от опорной КР $Q(H)$ и оценки их статистических параметров, а именно: оценки случайности этого ряда и сопоставления его дисперсии с дисперсией случайных погрешностей измерения расходов воды. Подробный алгоритм оценки однозначности и критерии, по которым она выполняется приведены в приложении В. Опорная зависимость расходов от уровней воды признается однозначной, если выполнены критерии В.4 и В.5 (приложение В) и ряд $\tilde{q}(t)$ случаен.

6.3 Оперативный учет стока при наличии однозначной многолетней кривой расходов

6.3.1 Как уже отмечалось выше, наиболее обоснованным и простым при расчетах оказывается оперативный учет стока при наличии МКР, освещенной измерениями во всем диапазоне изменения уровней воды, включая минимальные и максимальные исторические значения. МКР может считаться обоснованной, если она получена при использовании данных ИРВ не менее чем за три года наблюдений на ГП. Для ГП с длительными рядами наблюдений рекомендуется использовать сведения об ИРВ за последние 10 лет; данные предшествующего периода привлекаются для аппроксимации МКР только в случаях, когда они освещают исключительно высокие паводки и могут уточнить ее положение в верхней части.

6.3.2 МКР может считаться установленной, если:

- обоснована 50 – 60 измерениями расходов в течение не менее трех лет в периоды свободного состояния русла;

- ее экстраполяция не превышает вверх 15 %, вниз 5 % от полной амплитуды уровней за прошлые годы соответственно в верхнем и нижнем диапазонах уровней воды;

- в соответствии с приложением В установлена ее однозначность по методике оценки однозначности;

- точки ИРВ в пределах полосы рассеяния не образуют хронологически обособленных групп, обусловленных, например, прохождением паводочных волн или однонаправленных деформаций русла.

6.3.3 При установленном факте наличия однозначной МКР оперативные значения ЕРВ для данного ГП вычисляются непосредственно по МКР или соответствующему ей УРМ при подстановке в него соответствующего срочного оперативного значения уровня воды. Поправка $\tilde{q}_t$ в уравнении (8) при этом равна 0.

6.3.4 Для вычисления оперативных расходов воды рекомендуется использовать уравнение, полученное в ходе аппроксимации МКР, но допускается также использование координат этой зависимости, рассчитанных по всему диапазону изменения уровня воды в расчетном створе, представленных в табличной форме. Примеры аппроксимации МКР приведены в приложениях Г и Д.

6.3.5 Каждый вновь измеренный расход воды $Q_и$ текущего года используется для контроля и подтверждения положения многолетней зависимости $Q(H)$. Вычисляется относительное значение его отклонения от принятой для расчета МКР – δQ:

$$\delta Q = \frac{Q_и - Q_{МКР}(H_и)}{Q_{МКР}(H_и)}. \quad (12)$$

Здесь $H_и$ – уровень воды, наблюденный при измерении расхода воды.

МКР считается подтвержденной, если относительное отклонение δQ не выходит за пределы доверительного интервала среднеквадратического значения рассеяния многолетней связи $Q(H)$, а именно: с доверительной вероятностью 90 % выполняется соотношение:

$$\delta Q \le 2\tilde{\sigma}_{МКР}, \quad (13)$$

где $\tilde{\sigma}_{МКР}$ – относительное среднее квадратическое значение рассеяния многолетней зависимости расходов от уровней воды, которое рассчитывается по многолетней совокупности относительных отклонений $\tilde{q}$ от МКР.

$$\tilde{\sigma}_{МКР} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \tilde{q}}{(N-1)}, \quad (14)$$

где $\tilde{q}$ – относительное отклонение ИРВ от МКР, рассчитанное по формуле (9),

N – количество ИРВ в многолетней совокупности данных, принятых для получения МКР.

6.3.6 При анализе отклонений каждого вновь поступившего измерения от МКР может наблюдаться несколько случаев:

- соотношение (13) выполняется. Многолетняя зависимость *Q(H)* признается подтвержденной, значения оперативных расходов воды вычисляются непосредственно по МКР или аналитическому уравнению (УРМ);

- соотношение (13) не соблюдается, следовательно, МКР признается неподтвержденной. В этом случае требуется назначить дополнительное незапланированное измерение расхода воды в гидрометрическом створе и после поступления данных вновь выполнить проверку в соответствии с условиями (12), (13). Если по очередному ИРВ критерий (13) вновь не соблюдается, МКР признается неподтвержденной и не может быть принята в качестве опорной для оперативного учета стока. В этом случае при расчете оперативных расходов воды следует использовать метод, описанный в 6.5 для оперативного учета стока при отсутствии однозначной КР.

6.3.7 Каждый вновь измеренный расход воды для дополнительного визуального контроля наносится на график зависимости *Q(H)*, представленный на рисунке 1.

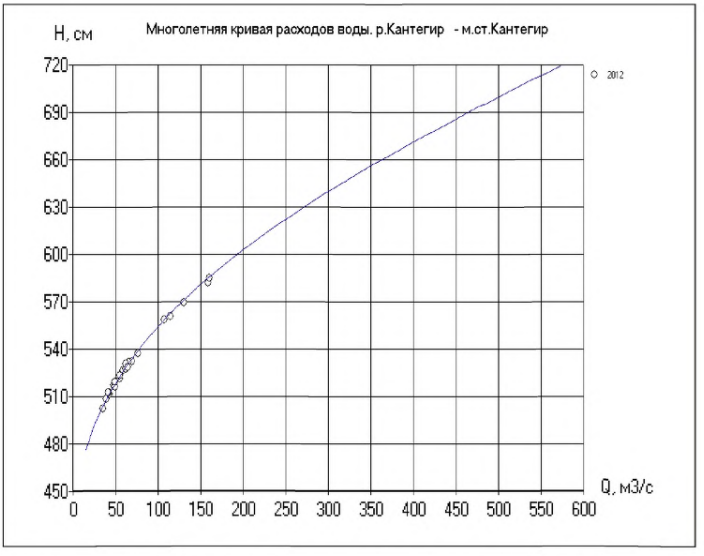


Рисунок 1 – МКР с нанесенными точками ИРВ расчетного года

6.4 Оперативный учет стока при наличии однозначной годовой кривой расходов

6.4.1 Если для расчетного ГП устойчивая МКР отсутствует, для оперативного учета стока рекомендуется использовать КР за один или два предшествующих года.

6.4.2 Годовая зависимость расходов от уровней воды, как правило, если это не выдающийся многоводный год, строится в ограниченном диапазоне уровней воды и для ее использования в целях оперативного учета стока в расчетном году требуется ее экстраполяция вверх и/или вниз за пределы диапазона уровней, освещенных измерениями расходов воды.

6.4.3 Экстраполяцию как вверх, так и вниз за пределы диапазона измерения рекомендуется выполнять с использованием данных ИРВ прошлых лет и расчетных значений расходов, полученных по уравнению, предложенному И. Ф. Карасевым [5]

$$Q_э = Q_i \left(\frac{\omega_э}{\omega_i}\right)^{m_i}, \quad (15)$$

где $Q_э$– расход воды в любой фазе водного режима за пределами диапазона измерений, который необходимо рассчитать, м^3/с;

Q_i – расход воды, вычисленный по УР $Q(H)$ в пределах диапазона измерений, м^3/с;

ω_i – площадь живого сечения потока, соответствующая Q_i и рассчитанная на основе поперечного профиля гидроствора или по уравнению зависимости $\omega(H)$, м^2;

$\omega_э$ – площадь живого сечения, соответствующая $Q_э$, м^2.

Параметр m_i для каждого интервала между измерениями расходов воды определяется по формуле

$$m_i = \frac{lnQ_i - lnQ_{i-1}}{ln\omega_i - ln\omega_{i-1}}, \quad (16)$$

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, м^3/с;

ω_i и ω_{i-1} – соответствующие расходам Q_i и Q_{i-1} значения площадей живого сечения, также полученные по зависимости $\omega(H)$, м^2.

6.4.4 Для расчета параметра m_i, кроме кривой расходов, требуется использовать зависимость площадей поперечного сечения в исследуемом гидростворе от уровня воды, полученную по данным промеров в гидростворе и нивелировки поперечного профиля до отметок наивысших наблюденных исторических уровней воды. Аппроксимация этой зависимости выполняется по алгоритму, описанному в приложении Б.

6.4.5 Расчет по формуле (16) будет корректен при условии, что расходы Q_i и Q_{i-1} не слишком близки между собой – модуль их разности должен существенно превышать погрешность измерения расходов воды, а его относительное значение составлять не менее 20 % от среднего значения расходов Q_i и Q_{i-1}.

Параметр m_i рекомендуется определять для нескольких пар расходов воды в пределах одной фазы водного режима и принимать осредненное в ее пределах значение. В диапазоне экстраполяции по формуле (15) рекомендуется вычислить не менее 7 – 10 расходов воды $Q_{эi}$.

6.4.6 Процедура экстраполяции зависимости $Q(H)$ выполняется с использованием метода кусочно-полиномиальной регрессии [5], [7] и состоит в следующем. По уравнению $Q(H)$, полученному в пределах диапазона уровней, освещенных измерениями расходов воды, вычисляется значение Q в верхней точке этой КР $Q(H_{вгр})$. За пределами этого диапазона уровней вплоть до наивысшего наблюденного уровня воды формируется совокупность, состоящая из отобранных ИРВ прошлых лет в этом диапазоне и рассчитанных по формуле (15) значений. Затем на основе метода полиномиальной регрессии с ограничениями определяются параметры зависимости $Q(H)$ в диапазоне экстраполяции.

Приведенный метод экстраполяции может быть использован как в верхней, так и в нижней частях диапазона изменения уровней и расходов воды.

6.5 Алгоритм оперативного учета стока в условиях свободного состояния русла при отсутствии однозначной кривой расходов

6.5.1 Основой для выбора метода гидрометрического учета стока служит оценка однозначности зависимости расходов от уровней воды, которая выполняется на основе сравнения дисперсии относительных отклонений ИРВ от осредняющей КР

и дисперсии случайных погрешностей ИРВ [7].

6.5.2 При получении оперативных значений расходов воды следует исходить из того, что принятая опорная КР *Q(H)* осредняет поле точек ИРВ за предшествующий период и, следовательно, лишь приближенно отражает характеристики ПСР. Поэтому значение расхода воды, полученное по опорной КР *Q(H)*, принимается в качестве детерминированной характеристики ПСР и является первым приближением к искомому значению расхода воды в оперативном варианте. Его можно существенно уточнить, если учесть изменения ПСР, нарушающие однозначность связи *Q(H)* в соответствии с основными положениями методики, изложенными в 6.1.

6.5.3 При оперативном учете стока необходимо получить значение поправки $\tilde{q}_t$ в формуле (8), опираясь на уже имеющиеся ИРВ, ряд $\tilde{q}(t)$ должен быть тем или иным способом проэкстраполирован в интервале от дня последнего измерения расхода воды до расчетной даты. С этой целью могут быть использованы различные методы экстраполяции [5], [9], [10].

6.5.4 При нарушении однозначности связи *Q(H)* временной ряд относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ включает в себя две составляющие: первую $\tilde{q}_S(t)$ – отражающую изменения гидравлико-морфологических условий протекания потока (сигнал), и вторую (белый шум) $\tilde{q}_N(t)$ – обусловленную случайными погрешностями измерения расходов воды [11]. При вычислении ЕРВ должна учитываться лишь первая составляющая случайного процесса $\tilde{q}_S$, вторую составляющую необходимо исключить. Это осуществляется с использованием методов фильтрации (выравнивания) временного ряда $\tilde{q}(t)$, иными словами, сглаживания случайных погрешностей измерения расходов воды. Одним из методов, позволяющих сглаживать случайные погрешности измерения, является метод оптимальной экстраполяции, в формулы для вычисления весовых коэффициентов которого входит мера погрешности измерения η [6], [10], [11]

$$\eta = \frac{\tilde{\sigma}_и^2}{\sigma_{\tilde{q}}^2 - \tilde{\sigma}_и^2}, \qquad (17)$$

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

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

6.5.5 При использовании метода оптимальной экстраполяции значение $\tilde{q}_t$ на любую дату в интервале от последнего ИРВ до расчетной даты представляется в виде суммы взвешенных результатов относительных отклонений нескольких n последних измерений [9], [10]:

$$\tilde{q}_t = \sum_{i=1}^{n} p_i \tilde{q}_i + \left(1 - \sum_{i=1}^{n} p_i\right) m_{\tilde{q}}, \quad (18)$$

где p_i – весовые коэффициенты;

$m_{\tilde{q}}$ – оценка математического ожидания (среднего значения) ряда элементов $\tilde{q}_и$.

Схема индексных обозначений для временного ряда отклонений $\tilde{q}(t)$ и интервалов между измерениями в случае, когда в расчете используются результаты двух последних измерений расходов воды, представлена на рисунке 2.

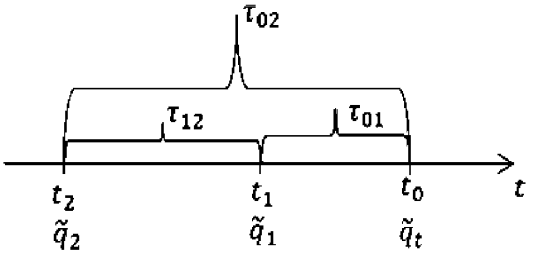
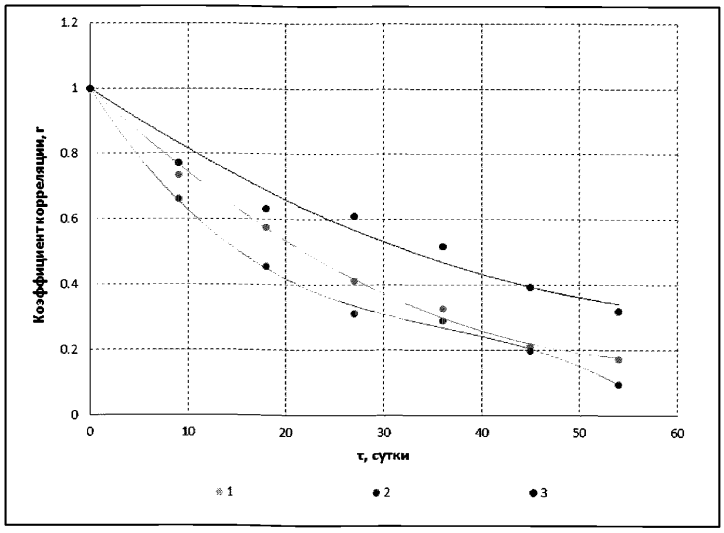


Рисунок 2 – Схема индексных обозначений элементов ряда отклонений $\tilde{q}(t)$

6.5.6 Для применения метода оптимальной экстраполяции требуется надежная оценка статистических характеристик процесса $\tilde{q}(t)$ (автокорреляционной функции (АКФ) и дисперсии). Такая оценка выполняется по данным прошлых лет для разных фаз водного режима отдельно для лет повышенной и средней водности и маловодных лет. Для получения более надежных статистических характеристик рядов $\tilde{q}(t)$ выбираются годы с наибольшим количеством ИРВ. Пример АКФ для лет различной водности приведен на рисунке 3.



1 – маловодных; 2 – средних по водности; 3 – многоводных

Рисунок 3 – АКФ временных рядов $\tilde{q}(t)$ в створе ГП р. Оскол – с. Ниновка

6.5.7 При использовании метода оптимальной экстраполяции элементов установлено, что для рядов гидрологических данных в расчетах достаточно опираться на два последних измерения расхода воды.

Расчет весовых коэффициентов оптимальной экстраполяции в этом случае производится по формулам:

$$p_1=\frac{(1+\eta)r(\tau_{01})-r(\tau_{12})}{(1+\eta)^2-[r(\tau_{12})]^2}; \quad (19)$$

$$p_2=\frac{(1+\eta)r(\tau_{02})-r(\tau_{12})}{(1+\eta)^2-[r(\tau_{12})]^2}, \quad (20)$$

где $r(\tau)$ – значения АКФ для интервалов времени;

τ_{01}, τ_{02} – интервалы времени от даты расчета оперативного расхода воды t соответственно до дат последнего t_1 и предпоследнего t_2 ИРВ;

τ_{12} – интервал времени между датами последнего t_1 и предпоследнего t_2 ИРВ.

6.5.8 Оценка математического ожидания (среднего значения) элементов относительных отклонений $\tilde{q}_1$ и $\tilde{q}_2$ двух последних измерений расходов воды от опорной КР вычисляется по формуле

$$m_{\tilde{q}}=\frac{\tilde{q}_1+\tilde{q}_2}{2}. \quad (21)$$

6.5.9 Иногда в расчетах приходится опираться только на одно последнее значение ИРВ. Это случается, например, при редких измерениях расходов воды, которые обусловливают малую корреляционную связанность отклонений от опорной КР. В этом случае необходимые характеристики вычисляются по формуле:

$$\tilde{q}_t = p_1 \tilde{q}_1, \tag{22}$$

где $\tilde{q}_1$ – относительное отклонение от опорной КР последнего ИРВ.

p_1 – коэффициент оптимальной экстраполяции, который вычисляется по формуле

$$p_1 = \frac{r(\sigma_{01})}{(1+\eta)}, \tag{23}$$

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

6.5.10 При невозможности надежной оценки АКФ, а, следовательно, и использования метода оптимальной экстраполяции, поправки $\tilde{q}_t$ рекомендуется вычислять методом скользящего среднего с использованием значений относительных отклонений двух или трех последних измерений расходов воды. Этим приемом также выполняется сглаживание случайных погрешностей измерения расходов воды.

Вычисление поправки для случая, когда в расчет принимаются данные только двух последних измерений расходов воды, производится по формуле

$$\tilde{q}_t = \frac{\tilde{q}_1 + \tilde{q}_2}{2}, \tag{24}$$

где $\tilde{q}_1$ и $\tilde{q}_2$ – значения относительных отклонений от КР соответственно последнего и предпоследнего ИРВ.

6.5.11 Оперативные расходы воды вычисляются ежедневно после поступления сведений о срочных уровнях воды для каждого измеренного значения срочного уровня воды по формуле (8) и заносятся в таблицу А.2 (приложение А).

Таким образом, значение поправки $\tilde{q}_t$ в формуле (8) в интервале от состоявшегося до очередного измерения расхода воды вычисляется в зависимости от принятого способа экстраполяции. При использовании метода оптимальной экстраполяции поправка $\tilde{q}_t$ вычисляется по формулам (18) и (22), а в случае экстраполяции сглаженного значения ряда отклонений – по формуле (24). В

последнем случае значение относительного сглаженного отклонения $\tilde{q}_t$, полученное по формуле (24), распространяется на весь период от состоявшегося вплоть до очередного измерения расхода воды.

6.5.12 Такой алгоритм используется в фазово-однородных диапазонах уровня воды. Для каждого гидрометрического створа на КР должны быть выделены фазово-репрезентативные уровни воды, соответствующие скачкообразному изменению характеристик ПСР. Первый из таких уровней соответствует уровню затопления русловых мезоформ, второй – выходу воды на пойму. Необходимо так планировать измерения расходов воды, чтобы они были приурочены к диапазонам фазово-репрезентативных уровней воды. Смена фазы происходит также при достижении максимального значения половодья или дождевого паводка. Это означает, что при смене фазы режима поправку в формуле (8) следует принимать равной значению относительного отклонения лишь последнего ИРВ, вычисленного по формуле (9).

6.5.13 Необходимость корректировки, вычисленной на начало расчетных суток поправки $\tilde{q}_t$ может возникнуть также при наличии информации об изменении СВО, например, фоторегистратором было зафиксировано, что на участке ГП произошло вскрытие ледяного покрова или образовался затор. В такой ситуации решение о корректировки значения поправки $\tilde{q}_t$ должен принять гидролог-прогнозист.

6.5.14 В ходе расчетов каждый очередной ИРВ $Q_и$ должен быть подвергнут объективной проверке его достоверности. Для этого согласно алгоритму, изложенному выше, вычисляется значение оперативного расхода воды на момент измерения, а именно, расход $Q_{оп}$ рассчитывается при использовании формулы (8) по значению среднего за время измерения уровня воды и данных двух последних ИРВ. Вычисленный расход $Q_{оп}$ используется для проверки достоверности вновь измеренного расхода воды $Q_и$ посредством сравнения их относительной разности $\frac{Q_и - Q_{оп}}{Q_{оп}}$ с относительной погрешностью оперативного учета стока $\tilde{\sigma}_{оп}$.

При сравнении значений $Q_и$ и $Q_{оп}$ могут наблюдаться следующие случаи:

- при выполнении условия

$$\frac{Q_и - Q_{оп}}{Q_{оп}} < 2\tilde{\sigma}_{оп}, \qquad (25)$$

последний ИРВ $Q_и$ признается достоверным. По его данным вычисляется относительное отклонение $\tilde{q}_{t_и}$, которому в соответствии со схемой индексных обозначений присваивается индекс 1 ($\tilde{q}_1$). Отклонение $\tilde{q}_1$, имевшее на предыдущем

этапе индекс 1, становится $\tilde{q}_2$. В последующие дни вплоть до очередного измерения расхода воды вычисления оперативных расходов выполняются по уже описанному алгоритму с учетом последнего ИРВ. При этом, если отсутствуют вычислительные погрешности, нет необходимости вносить какие-либо корректировки в значения оперативных расходов, вычисленных в день измерения до получения данных об ИРВ;

- при выполнении условия

$$\frac{Q_и - Q_{оп}}{Q_{оп}} > 3\tilde{\sigma}_{оп}, \qquad (26)$$

ИРВ $Q_и$ бракуется и не принимается для вычисления стока в последующие дни расчеты выполняются так, как если бы этого измерения не было. При необходимости измерение расхода воды должно быть произведено повторно;

- при выполнении условия

$$2\tilde{\sigma}_{оп} \le \left|\frac{Q_и - Q_{оп}}{Q_{оп}}\right| \le 3\tilde{\sigma}_{оп}, \qquad (27)$$

ИРВ признается вызывающим сомнение, и выполняется дополнительный анализ по оценке его достоверности. В случае, если в ходе анализа найдены подтверждения тому, что произошли значительные изменения ПСР, например, при изменении фазы водности с фазы подъема на фазу спада и наоборот, отклонению $\tilde{q}_{tи}$ присваивается индекс 1 ($\tilde{q}_1$), и в расчетах вплоть до следующего измерения расхода воды используется лишь последнее измерение, $\tilde{q}_t$ принимается равным $\tilde{q}_1$.

6.5.15 Примеры расчетов оперативных значений расходов воды с использованием вышеизложенного алгоритма представлены в приложениях Е и Ж.

6.5.16 Выбор наилучшего способа экстраполяции рядов $\tilde{q}(t)$ должен быть сделан на основе оценки эффективности методов по материалам проверки с использованием данных наблюдений прошлых лет. Относительная средняя квадратическая погрешность оперативного учета стока $\tilde{\sigma}_{оп}$ оценивается по эмпирическим данным на основе апробации методики также по материалам прошлых лет. Для ее оценки вычисляется среднее квадратическое значение расхождений данных оперативного и режимного учета стока.

6.6 Алгоритм оперативного учета стока в зимний и переходные периоды

6.6.1 Алгоритм оперативного учета стока с использованием данных о температуре воздуха

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

6.6.1.2 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 отмелых 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.

6.6.1.3 Для вычисления стока в зимний период в практике используются переходные коэффициенты $K_{зим}$ [12]

$$K_{зим} = Q_{зим}/Q_{УР}, \quad (28)$$

где $Q_{зим}$ – расход воды, измеренный при ледоставе, м^3/с;

$Q_{УР}$ – расход воды, полученный на основе КР или УР $Q(H)$ при уровне, к которому отнесены ИРВ, м^3/с.

Переходные коэффициенты связаны с отклонениями $\tilde{q}$ очевидным соотношением

$$\tilde{q} = K_{зим} - 1, \quad (29)$$

поэтому для зимнего и переходных периодов может быть использован тот же алгоритм оперативного учета стока, что и при свободном русле, т.е. формула (8).

6.6.1.4 В практике для учета стока в зимний и переходные периоды используются коэффициенты: начальный $K_{пн}$ (для предледоставного периода) и конечный $K_{вк}$ (для периода вскрытия и очищения реки ото льда), значения которых при открытом русле принимаются равными единице. В граничные даты ледостава значения $K_п$ и $K_в$ устанавливаются на основе некоторых качественных соображений и даже «импровизаций», как это отмечено в работе [13].

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

При оперативном учете стока в начале осеннего переходного периода $\tilde{q}_{пн}$ рекомендуется принимать равным соответствующему относительному отклонению от опорной КР последнего измеренного при свободном состоянии русла расхода воды.

6.6.1.4.1 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 нарастает $\delta_н$, как и толщина льда пропорционально корню квадратному из модуля суммы отрицательных температур воздуха от начала ледообразования [15]:

$$\delta_н \sim (|\sum t_i|)^{0.5}. \quad (30)$$

6.6.1.4.2 В период стаивания льда этот процесс по аналогии со стаиванием наледей [14] развивается более интенсивно: уменьшение массы ледяных образований $\delta_{ст}$ происходит пропорционально сумме положительных температур воздуха:

$$\delta_{ст} \sim \sum t_i. \quad (31)$$

6.6.1.4.3 Таким образом для осенне-зимнего переходного периода по данным прошлых лет следует построить график связи $\tilde{q}_t = f(|\Sigma t_i|)^{0.5}$, а для весеннего периода стаивания график связи $\tilde{q}_t = f(\Sigma t_i)$.

В этом случае для расчета оперативных расходов воды используются аналитические зависимости

$$\tilde{q}_{п} = \tilde{q}_{0} - a_{п}\left(\left|\sum_{1}^{\tau} t_i\right|\right)^{0.5}, \quad (32)$$

$$\tilde{q}_{в} = \tilde{q}_{вн} + a_{в}\left(\sum_{1}^{\tau} t_i\right), \quad (33)$$

где $\tilde{q}_{п}$ – относительное отклонение в предледоставном переходном периоде;

$\tilde{q}_{0}$ – относительное отклонение от опорной КР последнего расхода, измеренного в период, предшествующий появлению ледяных образований;

$a_{п}$, $a_{в}$ – коэффициенты, полученные для зависимостей (32) и (33) по данным прошлых лет;

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 оперативных значений расходов воды в переходные периоды используется формула (8).

Примеры расчета оперативных значений расходов воды за переходные периоды с использованием данных о температуре воздуха представлены в приложении И.

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

6.6.2.1 В период осеннего ледообразования и установления устойчивого ледостава часто наблюдаются заторные и зажорные явления, обусловливающие подпор уровней воды. При режимном учете стока принято выполнять срезку подпорных уровней воды, посредством соединения прямой линией точек в начале и

конце подпора на хронологическом графике уровней воды. В случае оперативного учета стока такая операция невозможна, поэтому рекомендуется опираться на физические закономерности изменения стока в этот период.

6.6.2.2 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.

6.6.2.3 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 [16]. 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 [16]

$$Q = \frac{Q_0}{(1+\alpha_0 T)^2}, \qquad (34)$$

где Q_0 – расход, при котором река переходит на подземное питание, м^3/с;

α_0 – константа истощения грунтового питания;

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

На самом деле уравнение (34) относится к отдельному водоносному горизонту. Исследованиями ГГИ [17] 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

$$\alpha_0 = \frac{\sqrt{Q_0/Q_T} - 1}{T}, \qquad (35)$$

где Q_0 – значение расхода в последний день открытого русла перед началом ледообразования, м^3/с;

Q_T – первый ИРВ при ледоставе, м^3/с;

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

В случаях, когда в осенний переходный период удается 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 оперативных значений расходов воды вплоть до следующего измерения расхода воды.

При низкой водности рек в предледоставный период и наличии подпорных явлений без большой потери точности можно рекомендовать при оперативном учете стока выполнять экстраполяцию значения расхода воды в последний день открытого русла, как константы, вплоть до первого измерения расхода воды при ледоставе.

Примеры расчетов оперативных расходов в период осеннего ледообразования, осуществленных с учетом закономерностей спада зимних расходов и истощения стока, показаны в приложении К.

6.7 Алгоритм оперативного учета стока при зарастании русла

6.7.1 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.

6.7.2 Традиционным методом учета стока в условиях зарастающего русла остается применение переходного коэффициента $K_{зар} = Q_{зар}/Q_0$, где $Q_{зар}$ и Q_0 – расходы воды, соответствующие зарастающему и свободному руслу при определенном уровне воды [12]. 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

$Q_0(H)$ 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.

6.7.3 В отделе гидрометрии ФГБУ «ГГИ» разработаны более совершенные модели учета стока в условиях зарастающего русла. Одна из них – интерполяционно-гидравлическая [18], в которой в качестве характеристики изменения пропускной способности русла используется параметр Великанова $m_з$, который определяется непосредственно по данным ИРВ

$$m_з = \sqrt{I/n_з} = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}}, \quad (36)$$

где ω– площадь поперечного сечения русла, м^2;

B – ширина русла, м;

I – уклон свободной поверхности;

$n_з$ – коэффициент шероховатости заросшего русла.

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.

При расчете оперативных расходов воды необходимо выполнять экстраполяцию значений «параметра Великанова» в интервале от состоявшегося до следующего измерения расхода воды, при этом метод из интерполяционно-гидравлического соответственно становится экстраполяционно-гидравлическим.

Для расчета оперативного расхода воды Q_t в м^3/с на момент времени t в этом случае используется формула

$$Q_t = m_{з_t} \frac{\omega_t^{5/3}}{B_t^{2/3}}, \quad (37)$$

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

$\omega_з$ –площадь поперечного сечения русла, м^2, полученная по зависимости $\omega_з(H)$ заросшего русла для значения уровня воды H на момент времени t;

B_t – ширина русла, м, полученная по зависимости $B_з(H)$ заросшего русла для значения уровня воды H на момент времени t.

6.7.4 В период зарастания может быть использован также алгоритм оперативного учета стока при нарушении однозначности зависимости $Q(H)$, описанный в 6.5 с некоторыми дополнениями. Как уже отмечалось в пределах отдельной фазы гидрологического режима хронологическую последовательность относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ можно считать реализацией квазистационарного случайного процесса. Его статистическими характеристиками служат: математическое ожидание, дисперсия, и АКФ. Эти характеристики получают на основе учащенных измерений расходов воды, выполненных в течение фазово-однородные 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 или неполные реализации цикла за период наблюдений $T_н$, и могут быть аппроксимированы периодической функцией – косинусоидой.

$$\tilde{q}(t) = a\cos(2\pi\tau/T_н + \phi), \qquad (38)$$

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

$T_н$ – продолжительность периода, в течение которого связь $Q(H)$ неоднозначна;

τ – параметр сдвига в долях $T_н$;

ϕ – фаза косинусоиды.

При таком представлении нормированная АКФ случайного процесса, представленного косинусоидой, также может быть выражена в виде тригонометрической функции, имеющей вид

$$r(t) = \cos(2\pi\tau/T_н). \qquad (39)$$

Это дает возможность оценивать АКФ временного ряда $\tilde{q}(t)$ без дополнительных учащенных измерений расходов воды, а, тем самым, оценить значения корреляционной связанности во времени характеристик ПСР в период зарастания и использовать для их экстраполяции метод, описанный в 6.5.

Для периода зарастания русла в летний период хронологический ход $\tilde{q}(t)$ может быть представлен половиной косинусоиды, как показано на рисунке 4.

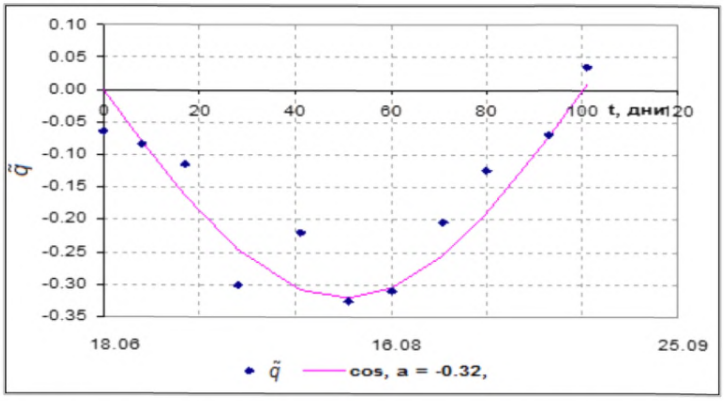


Рисунок 4 – Зависимость $\tilde{q}(t)$ в период зарастания русла с 18.06.2002 по 25.09.2002 включительно, р.Олонка - г.Олонец,

Уравнение косинусоиды, представленной на рисунке 4, в виде:

$$\tilde{q}(t) = -0,32\cos(2\pi t/200+3\pi/2). \quad (40)$$

Фаза косинусоиды ϕ для завитсимости на рисунке 4 составляет $3\pi/2$.

6.7.5 Алгоритм оперативного учета стока при таком представлении заключается в следующем:

- по данным одного или нескольких предшествующих лет выполняется аппроксимация рядов отклонений $\tilde{q}(t)$ с использованием функции косинусоиды в виде (38);

- вычисляются значения АКФ по формуле (39);

- вычисление оперативных расходов воды выполняется по алгоритму, описанному в 6.5 с использованием метода оптимальной экстраполяции и результатов аппроксимации ряда $\tilde{q}(t)$ в виде косинусоиды. При этом для вычисления поправки $\tilde{q}_t$ по формуле (18) вместо значения $m_{\tilde{q}}$ подставляется значение отклонения, вычисленное непосредственно по формуле (38).

6.7.6 Если в изменении пропускной способности русла в период зарастания не выявлено периодичности, согласно рисунку 5, для вычисления оперативных расходов воды в период зарастания для оперативного учета стока используется алгоритм, описанный в 6.5.

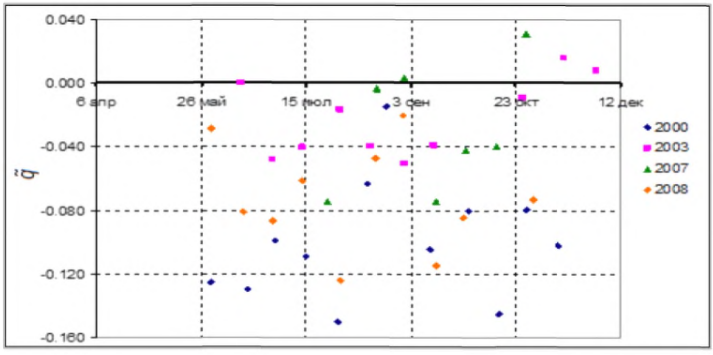


Рисунок 5 – Хронологический график $\tilde{q}(t)$ в период зарастания русла, р. Сосна – г. Елец

Примеры оперативного учета стока в условиях зарастающего русла приведены в приложении Л.

7 Пошаговый алгоритм обработки гидрологических данных наблюдений и оперативного учета стока

7.1 Перед началом сезона оперативного учета стока по всем ГП, по которым будет выполняться расчет оперативных значений расходов воды необходимо подготовить всю мало изменяющуюся в течение сезона информацию, необходимую для проверки достоверности исходной информации об ИРВ и выполнения расчетов:

- иметь оценки относительной случайной погрешности измерения расходов воды $\tilde{\sigma}_{и}$ и относительное среднее квадратическое значение погрешности оперативного учета стока $\tilde{\sigma}_{оп}$ (до получения достоверных оценок $\tilde{\sigma}_{оп}$ ее значение рекомендуется принимать равным 10 %);

- выбрать в соответствии с 6.2 опорную КР, получить ее аналитическое выражение в виде УР и выполнить оценку однозначности;

- в случае, если для расчетов выбрана зависимость $Q(H)$ одного или двух последних лет, выполнить ее экстраполяцию в соответствии с алгоритмом, изложенным в 6.4; для этой цели получить аналитическое выражение для зависимости площади поперечного сечения ω от уровня воды $\omega(H)$ во всем диапазоне изменения уровня воды;

- в случае, если зависимость *Q(H)* признана неоднозначной, необходимо установить причины неоднозначности и по данным прошлых лет получить статистические оценки рядов $\tilde{q}(t)$ (АКФ и дисперсии);

- перед началом расчетов иметь совокупность состоявшихся в текущем году ИРВ (если измерения состоялись) и последних ИРВ предшествующего года;

- по данным прошлых лет выполнить все необходимые проработки, чтобы иметь возможность использовать алгоритмы, описанные в 6.6 и 6.7, для оперативного учета стока в зимний и переходные периоды, а также при зарастании русел.

7.2 Текущая работа по оперативной обработке гидрологических данных и учету стока заключается в следующем:

- получение из базы данных ЦСД данных срочных наблюдений за уровнями воды как АГП, так и ГП, на которых наблюдения выполняются ручным способом;

- проверка качества данных наблюдений за уровнями воды и, при необходимости, их корректировка в соответствии с 5.3 и 5.4;

- формирование таблицы проверенных и принятых для расчета срочных данных наблюдений за уровнем воды за предшествующие и текущие сутки; занесение исходных данных в таблицы оперативной обработки гидрологических данных и оперативного учета стока А.1 и А.2 (приложение А);

- формирование таблицы ИРВ в виде таблицы А.4 (приложение А);

- непосредственное вычисление оперативных расходов воды.

8 Ежедневная обработка данных об уровнях и расходах воды в оперативном режиме и получение обобщенных характеристик

8.1 Порядок ежедневной оперативной обработки гидрологических данных различается в зависимости от того автоматизированы или нет наблюдения за уровнем воды. При оперативном учете стока необходимо учитывать следующее:

- если учет стока ведется по данным ручных наблюдений, вычисление оперативных расходов воды выполняется только в стандартные сроки наблюдений (8 и 20 ч) в обычном режиме и дополнительно в нестандартные сроки в период паводков и половодий. Таблица оперативного учета стока в форме А.2 (приложение А) заполняется только для этих сроков. Вычисленные оперативные значения расходов

воды заносятся также в таблицу оперативной обработки данных формы А.1 (приложение А);

- по данным наблюдений за уровнями воды, полученным с АГП, расчет оперативных значений расходов воды выполняется для всех наблюденных значений уровней воды. Таблица А.2 (приложение А) заполняется для всех сроков. В таблицу А.1 (приложение А) заносятся только данные в стандартные сроки;

- для контроля и визуализации данных каждое вновь полученное (при необходимости откорректированное) значение уровня воды и вычисленное значение оперативного расхода воды наносится на совмещенный хронологический график.

8.2 Порядок ежедневной оперативной обработки уровней воды осуществляется по 5.5. Аналогичный порядок обработки и обобщения данных выполняется и по данным оперативного учета стока. По данным об оперативных расходах воды необходимо получить значения следующих элементов оперативного учета стока:

- срочный расход воды за 8-ми часовой срок местного времени текущих суток;
- срочный расход воды за 20-ти часовой срок местного времени предшествующих суток;
- среднесуточный расход воды за предшествующие сутки;
- наименьший расход воды за предшествующие сутки;
- срок наблюдения наименьшего расхода воды за предшествующие сутки;
- наибольший расход воды за предшествующие сутки;
- срок наблюдения наибольшего расхода воды за предшествующие сутки.

8.3 По окончании декады и месяца вычисляются обобщенные за эти периоды характеристики уровней (средние, высшие и низшие) и расходов воды (средние, наибольшие и наименьшие), которые помещаются в таблицу формы А.6 (приложение А).

В графе «Примечание» таблицы А.6 (приложение А) делаются отметки о наличии дополнительных факторов, влияющих на изменение ПСР: заторах, зажорах, переменном подпоре, попусках вышерасположенной ГЭС и т. п.

Информацию о средних и характерных за многолетний период расходов и уровней воды за соответствующую декаду или месяц в таблице А.6 (приложение А) формируют специалисты-гидрологи.

В последней строке таблицы помещаются отклонения данных текущего года от их многолетних характеристик.

Приложение А

(рекомендуемое)

Формы и примеры заполнения таблиц для оперативного учета стока

Таблица А.1 – Форма и пример заполнения таблицы обработки гидрологических данных в оперативном режиме

Бассейн реки (моря)	Объект	Река	Гидрологический пост	Код поста	Дата, ЧЧ.ММ.ГГГГ	Срок наблюдения, чч-мм	Уровень, H, см	Изменения уровня, ΔH, см	Оперативный расход воды, $Q_{оп}$, м^3/с	Характерные уровни воды, см				Температура воды, °С	Сумма осадков, мм	Температура воздуха, °С	Толщина льда, см	СВО	Примечание*
										$H_{поймы}$	$H_{ня}$	$H_{оя}$	$H_{мив}$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
река Кубань	*Усть-Джегутинский ГУ***	*Учкулан*	*аул Хурзук*	*83207*	*27.06.2016*	*08.00*	*248*	*-2*	*57,2*	*–*	*340*	*400*	*273*	*7.0*	*–*	*14,0*	*–*	*600*	
		Теберда	*г. Теберда*	*83214*		*08.00*	*275*	*-5*	*–*	*–*	*418*	*350*	*400*	*8,4*	*0,0*	*17,1*	*–*	*600*	
		Кубань	*с. им. Коста-Хетагурово*	*83137*		*08.00*	*500*	*-5*	*344*	*–*	*580*	*620*	*940*	*11,2*	*–*	*13,1*	*–*	*600*	
		Кубань	*Усть-Джегутинский ГУ в.б.*			*08.00*	*–*	*–*	*-350*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*600*	
		*БСК****	*водозабор*			*08.00*	*–*	*–*	*181*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*600*	
		Кубань	*Усть-Джегутинский ГУсброс в н.б.*			*08.00*	*–*	*–*	*169*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*–*	*600*	

** В графу «Примечание» заносится информация об отсутствии данных АГК.*

*** ГУ – гидротехнический узел.*

**** БСК – Большой Ставропольский канал.*

Таблица А.2 – Форма и пример заполнения таблицы оперативного учета стока

Бассейн реки (моря)	Объект	Река	Гидрологический пост	Код поста	Дата ЧЧ.ММ.ГГГГ	Срок наблюдения, чч. мм	СВО	Уровень, *H*, см	Расход воды по кривой $Q_{кр}$, м³/с	Метод расчета	Оперативный расход воды, $Q_{оп}$, м³/с	Характерные уровни, см, и расходы воды, м³/с за сутки								Примечание*
												средний		высший и наибольший			низший и наименьший			
												$H_{ср}$	$Q_{ср}$	$H_{высш}$	$Q_{наиб}$	срок наблюдения, ч. мин	$H_{низш}$	$Q_{наим}$	срок наблюдения, ч. мин	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Река Кубань	*Краснодарское водохранилище*	*Учкулан*	*Хурзук*	*83207*	*27.06.2016*	*08.00*	*600*	*248*	*86,2*	*02*	*57,2*	*252*	*61,4*	*255*	*63,0*	*20.00*	*248*	*57,2*	*8.00*	
* В графу «Примечание» заносится информация о причинах отсутствия данных за тот или иной срок.																				

Таблица А.3 – Методы оперативного учета стока

Код метода	Наименование метода	Код метода	Наименование метода
01	Многолетняя однозначная кривая расходов	08	Оптимальная экстраполяция с аппроксимацией элементов ряда $\tilde{q}$ косинусоидой
02	Однозначная кривая расходов прошлого года с экстраполяцией за пределы диапазона ИРВ	09	Экстраполяции параметра Великанова в период зарастания
03	Линейная экстраполяция относительных отклонений $\tilde{q}$	10	С учетом температуры воздуха в осенний и весенний переходные периоды
04	Экстраполяция сглаженных по 2-м элементам значений $\tilde{q}$	11	С учетом закономерностей спада зимних расходов и истощения стока
05	Экстраполяция сглаженных по 3-м элементам значений $\tilde{q}$	/	Сток отсутствует (река пересохла, промерзла, в русле стоячая вода)
06	Оптимальная экстраполяция последнего элемента ряда $\tilde{q}$	–	Пропуск наблюдений
07	Оптимальная экстраполяция 2-х элементов ряда $\tilde{q}$		

Т а б л и ц а А.4 – Форма и пример заполнения таблицы ИРВ

Река	Гидрологический пост	Код поста	Дата ЧЧ.ММ.ГГГГ	Уровень $H_и$, см	Измеренный расход воды, $Q_и$, м³/с	Площадь живого сечения ω, м²	Расход воды по кривой $Q_{кр}$, м³/с	$(Q_и - Q_{кр})/ Q_{кр}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Учкулан	*Хурзук*	*83207*	*23.06.2016*	*240*	*62,8*	*29,9*	*79,1*	*-0,21*

Т а б л и ц а А.5 – Форма и пример заполнения таблицы результатов сравнения данных АГК и стандартных наблюдений

Река	Гидрологический пост	Код поста	Дата, ЧЧ.ММ.ГГГГ	Срок наблюдения, чч-мм	Уровень, см			Примечание*
					$H_{ст.}$	$H_{АГК}$	$H_{ст.} - H_{АГК}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Учкулан	*Хурзук*	*83207*	*23.06.2016*	*08.00*	*248*	*246*	*-2*	
				20.00	*255*	*256*	*1*	
* В графу «Примечание» помещается информация о причинах значительных расхождений данных АГК и ручных наблюдений.								

Т а б л и ц а А.6 – Форма и пример заполнения таблицы обобщенных характеристик оперативного учета стока

Река	Гидрологический пост	Код поста	Год, период	Месяц	Декада	Характерные уровни, H, см, и расходы воды, Q, м³/с, за период наблюдений								Примечание*
						средний		высший и наибольший			низший и наименьший			
						$H_{ср}$	$Q_{ср}$	$H_{высш}$	$Q_{нав/б}$	Дата наблюдения, ЧЧ	$H_{низш}$	$Q_{нав/м}$	Дата наблюдения, ЧЧ	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Учкулан	*Хурзук*	*83207*	*2016*	*июнь*	*3*	*242*	*55,3*	*258*	*65,3*	*30*	*224*	*44,2*	*21,22*	
			1956–2015	*июнь*	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	
			Отклонение от многолетнего	*июнь*	*3*	–	–	–	–	–	–	–	–	
* В графу «Примечание» помещается информация о наличии дополнительных факторов, влияющих на изменение ПСР.														

Приложение Б
(обязательное)

Алгоритмы аппроксимации зависимостей расходов от уровней воды

Б.1 Общие положения построения алгоритмов аппроксимации зависимостей расходов от уровней воды

Б.1.1 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 или в виде так называемой кривой расходов *Q = f(H)*. Хотя с точки зрения физики процесса независимой переменной в этой связи является расход воды, обратная зависимость *Q(H)* удобна тем, что она позволяет вычислить расход воды непосредственно по заданному значению уровня.

Б.1.2 Различают однозначные и неоднозначные зависимости расходов от уровней воды. Понятие однозначности связи *Q(H)* и алгоритм ее оценки изложены в приложении В. 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.

Б.1.3 Для получения зависимостей расхода воды *Q(H)* и его элементов: площади живого сечения *ω(H)* и средней скорости потока *V(H),* от уровня воды непосредственно используются данные таблиц “Измеренные расходы воды” ТГ-8 по РД 52.19.143.

Кроме того, для анализа характера связи *Q(H)* привлекаются сведения об ИРВ и наблюденных при этом уровнях, помещаемых в книжках КГ-3М, в которых содержатся данные о состоянии русла и влияющих на изменения его ПСР. В исходную совокупность следует включать все данные, полученные при свободном состоянии

русла, при отсутствии зарастания, переменного подпора и прочих влияющих на изменение ПСР факторов, в том числе следующие ряды данных:

- ИРВ $Q_и$, м^3/с;

- наблюденные при измерениях расходов воды уровни $H_и$, м;

- зафиксированные при измерениях площади живого сечения $\omega_и$, м^2;

- средние скорости течения в гидростворе во время измерений расходов воды $V_и$, м/с.

Б.1.4 В графическом варианте связь расходов и уровней воды представляется КР в поле точек *(Q, H),* которая строится на миллиметровке (проводится на глаз посередине полосы рассеивания точек) [12]. 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 элементов расхода (площадей водного сечения $\omega(H)$ и средних скоростей течения $V(H)$) от уровня воды.

Б.1.5 При аналитической аппроксимации зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$ их качество оценивается значениями [7], [8]:

- стандарта рассеяния аналитической зависимости $Y(H)$ $\sigma_р$;

- множественного коэффициента корреляции R, которые определяются по формулам.

Стандарт рассеяния зависимости $Y(H)$ определяется по формуле

$$\sigma_р = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Y_и - Y(H_и)^2}{n-p}}, \qquad (Б.1)$$

где $Y_и$ – измеренная характеристика, для которой подбирается аналитическое УР;

$Y(H_и)$ – характеристика, вычисленная по УР для наблюденного при измерении уровня $H_и$;

n – количество ИРВ;

p – число степеней свободы подбираемого уравнения.

Выборочный множественный коэффициент корреляции R определяется как коэффициент между $Y_{иi}$ и $Y(H_{иi})$ по формуле

$$R = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Y_i - \overline{Y})(Y(H_{ui}) - \overline{Y(H_{ui})})}{\sum_1^n (Y_i - \overline{Y})^2 \sum_1^n (Y(H_{ui}) - \overline{Y(H_{ui})})^2}}. \quad (Б.2)$$

Для аппроксимации *Q(H)* рекомендуется применять представленные в 6.2 аналитические выражения (10) и (11), из которых должно быть выбрано наиболее эффективное (оптимальное).

Для удобства представления коэффициентов аналитических уравнений при выполнении расчетов по МНК значения уровней рекомендуется выражать не в сантиметрах над «нулем» поста, как это принято в гидрологии, а в метрах над «нулем» поста.

Б.2 Алгоритм I. Аппроксимация зависимости Q(H) параболой Глушкова

Б.2.1 Предложенная В. Г. Глушковым аналитическая форма аппроксимации КР имеет вид

$$Q(H) = a(H - H_0)^b, \quad (Б.3)$$

где Q – расход воды, м^3/с;

H – наблюденный 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.

Б.2.2 Для получения параметров a и b выражение (Б.3) преобразуется к логарифмическому виду:

$$ln(Q) = ln(a) + b\,ln(H - H_0). \quad (Б.4)$$

Б.2.3 Далее на основе совокупности ИРВ, преобразованной к виду (Б.3) МНК получают параметры $ln(a)$ и b, затем уравнение вновь преобразуют к виду (Б.3). Хотя понятие об уровне нулевого расхода H_0 имеет вполне явный гидравлический смысл, его определение в действительности затруднено и требует дополнительных морфометрических данных, которые, как правило, отсутствуют в исходных

материалах. В связи с этим величина H_0 на практике оказывается таким же статистическим параметром, как и a или b и определяется методом решения оптимизационной задачи: принимается такое значение H_0, при котором рассеяние связи $Q(H)$ наименьшее.

При расчетах следует задавать некоторый диапазон изменения H_0. В качестве верхней границы этого диапазона рекомендуется принимать значение низшего наблюденного в исследуемом гидрометрическом створе уровня воды – $H_{низш}$. Нижняя граница определяется вычитанием из $H_{низш}$ максимальной глубины потока h_{max}, соответствующей низшему наблюденному уровню воды. Таким образом, H_0 располагается в диапазоне:

$$(H_{низш} - h_{max}) \le H_0 \le H_{низш}. \quad (Б.5)$$

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

Б.2.4 Парабола Глушкова не всегда пригодна для аппроксимации КР во всем диапазоне изменения уровня воды. Лишь 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 (Б.3) может давать хорошие результаты.

Б.3 Алгоритм II. Аппроксимация методом полиномиальной регрессии

Б.3.1 В соответствии с алгоритмом II аналитически КР представляется в виде уравнения:

$$Q(H) = a_0 + a_1 H + a_2 H^2 + \ldots + a_m H^m. \quad (Б.6)$$

Исходная совокупность данных включает ряды:

- ИРВ $Q_и$;
- наблюденные при измерениях уровни воды $H_и$;
- $H^2_и$ – значения уровней воды в квадрате;
- $H^m_и$ – значения уровней воды в степени m.

Использование при аппроксимации КР степеней полинома вида (Б.6) выше 4-ой приводит, как правило, к плохой обусловленности матрицы (H, H^m), что многократно увеличивает погрешности расчета параметров УР.

Б.3.2 Параметры УР вида (Б.6) определяются с использованием МНК для полиномов 2-ой, 3-ей, 4-ой степени, а также неполных многочленов, например:

$$Q(H) = a_0 + a_1H^2 + a_2H^3;$$
$$Q(H) = a_0 + a_1H + a_2H^3; \qquad (Б.7)$$

и т.д.

Для аппроксимации выбирается уравнение, имеющее наибольший множественный коэффициент корреляции (Б.2) и наименьший стандарт рассеяния (Б.1) связи $Q(H)$.

Б.3.3 Исследования показывают, что уравнение вида (Б.6) применимо для аппроксимации связи $Q(H)$ лишь в ограниченном числе случаев, а именно: оно хорошо аппроксимирует зависимость $Q(H)$, если диапазон изменения уровня воды на гидростворе невелик (например, в маловодные годы) и значения минимальных и максимальных расходов воды различаются друг от друга не более, чем на порядок. В случаях, когда не удается получить приемлемую аппроксимацию КР методом обычной полиномиальной регрессии, следует использовать другие способы, например, полиномиальную регрессию с ограничениями или кусочно-полиномиальную регрессию.

Б.4 Алгоритм III. Аппроксимация зависимости $Q(H)$ методом полиномиальной регрессии с введением ограничений в экстремальных точках амплитуды уровня воды

Б.4.1 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 [8]. В соответствии с этим способом расчеты выполняются по следующему алгоритму.

Б.4.2 Первоначально для аппроксимирующей функции задаются ограничения в точке одного из наблюденных экстремумов уровня воды (для КР расходов – в точке

низшего наблюденного уровня воды, для кривых площадей и средних скоростей течения – наивысшего наблюденного уровня воды). Для этого необходимо установить положение КР в нижней, а кривых площадей и средних скоростей течения в верхней частях диапазона изменения уровня воды, что 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 $H_{низш}$.

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

$$Q(H) = \mu(H) + \nu(H)\, g(H), \qquad (Б.8)$$

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

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

$g(H)$ – полином, подбираемый по МНК.

В порядке первого приближения первым двум полиномам придается вид

$$\mu(H) = Q(H_{низш}) = const, \qquad (Б.9)$$

$$\nu(H) = (H - H_{низш}). \qquad (Б.10)$$

Б.4.3 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 ИРВ следующим образом

$$Y_i = \frac{Q_{иi} - Q(H_{низш})}{H_{иi} - H_{низш}}, \qquad (Б.11)$$

где $Q_{иi}$ – i-ый ИРВ,

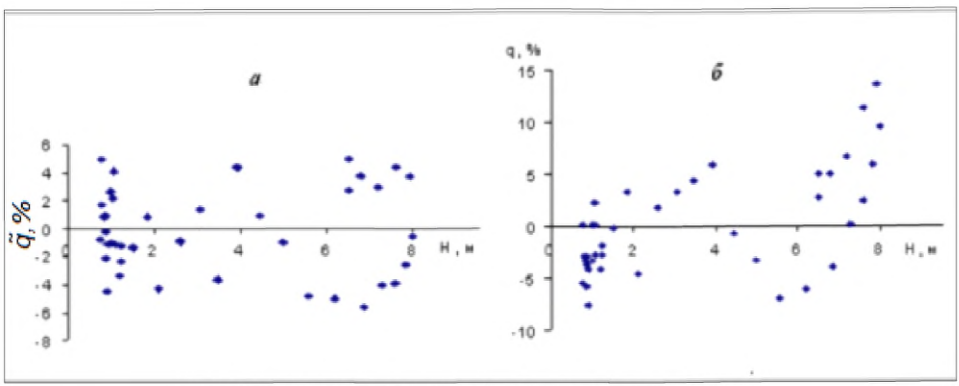
$H_{иi}$ – соответствующий ему уровень воды.

Таким образом, расчет выполняется по совокупности преобразованных данных в виде Y_i и соответствующих им уровней $H_и$.

Б.4.4 После подбора полинома $g(H)$ окончательное УР $Q(H)$ для всего диапазона уровней воды приобретает вид

$$Q(H) = Q(H_{низш}) + (H - H_{низш})(a_o + a_1H + a_2H^2 + \quad + a_mH^m). \qquad (Б.12)$$

Б.4.5 Качество аппроксимации $Q(H)$, $V(H)$, $\omega(H)$ оценивается на основе графиков остатков регрессии в соответствии с рисунком Б.1. Относительные остатки УР должны располагаться полосой примерно равной ширины по всей амплитуде уровня воды (рисунок Б.1$а$), симметрично по отношению к линии нулевого значения. Если же в каком-то диапазоне уровней воды отклонение остатков приобретает систематический характер (например, все они оказываются одного знака, рисунок Б.1б), это свидетельствует о неудовлетворительной аппроксимации связи $Q(H)$ в данном интервале значений (Q, H).



а – регрессия с ограничениями; *б* – полиномиальная регрессия.

Рисунок Б.1 – График остатков регрессии $\tilde{q}=f(H)$
в створе ГП р. Дон – х. Беляевский, за 1971 год

Б.4.6 Такая картина может наблюдаться из-за резкого изменения ПСР 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. Зависимость $Q(H)$ в виде параболы Глушкова (Б.3) или полинома (Б.6), полученная на первом шаге аппроксимации,

принимается для представления связи $Q(H)$ в нижней части диапазона уровней воды, где ее 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, а именно, при переходе уровня воды через точки резкого изменения формы поперечного сечения русла.

В верхней точке $H_{гр1}$ нижнего отрезка кривой, уравнение, для которого уже получено, задаются ограничения, согласно алгоритму III, т.е. по УР вычисляется значение расхода воды $Q(H_{гр1})$. Затем по данным ИРВ, попадающим в диапазон, расположенный выше граничной точки $H_{гр1}$, 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).

Б.4.7 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 КР в точке низшего (минимального) наблюденного уровня воды. При необходимости получения аппроксимации связи $\omega(H)$ за многолетний период целесообразно задавать ограничения в точке максимального наблюденного 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 $H_{высш}$. Это объясняется тем, что малые скорости течения измеряются с более низкой точностью, что снижает надежность оценки положения кривой $V(H)$ в ее нижней части.

Б.4.8 Пример использования алгоритма кусочно-полиномиальной аппроксимации приводится в приложении Д.

Б.5 Выбор оптимального алгоритма аппроксимации

Б.5.1 Известно, что 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.

Б.5.2 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, иными словами физическую интерпретируемость алгоритма, его компактность и удобство использования.

Б.5.3 Характеристики точности предназначены для оценивания погрешностей результатов, получаемых при использовании выбранного алгоритма. Они содержат как методические, так и трансформированные погрешности, обусловленные неточностью исходных данных и погрешностями алгоритмов. К основным характеристикам точности относятся:

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

- границы погрешностей, как случайных, так и систематических, которые могут быть доверительными или детерминированными.

Б.5.4 Перечень характеристик, которыми следует руководствоваться при выборе оптимальной аппроксимирующей функции $Q(H)$, должен включать:

- 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 (среднего арифметического) остатков регрессии, как абсолютных, так и относительных, должны быть близки к нулю ($m_q \cong 0$; $m_{\tilde{q}} \cong 0$).

Б.5.5 Адекватность полученной модели исходным данным проверяется также на основании анализа графиков остатков регрессии, представленных на рисунке Б.1. При этом могут быть обнаружены следующие типы отклонений:

- наличие выделяющихся измерений;

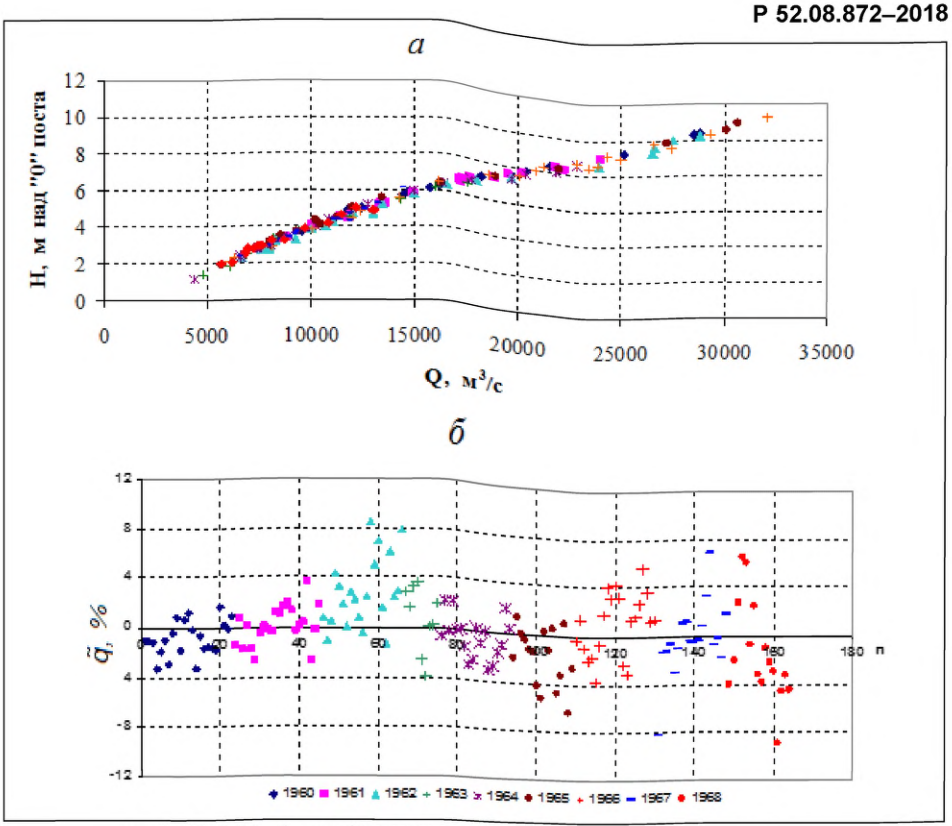
- систематические отклонения остатков на отдельных отрезках;

- непостоянство дисперсии по амплитуде изменения расходов и уровней воды.

При оптимальной аппроксимации связи *Q(H)* относительные остатки регрессии на графике зависимости от *H* или $Q_{расч}$ должны располагаться симметричными полосами по обе стороны от ординаты *H* или *Q,* (см рисунок Б.1). Рекомендуется анализировать поведение остатков в различные фазы режима. например, в зависимости от времени *t* или от порядкового номера ИРВ *n,* как показано на рисунке Б.2*б*. Подобный анализ позволит выявить периоды или фазы режима, в которые нарушается однозначность связи *Q(H).* На рисунке Б.1б приведен пример, для которого в верхнем диапазоне уровней воды все отклонения $\tilde{q}$ имеют один знак. Такую аппроксимацию связи *Q(H)* нельзя признать удовлетворительной. Для ГП р. Енисей – г. Енисейск при аппроксимации МКР выявлены систематические отклонения от УРМ данных 1962 г. (см. рисунок Б.2*б*).

Б.5.6 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.

Б.5.7 При необходимости аналитическое представления зависимости *Q(H)* в виде (Б.3) или (Б.6) может быть получено по данным таблицы координат многолетней или годовой кривой расходов воды или площадей поперечного сечения. В этом случае вместо данных совокупности ИРВ *($H_и$, $Q_и$)* в расчетах участвуют данные в узлах таблицы координат (*H, Q).*



а – МКР *Q(H)*, *б* – график относительных остатков регрессии $\tilde{q}(n)$

Рисунок Б.2 – Аппроксимация МКР *Q(H)*
в створе ГП р. Енисей – г. Енисейск, 1960 – 1968 годы

Б.5.8 Описанные алгоритмы аппроксимации зависимостей расходов воды *Q(H)*, площадей живого сечения *ω(H)* и средних скоростей потока *V(H)* реализованы в компьютерной технологии «Речной сток», предназначенной для вычисления расходов воды в режимном варианте гидрометрического учета стока. Этой технологией рекомендуется воспользоваться при получении параметров зависимостей многолетних или годовых КР и площадей поперечного сечения при подготовке материалов для оперативного учета стока.

Приложение В
(обязательное)

Алгоритм оценки однозначности зависимости расходов от уровней воды

В.1 В общем случае КР или УР расходов от уровней воды отражают осредненные за исследуемый период характеристики ПСР и поэтому УР в виде (10), (11) правомерно принять в качестве детерминированной характеристики ПСР, на основе которой можно получить значение расхода воды в первом приближении. Отклонения ИРВ исходной совокупности от УР оказываются обусловленными двумя причинами: случайными погрешностями измерения расходов воды и изменениями условий протекания потока под воздействием динамических и морфологических факторов. Количественная оценка совокупного влияния этих факторов на изменение ПСР возможна лишь на основе совместного решения уравнения неустановившегося движения потока и уравнения деформации русла. На практике такое решение затруднено недостаточностью необходимых данных. Вместе с тем изменения ПСР, обусловленные неучтенными факторами, можно рассматривать как случайную функцию времени и оценивать ее с помощью статистических методов [5], [6].

В.2 В качестве характеристики изменения ПСР могут служить относительные отклонения $\tilde{q}$ от УР $Q(H)$ или $Q(X)$

$$\tilde{q}_{и} = \frac{Q_{и} - Q(H_{и})}{Q(H_{и})}, \qquad (В.1)$$

где $Q_{и}$, и $Q(H_{и})$ – ИРВ и расход воды, полученный по связи $Q(H)$ для уровня $H_{и}$, зафиксированного во время измерения расхода воды $Q_{и}$, соответственно, м^3/с.

В.3 Для оценки однозначности зависимости $Q(H)$ рекомендуется использовать критериальное отношение дисперсий F Фишера [19]. Связь $Q(H)$ признается однозначной, если

$$F = \frac{D_{\tilde{q}}}{\tilde{\sigma}_{и}^2} \le F_{кр}, \qquad (В.2)$$

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

$F_{кр}$ – критическое значение отношения дисперсий Фишера при заданном уровне значимости.

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

$$D_{\tilde{q}} = \sigma_{\tilde{q}}^2 = \frac{1}{N-k}\sum_{1}^{N}\frac{[Q_{ui} - Q(H_{ui})]^2}{[Q(H_{ui})]^2}. \qquad (В.3)$$

В.4 Погрешность этой оценки в значительной степени зависит от объема исходной выборки. Относительное значение погрешности измерения расхода воды $\tilde{\sigma}_и$ определяется методом частных погрешностей. Для такой оценки к настоящему времени накоплено большое количество материалов, относящихся к различным фазам водного режима и для разным условиям протекания потока. Поэтому можно считать, что дисперсия $\tilde{\sigma}_и^2$ оценивается достаточно надежно в статистическом смысле и близка к значению дисперсии генеральной совокупности. Следовательно, при выборе критериальных значений отношения дисперсий Фишера допустимо принимать число степеней свободы, относящееся к оценке $\tilde{\sigma}_и^2$, равным «∞» (бесконечности). Таким образом, зависимость $Q(H)$ должна быть признана однозначной в тех случаях, когда критериальное отношение (В.2) не превышает значений распределения Фишера при заданном уровне значимости.

В.5 Критические значения отношения Фишера для 5 %-ного уровня значимости и различного числа измерений n при условии, если принято, что длина выборки для оценки $\tilde{\sigma}_и^2$ равна ∞, приведены в таблице В.1.

Т а б л и ц а В.1 – Критические значения параметра $F_{кр}$, для 5 %-ного уровня значимости

n-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	2,01	1,94	1,88	1,83
n-1	12	16	20	24	30	40	50	100	120	200
F	1,75	1,64	1,57	1,52	1,46	1,40	1,35	1,24	1,21	1,17

В.6 Согласно предложенному критерию для 5 %-ного уровня значимости и числа измерений n = 31 значение $F_{кр}$ равно 1,46. Это означает, что зависимость $Q(H)$ можно признать однозначной, если $\sigma_{\tilde{q}} \le 1{,}46\tilde{\sigma}_и$.

В.7 Критериальное отношение (В.2) дает возможность судить о близости или различии дисперсий $D_{\tilde{q}}$ и $\tilde{\sigma}_и^2$, но не позволяет выявить наличие систематической составляющей отклонений $\tilde{q}$. Между тем известно, что во многих случаях даже при выполнении критериального отношения (В.2) 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. Иногда наблюдается обратная картина. При этом отклонения $\tilde{q}_и$, соответствующие различным фазам режима, имеют противоположные знаки.

Очевидно, что в таких ситуациях даже при выполнении критериального отношения (В.2) зависимость *Q(H)* должна быть признана неоднозначной.

В.8 Поэтому наряду с критериальным отношением (В.2) для оценки однозначности КР рекомендуется использовать непараметрический критерий оценки случайности временных рядов, в частности, наиболее простой для этого случая – критерий оценки рядов на случайность с учетом знаков отклонений [20]. Выполняется анализ временных рядов отклонений $\tilde{q}(t)$, зафиксированные в различные фазы водного режима. Если не наблюдается систематической составляющей в рядах отклонений $\tilde{q}(t)$, то оба знака («+» и «-») должны встречаться одинаково часто.

В.9 Временной ряд $\tilde{q}(t)$ следует считать случайным, если число элементов одного знака, зафиксированных в течение исследуемой фазы водного режима, попадает в следующие интервалы:

$$m_{\pm} > \frac{N_0 - 1}{2} - \sqrt{\frac{N_0+1}{12}}, \qquad (В.4)$$

$$m_{\pm} < \frac{N_0 - 1}{2} + \sqrt{\frac{N_0+1}{12}}. \qquad (В.5)$$

В.10 Зависимость *Q(H)* признается однозначной в тех случаях, когда отношение дисперсий удовлетворяет критерию Фишера 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.

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

В.11 В случае нарушения неравенства (В.2) и неслучайности группировки последовательности $\tilde{q}(t)$, установленной по (В.4) и (В.5), КР *Q(H)* или УР следует считать неоднозначными, дающими лишь первое приближение для ЕРВ.

В.12 На основе анализа временных рядов отклонений $\tilde{q}(t)$ принимается окончательное решение о выделении фазово-однородных периодов, в течение которых должны использоваться различные способы учета стока. Критерий и условия однозначности (В.2), (В.4), (В.5) служат основной предпосылкой выбора метода и оценки точности гидрометрического учета стока.

Приложение Г
(рекомендуемое)

Пример выбора наилучшей аппроксимации зависимости расходов от уровней воды

Г.1 Рассмотрим алгоритм выбора аналитической зависимости, аппроксимирующей МКР для ГП м.ст. Кантегир на реке Кантегир (приток Саяно-Шушенского водохранилища).

Г.2 Для получения аналитической зависимости расходов от уровней воды использовались данные наблюдений за многолетний период по 2011 год включительно. Для исследуемого створа был выполнен анализ многолетних данных об ИРВ и получены зависимости расходов от уровней воды и их аналитические представления, рекомендуемые для расчета оперативных значений расходов воды. Анализ многолетних данных показал, что для ГП р. Кантегир – м.ст. Кантегир все годовые зависимости *Q(H)* остаются однозначными за весь период с 2000 по 2011 год. (рисунок Г.1).

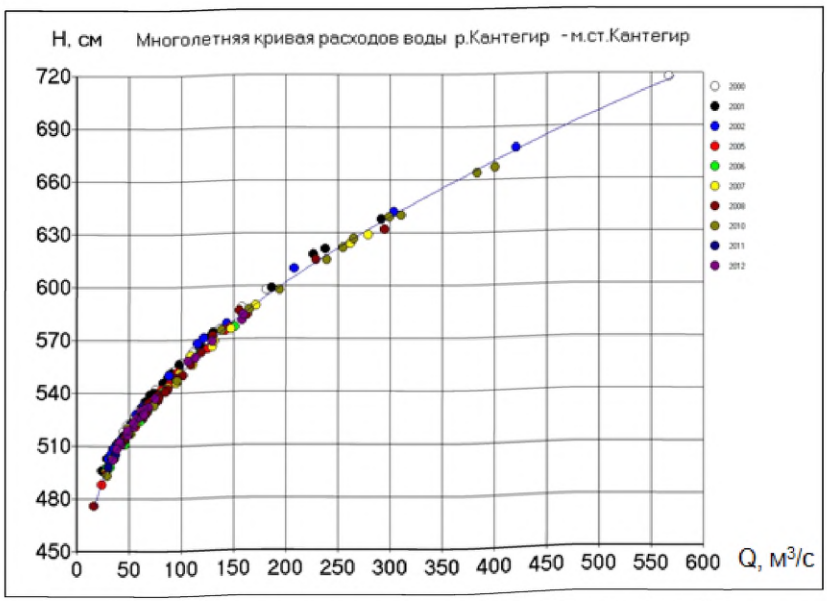


Рисунок Г.1 – Зависимость расходов воды от уровней, р. Кантегир – м.ст. Кантегир

Г.3 Наилучшая аппроксимация МКР получена методом полиномиальной регрессии с ограничениями в виде полинома 4-й степени. Его параметры приведены в таблице Г.1. Ограничение задано на значение расхода воды при уровне $H_{низш}$ = 4,13 м над «нулем» поста. Качество аппроксимации оценивается параметрами, представленными в последних трех графах таблицы Г.1.

Т а б л и ц а Г.1 – Параметры зависимости *Q(H)*, ГП р. Кантегир – м.ст. Кантегир за 2000 – 2011 годы

Диапазон уровней воды, м	Параметры КР					Ограничения по		R*	$m_{\tilde{q}}$,** %	$\sigma_{\tilde{q}}^{***}$, %
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	H, м	Q, $м^3/с$			
От 4,76 до 7,18	2536,1	2225,3	-700,78	91,892	-4,608	4,13	0,01	0,994	0,01	5,25

* R – множественный коэффициент корреляции (должен быть наибольшим).

** $m_{\tilde{q}}$ – значение математического ожидания относительных остатков регрессии (должно быть близко к нулю).

*** $\sigma_{\tilde{q}}$ – среднеквадратическое значение относительных остатков регрессии (должно быть наименьшим).

Основной предпосылкой для выбора метода гидрометрического учета стока служит оценка однозначности зависимости расходов от уровней воды, которая выполняется на основе сравнения дисперсии относительных отклонений ИРВ от осредняющей кривой и дисперсии случайных погрешностей измерения расходов воды по алгоритму, описанному в приложении В. В соответствии с этим алгоритмом полученная МКР признана однозначной. При длине совокупности ИРВ n = 178 дисперсия относительных отклонений составила $D_{\tilde{q}}$ = 0,0028, дисперсия случайных погрешностей измерения расходов воды при свободном русле в створе ГП р. Кантегир – м.ст. Кантегир $\tilde{\sigma}_и^2$ равна 0,0036, а критерий Фишера F по (В.4) равен 0,75 при значении $F_{кр}$, равном 1.17.

Приложение Д
(рекомендуемое)

Пример кусочно-полиномиальной аппроксимации зависимости расходов от уровней воды

Д.1 Рассмотрим пример использования алгоритма кусочно-полиномиальной аппроксимации для получения аналитической зависимости *Q(H)*. С этой целью возьмем МКР для створа ГП р. Лаба – х. Догужиев за период с 2003 по 2006 год. Удовлетворительную аппроксимацию *Q(H)* одной кривой во всем диапазоне изменения уровня воды получить не удалось, как видно из рисунка Д.1.

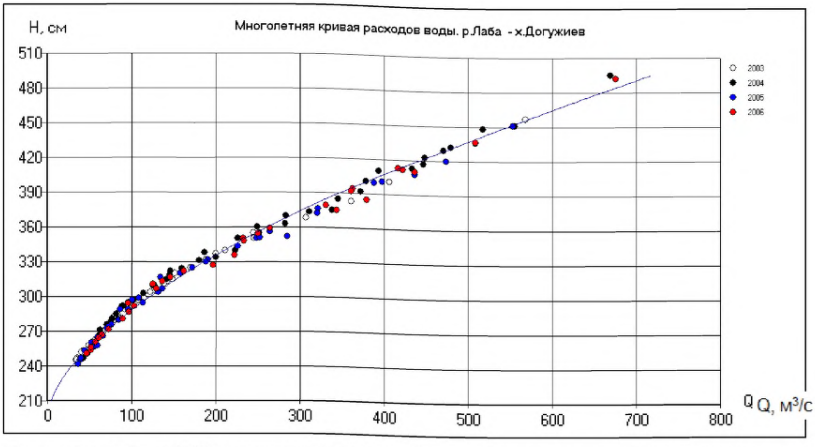


Рисунок Д.1 – МКР в створе ГП р. Лаба – х. Догужиев за 2003 – 2006 годы

Д.2 В связи с этим следует выделить два диапазона уровней, для каждого из которых подбирается своя полиномиальная зависимость. Первоначально по многолетним данным в граничной точке низшего наблюденного уровня воды $H_{низш}$ = 210 см (2,1 м) определено значение расхода воды, равное 15,0 м^3/с, которое и было принято в качестве ограничения на положение кривой *Q(H)* в этой точке.

Д.3 Методом полиномиальной регрессии с ограничениями было получено уравнение *Q(H)* в диапазоне от 2,4 до 3,20 м над «нулем» поста, параметры которого приведены в первой строке таблицы Д.1. Затем по полученному УР вычислено значение расхода воды в точке *H* = 3,20 м над «нулем» поста ($Q_{3,20}$ = 156 м^3/с), которое было задано как ограничение при аппроксимации кривой в диапазоне от 3,21 до 4,95 м над «нулем» поста. Далее методом полиномиальной регрессии с ограничениями

было получено уравнение *Q(H)* в диапазоне от 3,21 до 4,95 м над «нулем» поста, параметры которого приведены во второй строке таблицы Д.1.

Зависимость *Q(H)*, полученная методом кусочно-полиномиальной регрессии с использованием алгоритма, описанного в приложении Б, представлена на рисунке Д.2. Ее качество оценивается параметрами, представленными в последних трех графах таблицы Д.1.

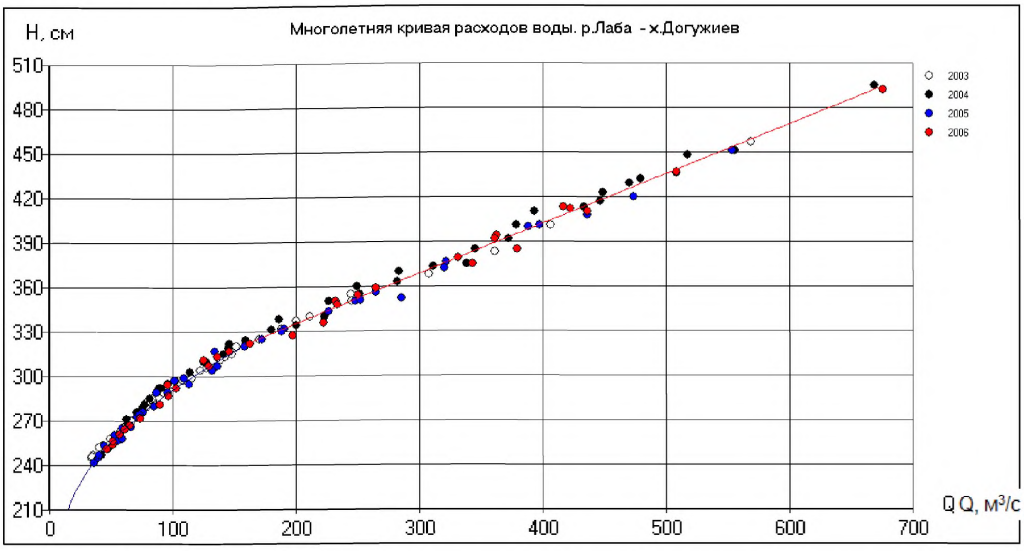


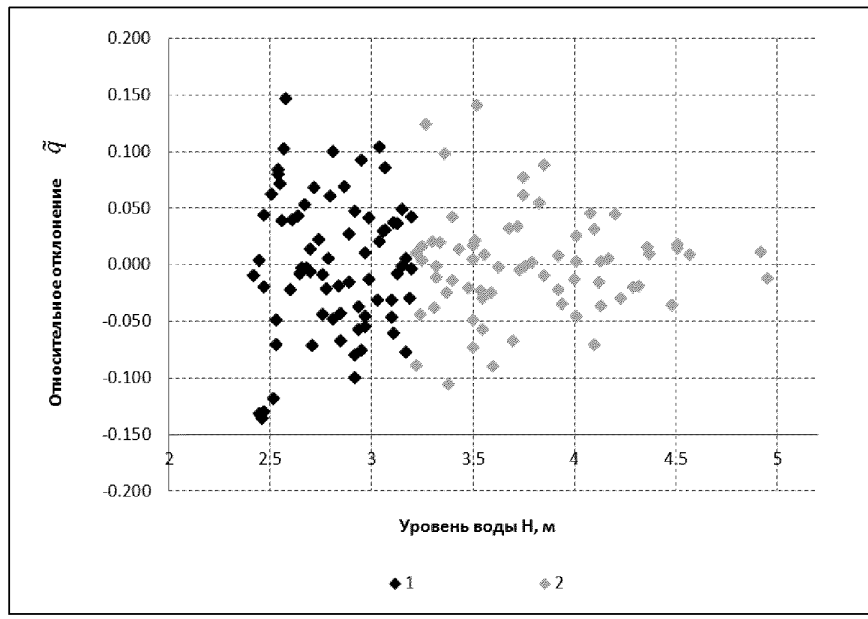
Рисунок Д.2 – Многолетняя зависимость расходов воды от уровней в створе р. Лаба – х. Догужиев, полученная методом кусочно-полиномиальной регрессии

Т а б л и ц а Д.1 – Параметры МКР в створе ГП р. Лаба – х. Догужиев

МКР, период наблюдений, годы	Диапазон уровней воды, м	Параметры КР			Ограничения по		R*	$m_{\tilde{q}}$,** %	$\sigma_{\tilde{q}}$,*** %
		a_0	a_1	a_2	H, м	Q, м³/с			
2003-2006	От 2,42 до 3,20	290,26	-301,41	81,1120	2,10	15,0	0,943	0,03	6,08
	От 3,21 до 4,95	-819,74	308,40	-1,2867	3,20	154	0,995	-0,02	4,70

* R – множественный коэффициент корреляции (должен быть наибольшим).
** $m_{\tilde{q}}$ – значение математического ожидания относительных остатков регрессии.
*** $\sigma_{\tilde{q}}$ – среднеквадратическое значение относительных остатков регрессии.

Д.4 На рисунке Д.3 приведен график распределения относительных отклонений $\tilde{q}$ ИРВ (исходной совокупности данных) от полученной с использованием кусочно-полиномиальной аппроксимации зависимости во всем диапазоне изменения уровней воды, который указывает на то, что аппроксимация выполнена оптимальным образом.



1 – для МКР, аппроксимирующей точки диапазона от 2,42 до 3,20 м,
2 – для МКР, аппроксимирующей точки диапазона от 3,21 до 4,95 м

Рисунок Д.3 – График зависимости относительных отклонений $\tilde{q}$ от уровней воды для МКР в створе ГП р. Лаба – х. Догужиев за период с 2003 по 2006 год

Приложение Е
(рекомендуемое)

Пример оперативного учета стока в условиях свободного состояния русла

Е.1 Расчет оперативных значений расходов воды с использованием относительных отклонений ИРВ текущего года от принятой опорной КР рассмотрим на примере створа ГП станица (ст.) Ладожская на реке Кубань. На рисунке Е.1 представлена МКР для этого створа за период с 1994 по 1999 год. Как видно, эта зависимость может считаться однозначной и аппроксимируется кривой, описываемой уравнением

$$Q = -0{,}5948H^3 + 23{,}426H^2 - 53{,}057H - 75{,}829 \qquad (Е.1)$$

Диапазон уровней воды от 3,7 до 7,05 м над «нулем» поста.

Е.2 Эта зависимость используется для расчетов оперативных значений расходов воды за период открытого русла в 2000 году.

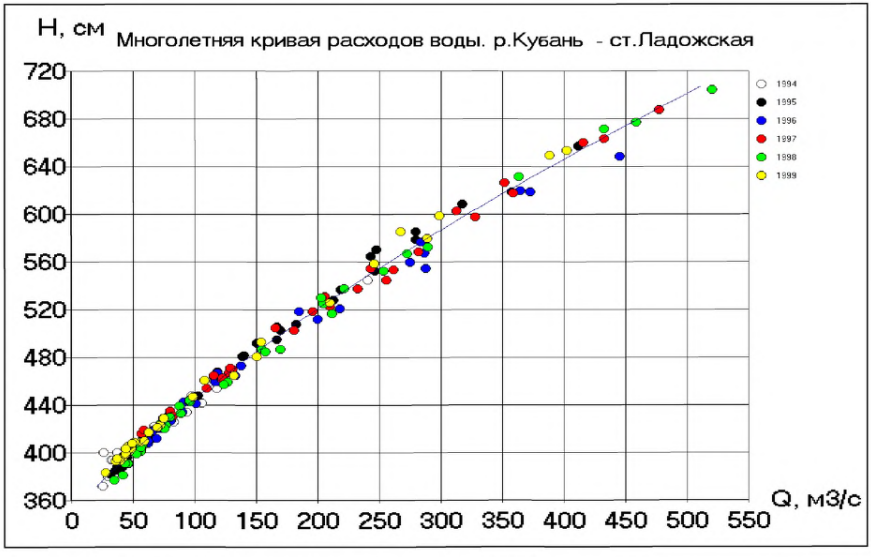


Рисунок Е.1 – МКР в створе ГП р. Кубань – ст. Ладожская
за период 1994 – 1999 годы

Е.3 В таблице Е.1 представлен фрагмент расчета оперативных значений ЕРВ за период открытого русла 2000 года.

Т а б л и ц а Е.1 – Пример расчета оперативных значений расходов воды в створе ГП р. Кубань – ст. Ладожская за период открытого русла 2000 года

Число, месяц	H, м	Q(H), м³/с	$Q_и$, м³/с	$\tilde{q}_u$	$\tilde{q}_t$	$Q_{оп}$, м³/с	Q_{pt}, м³/с	δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20.05	4,65	124	-	-	-0,0081	123	114	-7,5
21.05	4,62	120	-	-	-0,0081	119	110	-7,9
22.05	4,62	120	-	--	-0,0081	119	110	-7,9
23.05	4,61	119	-	-	-0,0081	118	108	-8,6
24.05	4,64	123	-	-	-0,0081	122	112	-8,1
25.05	4,61	119	-	-	-0,0081	118	108	-8,6
26.05	4,65	124	-	-	-0,0081	123	114	-7,5
27.05	4,83	147	-	-	-0,0081	146	138	-5,6
28.05	5,02	173	-	-	-0,0081	172	165	-3,8
29.05	5,25	205	-	-	-0,0081	204	197	-3,2
30.05	5,61	259	-	-	-0,0081	257	250	-2,6
31.05	5,66	266	252	-0,054	-0,0081	264	257	-2,8
01.06	5,96	314	-	-	-0,0472	299	304	1,6
02.06	6,42	392	-	-	-0,0472	373	377	1,0
03.06	6,63	429	-	-	-0,0472	409	411	0,6
04.06	6,88	474	451	-0,049	-0,0472	452	449	-0,6
05.06	6,74	449	-	-	-0,0517	425	428	0,6
06.06	6,71	443	-	-	-0,0517	420	424	0,9
07.06	6,83	465	-	-	-0,0517	441	443	0,4
08.06	6,97	491	-	-	-0,0517	466	467	0,3
09.06	7,18	531	-	-	-0,0517	503	499	-0,8
10.06	7,22	538	504	-0,064	-0,0517	511	504	-1,3
11.06	7,23	540	-	-	-0,0565	510	507	-0,5
12.06	7,26	546	-	-	-0,0565	515	512	-0,6
13.06	7,10	515	-	-	-0,0565	486	491	1,0
14.06	6,54	413	-	-	-0,0565	389	396	1,7
15.06	6,02	324	-	-	-0,0565	306	313	2,4
16.06	5,74	279	-	-	-0,0565	263	269	2,2
17.06	5,73	277	-	-	-0,0565	262	268	2,4
18.06	5,56	251	-	-	-0,0565	237	242	2,1

Окончание таблицы Е.1

Дата	*Н, м*	*Q(H), м³/с*	*Qи, м³/с*	$\tilde{q}_u$	$\tilde{q}_t$	*Qоп, м³/с*	*Qpt, м³/с*	*δ, %*
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*
19.06	*5,55*	*250*	-	-	*-0,0565*	*235*	*241*	*2,3*
20.06	*5,74*	*279*	*248*	*-0,111*	*-0,0565*	*263*	*269*	*2,2*
21.06	*6,09*	*336*	-	-	*-0,0874*	*306*	*324*	*5,8*
22.06	*6,55*	*415*	-	-	*-0,0874*	*378*	*398*	*5,2*
23.06	*6,46*	*399*	-	-	*-0,0874*	*364*	*384*	*5,5*

Примечания

1 В графу 3 заносятся значения расходов воды, рассчитанные по уравнению МКР *Q(H)* для каждого ежедневного уровня воды.

2 В графу 5 на дату каждого очередного ИРВ заносятся относительные отклонения, рассчитанные по формуле (9).

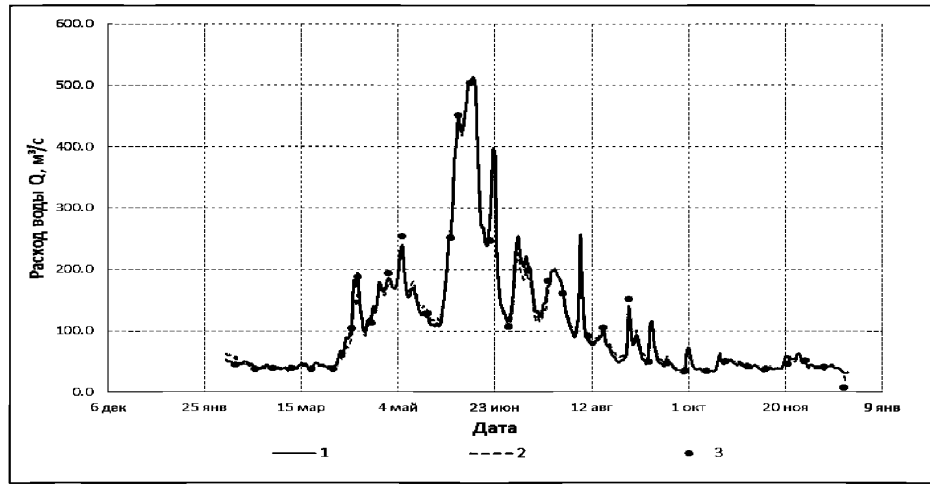
3 В графе 6 представлены относительные отклонения, рассчитанные по формуле (24) по данным двух последних измерений расходов. Это значение экстраполируется до следующего измерения расхода.

4 В графу 7заносятся оперативные значения расходов, рассчитываемые по формуле (8).

5 В графу 8 заносятся ЕРВ, рассчитанные по истечении года (режимные данные).

6 В графе 9 приведены результаты расчета ежедневных относительных погрешностей оперативного учета стока.

Е.4 Относительные погрешности оперативного учета стока для примера, представленного в таблице Е.1, не превышают 10 %. Случайная средняя ошибка по итогам 2000 года составила 10 %. Полученные в результате расчетов режимные и оперативные гидрографы стока показаны на рисунке Е.2.



1 – режимный; 2 – оперативный; 3 – измеренные расходы воды

Рисунок Е.2 – Гидрографы стока в створе ГП-р. Кубань – ст. Ладожская за период свободного русла 2000 года

Приложение Ж
(рекомендуемое)

Пример оперативного учета стока в условиях деформации русла с использованием метода оптимальной экстраполяции

Ж.1 Рассмотрим способ оперативного учета стока в условиях деформации русла с использованием оптимальной экстраполяции рядов относительных отклонений $\tilde{q}(t)$ на примере ГП р. Оскол – с. Ниновка.

Ж.2 МКР $Q(H)$ в створе ГП за предшествующие годы представлена на рисунке Ж.1 уравнение МКР для ГП р. Оскол – с. Ниновка имеет вид:

$$Q(H) = 4{,}4308 + 28{,}805H - 0{,}9984H^2 + 1{,}7847H^3. \qquad (Ж.1)$$

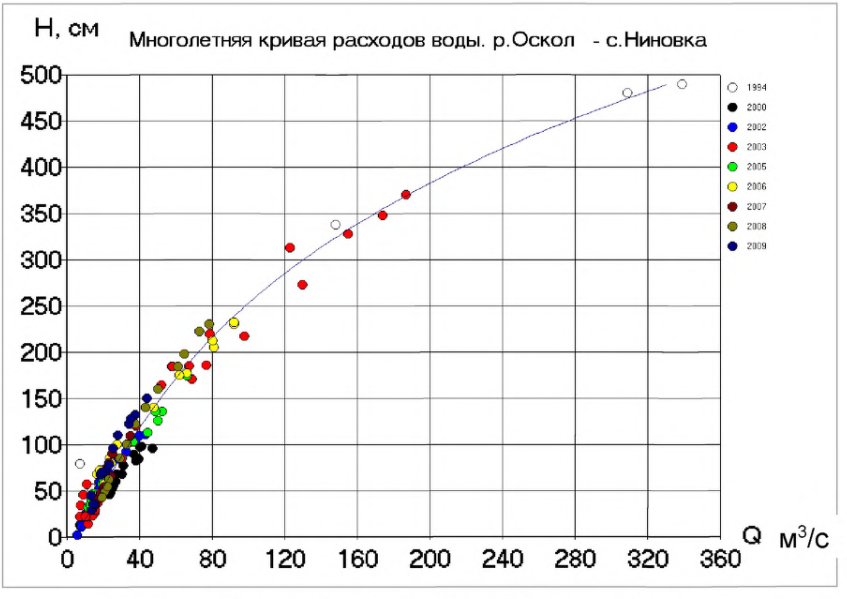


Рисунок Ж.1 – МКР в створе ГП р. Оскол – с. Ниновка

Параметры МКР приведены в таблице Ж.1.

Ж.3 Для оценки характеристик АКФ по формуле (9) рассчитываются относительные отклонения от МКР измеренных расходы воды за различные по водности годы. Пример такого расчета приведен в таблице Ж.2.

Т а б л и ц а Ж.1 – Параметры МКР в створе ГП р. Оскол – с. Ниновка

МКР, годы	Диапазон уровней, м	Параметры кривой				Характеристики аппроксимации		
		a_0	a_1	a_2	a_3	R*	$m_{\tilde{q}}$,** %	$\sigma_{\tilde{q}}^{***}$, %
1994,2000, 2002–2003, 2005–2009	От 0,02 до 4,89	4,4308	28,805	-0,9984	1,7847	0,993	0,15	16,96
* R – множественный коэффициент корреляции (должен быть наибольшим). ** $m_{\tilde{q}}$ – значение математического ожидания относительных остатков регрессии. *** $\sigma_{\tilde{q}}$ – среднеквадратическое значение относительных остатков регрессии.								

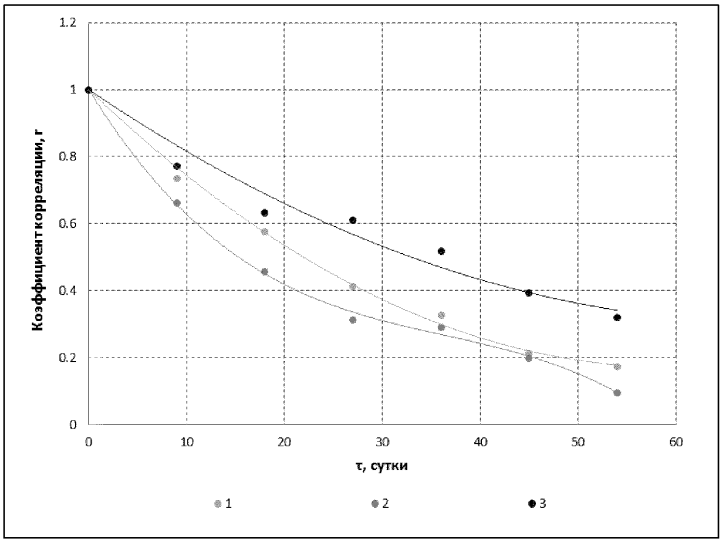
Т а б л и ц а Ж.2 – Пример расчета относительных отклонений ИРВ от МКР в створе ГП р. Оскол – с. Ниновка

Год	*Число, месяц*	*H, м*	*Q_u, м³/с*	*Q по МКР, м³/с*	$\tilde{q}_u$
1994	*25.03*	*1,84*	*58,0*	*65,2*	*-0,110*
	26.03	*3,38*	*148*	*159,3*	*-0,071*
	29.03	*4,89*	*339*	*330,1*	*0,027*
	30.03	*4,80*	*309*	*317,1*	*-0,025*
	12.05	*0,68*	*20,1*	*24,1*	*-0,167*
…	…	…	…	…	…
2009	*11.03*	*0,78*	*23,3*	*27,1*	*-0,141*
	12.03	*1,22*	*34,2*	*41,3*	*-0,172*
	13.03	*1,32*	*37,8*	*44,8*	*-0,157*
	14.03	*1,50*	*44,2*	*51,4*	*-0,140*
	16.03	*1,28*	*35,6*	*43,4*	*-0,180*

Ж.4 По данным о среднегодовых расходах воды предшествующих лет определяется величина среднего расхода воды за многолетие, и в совокупности лет выделяются маловодные, средние по водности и многоводные года. Составляются таблицы относительных отклонений для каждой группы лет по форме таблицы Ж.2, после чего для каждого из трех рядов относительных отклонений производится расчет АКФ На рисунке Ж.2 представлены графики АКФ для групп лет разной водности.

Ж.5 Для каждого из трех рядов относительных отклонений вычисляются значения меры погрешности по формуле (17).

Для групп маловодных, средних по водности и многоводных лет значения дисперсии рядов относительных отклонений $\sigma_{\tilde{q}}^2$ оказались равными соответственно: 0,050, 0,025 и 0,052. По этим данным и по формуле (17) получены следующие значения мер погрешности измерения для каждой группы лет: $\eta_{мал}$ = 0,08, $\eta_{ср}$ = 0,16, $\eta_{многоч}$ = 0,07.



1 – маловодных; 2 – средних по водности; 3 – многоводных

Рисунок Ж.2 – АКФ относительных отклонений для групп лет разной водности

Ж.6 Расчет оперативных значений расходов воды р. Оскол в створе с. Ниновка за период свободного русла 2010 года представлен в таблице Ж.3.

На каждую дату в графу 2 заносятся значения средних суточных уровней воды. В графу 3 на даты измерений заносятся значения ИРВ. В графу 4 помещаются значения $Q(H_и)$, рассчитанные по МКР для значений средних суточных уровней воды. Параметры МКР представлены в таблице Ж.1. В графу 5 занесены значения относительных отклонений $\tilde{q}_и$ на даты ИРВ, вычисленные по формуле (9).

Ж.7 Для расчета весовых коэффициентов оптимальной экстраполяции необходимо определить интервалы τ_{ij} между измерениями расходов воды. С этой целью в соответствии со схемой индексных обозначений по 6.5.5 (см. рисунок 2) должны быть определены следующие значения:

а) время в сутках от даты t_0, на которую производится расчет оперативного значения расхода воды до даты последнего ИРВ t_1

$$\tau_{01} = t_0 - t_1; \qquad (Ж.2)$$

б) время в сутках от даты последнего ИРВ t_1 до даты предпоследнего ИРВ t_2

$$\tau_{12} = t_1 - t_2; \qquad (Ж.3)$$

в) время в сутках от даты t_0, на которую производится расчет оперативного значения расхода воды до даты предпоследнего ИРВ t_2

$$\tau_{02} = \tau_{01} + \tau_{12}. \qquad (Ж.4)$$

Значения τ_{01}, τ_{12} и τ_{02} на каждые сутки заносятся соответственно в графы 6, 7 и 8 таблицы Ж.3.

Ж.8 Следующим этапом является расчет АКФ для каждого значения τ_{01}, τ_{12} и τ_{02} по зависимостям, представленным на рисунке Ж.2. Значения r_{01}, r_{12} и r_{02} на каждые сутки заносятся соответственно в графы 9, 10 и 11 таблицы Ж.3.

Водность года должна определяться по прогнозу. В начальный период расчета водность определяется по предыдущему году. В нашем случае в начальный период год признан маловодным (первоначально по предыдущему 2009 году, а затем – средним по водности по данным расчетного 2010 года).

Ж.9 Весовые коэффициенты p_1 и p_2 определяются по формулам (18) и (19) оптимальной экстраполяции с учетом значений АКФ $r(\tau)$ случайного процесса $\tilde{q}(t)$ при соответствующих параметрах сдвига τ_{ij}.

Ж.10 Выполняется оценка математического ожидания относительных отклонений $\tilde{q}$ по их двум последним значениям по формуле (21). Результаты заносятся в графу 14 таблицы Ж.3.

Ж.11 Вычисляется экстраполированное значение относительного отклонения по формуле (18), которое используется для расчета оперативных значений расходов воды вплоть до следующего измерения расхода воды.

Иногда в расчетах приходится опираться только на одно последнее значение ИРВ. Это случается, например, при редких измерениях расходов воды, которые обусловливают малую корреляционную связанность отклонений от УР. В этом случае необходимые характеристики вычисляются по формулам (23) и (24).

Ж.12 Расчет оперативных значений расходов воды на каждые сутки (графа 17) производится по формуле (8).

Ж.13 Относительные погрешности ЕРВ (графа 18) оцениваются путем сравнения рассчитанных оперативных значений расходов воды и режимных данных о ЕРВ, полученных по истечении года (графа 16) по формуле

$$\delta_{\text{отн } t} = \frac{Q_{\text{оп } t} - Q_{\text{р } t}}{Q_{\text{р } t}} \cdot 100, \qquad \text{(Ж.5)}$$

где $\delta_{\text{отн } t}$ – относительная погрешность расчета оперативного расхода воды на дату t;

$Q_{\text{оп } t}$ – значение оперативного расхода воды, рассчитанного на дату t;

$Q_{\text{р } t}$ – значение ЕРВ на дату t, полученное по истечении года (из режимных данных).

Случайная среднеквадратическая погрешность оперативного учета за весь период рассчитывается по формуле

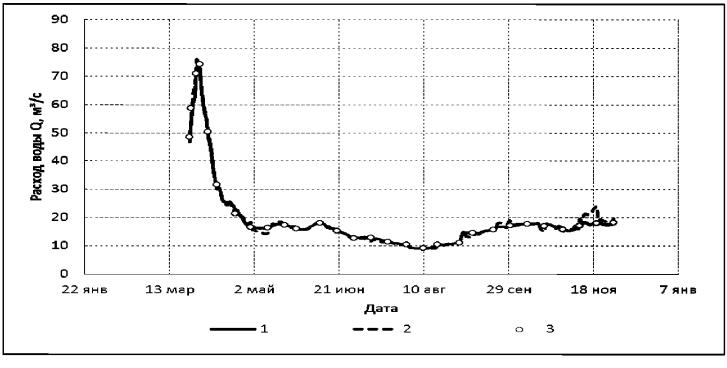
$$\sigma_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{\sum_1^N \delta^2_{\text{отн } t}}{N\text{-}1}}, \qquad \text{(Ж.6)}$$

где N – количество членов ряда.

Случайная среднеквадратическая погрешность оперативного учета стока р. Оскол в створе с. Ниновка за период свободного русла 2010 г. составила 6,5 %.

Ж.14 Пример оперативного учета стока за период свободного русла 2010 года для ГП р. Оскол в створе с. Ниновка представлен в таблице Ж.3.

На рисунке Ж.4 представлены режимный и оперативный гидрографы р. Оскол в створе с. Ниновка за период свободного русла 2010 г.



1 – режимный; 2 – оперативный; 3 – измеренные расходы воды

Рисунок Ж.4 – Гидрографы стока р. Оскол в створе с. Ниновка за период свободного русла 2010 года

Т а б л и ц а Ж.3 – Результаты расчета оперативных расходов воды для ГП р. Оскол в створе с. Ниновка за период свободного русла

Число, месяц ЧЧ.ММ	H, м	$Q_н$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	$\tilde{q}_и$	τ_{01}	τ_{12}	τ_{02}	r_{01}	r_{12}	r_{02}	p_1	p_2	$m_{\tilde{q}}$	$\tilde{q}_в$	$Q_р$, м³/с	$Q_{оп}$, м³/с	$\delta_{отн}$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21.04	0,59	21,4	21,4	-0,002	11	5	16	0,62	0,804	0,504	0,446	0,125	-0,036	-0,028	22,8	20,9	-8,5
22.04	0,58		21,2		1	11	12	0,957	0,620	0,594	0,768	0,101	-0,006	-0,003	22,6	21,1	-6,7
23.04	0,60		21,7		2	11	13	0,916	0,620	0,570	0,734	0,098	-0,006	-0,003	21,4	21,7	1,2
24.04	0,57		20,9		3	11	14	0,877	0,620	0,547	0,702	0,096	-0,006	-0,003	20,4	20,8	1,9
25.04	0,56		20,6		4	11	15	0,840	0,620	0,525	0,671	0,093	-0,006	-0,004	19,8	20,5	3,5
26.04	0,53		19,7		5	11	16	0,804	0,620	0,504	0,641	0,091	-0,006	-0,004	18,8	19,6	4,3
27.04	0,50		18,8		6	11	17	0,769	0,620	0,485	0,613	0,090	-0,006	-0,004	17,9	18,7	4,7
28.04	0,47		17,9		7	11	18	0,736	0,620	0,466	0,585	0,089	-0,006	-0,004	17,1	17,9	4,5
29.04	0,47		17,9		8	11	19	0,705	0,620	0,448	0,559	0,088	-0,006	-0,004	16,9	17,9	5,7
30.04	0,49	16,5	18,5	-0,109	9	11	20	0,675	0,620	0,432	0,534	0,087	-0,006	-0,004	16,4	18,4	12,4
01.05	0,44		17,1		1	9	10	0,957	0,675	0,647	0,753	0,119	-0,055	-0,089	16,4	15,5	-5,2
02.05	0,44		17,1		2	9	11	0,916	0,675	0,620	0,720	0,115	-0,055	-0,088	16,6	15,6	-6,2
03.05	0,42		16,5		3	9	12	0,877	0,675	0,594	0,689	0,111	-0,055	-0,086	16,3	15,1	-7,6
04.05	0,42		16,5		4	9	13	0,840	0,675	0,570	0,659	0,107	-0,055	-0,085	16,3	15,1	-7,5
05.05	0,40		15,9		5	9	14	0,804	0,675	0,547	0,629	0,104	-0,055	-0,083	16,2	14,6	-10,0
06.05	0,40		15,9		6	9	15	0,769	0,675	0,525	0,601	0,102	-0,055	-0,082	16,2	14,6	-9,9
07.05	0,40		15,9		7	9	16	0,736	0,675	0,504	0,575	0,100	-0,055	-0,081	16,3	14,6	-10,3

Приложение И
(рекомендуемое)

Примеры оперативного учета стока в осенний и весенний переходные периоды

И.1 Оперативный учет стока в осеннее-зимний переходный период

И.1.1 Методика расчета оперативных значений расходов воды в переходные периоды с использованием зависимости изменения ПСР от накопившейся суммы температуры воздуха, изложенная в 6.6.1, была опробована для ряда ГП на реках Сибири.

И.1.2 Рассмотрим подробнее алгоритм расчета для ГП с. Локоть на реке Алей (Алтайский ЦГМС) для осенне-зимнего периода 2005 года, результаты расчета по которому представлены в таблице И.1.

И.1.3 В качестве опорной для оперативного учета стока в 2005 году принята КР 2004 года, аппроксимированная аналитической зависимостью

$$Q = 9{,}9278H^2+37{,}282H-18{,}662. \qquad (И.1)$$

И.1.4 Для получения расчетных зависимостей использовались данные наблюдений в осенне-зимний период 2004 года, представленные в графах 1, 2, 3, 4, 7 таблицы И.1.

И.1.5 По УР (И.1) рассчитывались расходы, занесенные в 5-ю графу таблицы И.1. Это же УР в дальнейшем использовалось и для расчетов оперативных расходов воды за осенне-зимний период 2005 года.

И.1.6 Относительные отклонения, занесенные в 6-ю графу таблицы И.1, рассчитывались по формуле (9) для каждого ИРВ.

И.1.7 Нарастающие суммы отрицательных температур рассчитывались, начиная от первой отрицательной температуры, предшествующей появлению ледяных образований и заносились в 8-ю графу таблицы И.1. В графе 9 производились расчеты, необходимые для построения зависимости (32).

И.1.8 Для построения линейной зависимости по формуле (32) необходимо выбрать две точки. Первая точка должна соответствовать относительному отклонению $\tilde{q}$, рассчитанному для последнего ИРВ, предшествующего появлению отрицательных температур воздуха и ледяных образований. В рассматриваемом

примере это расход, измеренный 3 ноября при незначительных ледовых явлениях (сало, забереги), не оказывающих значительного влияния на ПСР. Рассчитанное $\tilde{q}_и$ на эту дату равно -0,017.

Т а б л и ц а И.1 – Данные наблюдений в створе ГП р. Алей – с. Локоть за осенне-зимний период 2004 года и расчеты, необходимые для построения зависимости (32)

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	*H*, м	$Q_и$, м³/с	*Q(H)*, м³/с	$\tilde{q}_и$	*t*, °С	Нараст. суммы *t*, °С	$\sqrt{\lvert\Sigma t_{отр}\rvert}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
30.10	Свободное русло	0,77	15,1	15,9	-0,052	3,3		
31.10		0,77	-	15,9	-	1,5		
01.11		0,77	-	15,9	-	0,0		
02.11		0,76	-	15,4	-	-2,8	-2.8	1,7
03.11	Сало, забереги	0,72	13,1	13,3	-0,017	-5,5	-8.3	2,9
04.11	Свободное русло	0,70	-	12,3	-	2,0	-6.3	2,5
05.11		0,69	-	11,8	-	0,5	-5.8	2,4
06.11		0,69	-	11,8	-	-0,3	-6.1	2,4
07.11		0,72	-	13,3	-	-2,5	-8.6	2,9
08.11	Забереги, сало	0,72	-	13,3	-	-4,5	-13.1	3,6
09.11		1,11	-	35,0	-	-5,0	-18.1	4,2
10.11		1,18	-	39,2	-	-4,0	-22.1	4,7
11.11	Забереги	0,92	-	24,0	-	-0,5	-22.6	4,7
12.11		0,94	-	25,2	-	-2,5	-25.1	5,0
13.11		0,94	-	25,2	-	-4,8	-29.9	5,5
14.11		0,94	-	25,2	-	-5,0	-34.9	5,9
15.11		0,93	-	24,6	-	-5,3	-40.2	6,3
16.11		0,93	-	24,6	-	-2,78	-43.0	6,5
17.11		0,86	-	20,7	-	-2,5	-45.5	6,7
18.11		0,82	-	18,6	-	-3,5	-49.0	7,0
19.11		0,79	-	17,0	-	-1,5	-50.5	7,1
20.11		0,77	-	15,9	-	-0,8	-51.3	7,1
21.11		0,77	-	15,9	-	-2,5	-53.8	7,3
22.11		0,77	-	15,9	-	-3,8	-57.6	7,6
23.11		0,74	-	14,4	-	-5,0	-62.6	7,9
24.11		0,73	-	13,8	-	-6,5	-69.1	8,3
25.11		0,71	-	12,8	-	-6,5	-75.6	8,7
26.11		0,71	-	12,8	-	-2,3	-77.9	8,8
27.11		0,73	-	13,8	-	-1,5	-79.4	8,9
28.11		0,76	-	15,4	-	-1,0	-80.4	8,9
29.11		0,77	-	15,9	-	-2,5	-82.9	9,1
30.11		0,77	-	15,9	-	-6,0	-88.9	9,4
01.12	Сало, забереги	0,77	-	15,9	-	-4,0	-92.9	9,6
02.12		0,77	-	15,9	-	-15,5	-108.4	10,4
03.12		0,90	-	22,9	-	-6,5	-114.9	10,7
04.12		0,89	-	22,4	-	-4,8	-119.7	10,9
05.12		0,88	-	21,8	-	-3,5	-123.2	11,1
06.12		0,87	-	21,3	-	-4,8	-128.0	11,3
07.12		0,83	-	19,1	-	-6,3	-134.3	11,6
08.12	Ледостав неполный	0,83	-	19,1	-	-4,8	-139.1	11,8
09.12		0,82	-	18,6	-	-3,0	-142.1	11,9
10.12		0,82	-	18,6	-	-3,5	-145.6	12,0

Окончание таблицы И.1

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	$\tilde{q}_и$	t, °С	Нараст. суммы t, °С	$\sqrt{\lvert\sum t_{отр}\rvert}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
11.12	Ледостав неполный, вода на льду	0,82	-	18,6	-	-3,8	-149.4	12,2
12.12		0,82	-	18,6	-	-1,0	-150.4	12,2
13.12		0,82	-	18,6	-	-4,0	-154.4	12,4
14.12		0,82	-	18,6	-	-4,8	-159.2	12,6
15.12	Ледяной покров с полыньями	0,84	-	19,7	-	-11,0	-170.2	13,0
16.12		0,87	12,3	21,3	-0,422	-17,0	-187.2	13,7
17.12		0,87	-	21,3	-	-4,0	-191.2	13,8
18.12		0,88	-	21,8	-	-9,3	-200.5	14,1
19.12		0,88	-	21,8	-	-17.5	-218.0	14,7
20.12		0,88	12,2	21,8	-0,441	-19,0	-237.0	15,4
21.12		0,89	-	22,4	-	-24,3	-261.3	16,1
22.12		0,90	-	22,9	-	-23,0	-284.3	16,8
23.12		0,93	-	24,6	-	-30,0	-314.3	17,7
24.12		0,93	-	24,6	-	-23,3	-337.6	18,4
25.12		0,93	-	24,6	-	-18,5	-356.1	18,8
26.12		0,93	-	24,6	-	-22,3	-378.4	19,4
27.12		0,93	-	24,6	-	-32,0	-410.4	20,2
28.12		0,94	-	25,2	-	-29,5	-439.9	21,0
29.12		0,95	-	25,7	-	-20,0	-459.9	21,4
30.12		0,98	13,6	27,4	-0,504	-17,0	-476.9	21,8
31.12		0,98	-	27,4	-	-9,5	-486.4	22,0

В качестве второй точки для расчета зависимости (32) берется относительное отклонение, рассчитанное для расхода воды, измеренного уже при ледоставе (16 декабря). В результате построения получаем линейную зависимость в виде прямой линии (далее – прямая), представленную на рисунке И.1, которая описывается уравнением (И.2).

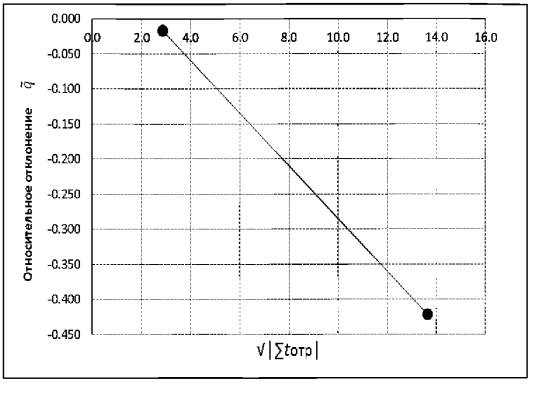


Рисунок И.1 – Зависимость относительных отклонений q от корня квадратного из модуля нарастающей суммы отрицательной температуры воздуха для ГП р. Алей – с. Локоть за осеннее-зимний период 2004 года

$$\tilde{q}_t = -0{,}03768\sqrt{|\Sigma t_{отр}|} + 0{,}0908. \qquad (И.2)$$

И.1.9 Зависимость (И.2) используется для расчетов оперативных значений расходов воды за осенне-зимний период 2005 года.

Т а б л и ц а И.2 – Результаты расчета оперативных значений расходов воды для ГП р. Алей – с. Локоть за осенне-зимний период 2005 года

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	t, °С	Нараст. суммы t, °С	$\sqrt{\lvert\Sigma t_{отр}\rvert}$	$\tilde{q}_и$	$Q_{оп}$, м³/с	Q_{pt}, м³/с	δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
01.11	Свободное русло	0,74	-	14,4	1,5			-		14,0	
02.11		0,69	-	11,8	1,5			-		11,3	
03.11		0,68	11,8	11,3	-1,3		0	0,046		10,7	
04.11		0,74	-	14,4	-4,5			-	15,0	14,0	-6,8
05.11		0,75	-	14,9	3,3			-	15,6	14,6	-6,2
06.11		0,74	-	14,4	3,5			-	15,0	14,0	-6,8
07.11		0,74	-	14,4	2,3			-	15,0	14,0	-6,8
08.11		0,74	-	14,4	-1,8	-1,8	1,3	-	15,0	14,0	-6,8
09.11		0,74	-	14,4	-2,0	-3,8	1,9	-	15,0	14,0	-6,8
10.11		0,74	-	14,4	-1,0	-4,8	2,2	-	15,0	14,0	-6,8
11.11		0,68	-	11,3	-1,3	-6,0	2,4	-	11,8	10,7	-9,3
12.11		0,68	-	11,3	-1,3	-7,3	2,7	-	11,8	10,7	-9,3
13.11		0,68	-	11,3	0,5	-6,8	2,6	-	11,8	10,7	-9,3
14.11		0,68	-	11,3	-0,8	-7,5	2,7	-	11,8	10,7	-9,3
15.11		0,72	-	13,3	-2,0	-9,5	3,1	-	13,9	12,9	-7,5
16.11	Сало, снежура	0,75	-	14,9	-2,0	-11,5	3,4	-0,037	15,6	13,0	-16,5
17.11	Ледяная перемычка выше поста	0,75	-	14,9	-2,8	-14,3	3,8	-0,051	14,3	13,1	-8,6
18.11		0,75	-	14,9	-5,5	-19,8	4,4	-0,076	14,1	13,3	-5,8
19.11		0,75	-	14,9	-10,0	-29,	5,5	-0,114	13,7	13,4	-2,5
20.11	Ледяной покров с полыньями	0,75	-	14,9	-14,0	-43,8	6,6	-0,158	13,2	13,5	2,4
21.11		0,75	-	14,9	-11,5	-55,3	7,4	-0,189	12,5	13,6	8,5
22.11		0,74	-	14,4	-10,8	-66,0	8,1	-0,215	11,7	13,7	17,6
23.11		0,74	-	14,4	-6,0	-72,0	8,5	-0,228	11,3	13,9	23,2
24.11		0,82	-	18,6	-1,8	-73,8	8,6	-0,232	14,3	14,0	-2,4
25.11		0,82	-	18,6	-7,5	-81,3	9,0	-0,248	14,3	14,1	-1,2
26.11		0,82	-	18,6	-5,0	-86,3	9,3	-0,258	14,0	14,2	1,6
27.11		0,81	-	18,1	-5,0	-91,3	9,6	-0,268	13,4	14,3	6,8
28.11		0,80	-	17,5	-3,8	-95,0	9,7	-0,276	12,8	14,5	13,1
29.11		0,79	-	17,0	-2,5	-97,5	9,9	-0,280	12,3	14,6	18,7
30.11		0,78	14,7	16,5	-2,5	-100,0	10,0	-0,107	11,8	14,7	24,1
01.12		0,78	-	16,5	-6,3	-106,3	10,3	-0,112	14,7	14,5	-1,4
02.12		0,77	-	15,9	-17,0	-123,3	11,1	-0,124	14,2	13,8	-2,5

Окончание таблицы И.2

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	t, °С	Нараст. суммы t, °С	$\sqrt{\lvert\sum t_{отр}\rvert}$	$\tilde{q}_и$	$Q_{оп}$, м³/с	Q_{pt}, м³/с	δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
03.12	Ледяной покров с полыньями	0,70	-	12,3	-18,0	-141,3	11,9	-0,136	10,8	10,3	-4,4
04.12		0,66	-	10,3	-12,5	-153,8	12,4	-0,144	8,9	8,3	-6,3
05.12		0,65	-	9,8	-6,0	-159,8	12,6	-0,147	8,4	7,8	-7,1
06.12		0,65	-	9,8	-5,0	-164,8	12,8	-0,150	8,3	7,8	-7,8
07.12		0,67	-	10,8	-10,0	-174,8	13,2	-0,156	9,2	8,5	-7,5
08.12		0,69	-	11,8	-19,5	-194,3	13,9	-0,167	9,9	9,3	-6,8
09.12		0,71	-	12,8	-24,0	-218,3	14,8	-0,180	10,7	10,2	-4,4
10.12		0,71	-	12,8	-28,0	-246,3	15,7	-0,194	10,5	10,0	-4,8
11.12		0,73	-	13,8	-31,0	-277,3	16,7	-0,209	11,2	10,8	-3,2
12.12		0,73	-	13,8	-31,0	-308,3	17,6	-0.223	11,0	10,8	-1,4
13.12		0,73	-	13,8	-26,0	-334,3	18,3	-0,234	10,8	10,7	-0,6
14.12		0,75	-	14,9	-10,5	-344,8	18,6	-0,238	11,4	11,4	-0,1
15.12		0,76	11,8	15,4	-8,5	-353,3	18,8	-0,234	11,7	11,8	0,5
16.12		0,76	-	15,4	-4,5	-357,8	18,9	-0,237	11,8	11,8	0,0
17.12		0,77	-	15,9	-6,8	-364,5	19,1	-0,240	12,2	11,9	-2,1
18.12		0,77	11,9	15,9	-7,5	-372,0	19,3	-0,253	12,1	11,9	-1,8
19.12		0,77	-	15,9	-12,0	-384,0	19,6	-0,252	11,9	11,8	-0,8
20.12		0,77	-	15,9	-14,5	-398,5	20,0	-0,258	11,9	11,7	-1,8
21.12		0,77	-	15,9	-20,0	-418,5	20,5	-0,265	11,8	11,7	-1,1
22.12		0,77	-	15,9	-19,0	-437,5	20,9	-0,272	11,7	11,6	-0,9
23.12		0,79	-	17,0	-15,3	-452,8	21,3	-0,278	12,4	11,5	-7,0
24.12		0,79	-	17,0	-15,5	-468,3	21,6	-0,283	12,3	11,4	-7,1
25.12		0,81	-	18,1	-16,0	-484,3	22,0	-0,289	12,9	11,4	-11,9
26.12		0,81	-	18,1	-12,8	-497,0	22,3	-0,293	12,8	11,3	-12,0
27.12		0,82	11,2	18,6	-7,0	-504,0	22,4	-0,397	13,1	11,2	-14,8
28.12		0,82	-	18,6	-5,8	-509,8	22,6	-0,340	11,2	11,2	0,0
29.12		0,82	-	18,6	-8,3	-518,0	22,8	-0,344	12,3	11,2	-8,6
30.12		0,83	-	19,1	-14,8	-532,8	23,1	-0,349	12,5	11,2	-10,7
31.12		0,84	-	19,7	-21,0	-553,8	23,5	-0,357	12,8	11,2	-12,4

И.1.10 Поэтапный алгоритм расчета, как если бы он производился в режиме реального времени, представлен в перечислении а) – е):

а) по уравнению КР за предыдущий 2004 год после получения срочных значений уровней воды рассчитываем срочное значение оперативного расхода воды Q(H), которое записывается в графу 5 таблицы И.2;

б) после каждого очередного ИРВ следует вычислить значение относительного отклонения $\tilde{q}_и$ ИРВ от опорной КР. Например, на дату 3 ноября получаем:

$$\tilde{q}_и = \frac{Q_{ит} - Q\,(H_{ит})}{Q\,(H_{ит})} = \frac{11{,}8-11{,}3}{11{,}3} = 0{,}046; \qquad (И.3)$$

в) с момента появления отрицательных среднесуточных температур воздуха начинаем рассчитывать их нарастающие суммы (в нашем случае это 8 ноября). Если ледяные образования не появляются, а среднесуточные температуры остаются положительными на протяжении нескольких суток, расчет начинают заново. До появления ледяных образований оперативные значения расходов воды рассчитываются по алгоритмам, изложенным в 6.3, 6.4, 6.5.

С того дня, когда замечены первые ледяные образования (16 ноября), относительные отклонения $\tilde{q}_t$ следует рассчитывать по зависимости, полученной в нашем случае по данным прошлого года по (И.2);

г) со второго дня наличия ледяных образований (17 ноября) оперативные значения расходов воды можно получать с использованием $\tilde{q}_t$, полученного по этой зависимости, например, для даты 17 ноября расчет оперативных значений расходов воды будет выглядеть следующим образом:

$$Q_{оп} = Q(H_t)(1+\tilde{q}_t) = 14{,}9(1+(-0{,}037)) = 14{,}3 \text{ м}^3/\text{с}; \qquad (И.4)$$

д) расчет по этому алгоритму можно вести до следующего измерения расхода воды (в нашем случае это 30 ноября);

е) с получением очередного ИРВ 30 ноября и рассчитанного для него относительного отклонения можно построить новую зависимость по формуле (15), используя данные уже текущего года. Для построения уточненной зависимости используем значения $\tilde{q}_и$, полученные на даты 3 ноября и 30 ноября, которым соответствуют значения $\sqrt{|\sum_1^\tau t_-|}$, равные соответственно 0 и 10. По этим данным получена линейная зависимость в виде прямой 1 на рисунке И.2, которая описывается уравнением

$$\tilde{q}_t = -0{,}0153\sqrt{|\Sigma t_{отр}|} + 0{,}0461. \qquad (И.5)$$

Это уравнение можно использовать для расчета оперативных значений расходов воды с 1 декабря вплоть до следующего измерения расхода.

И.1.11 После получения следующего ИРВ (15 декабря) зависимость можно уточнить, добавив еще одну точку на график и получить уточненную зависимость в виде прямой 2 (см. рисунок И.2), которая описывается уравнением (И.6). До следующего измерения расхода воды для расчетов можно использовать уточненное уравнение (И.6).

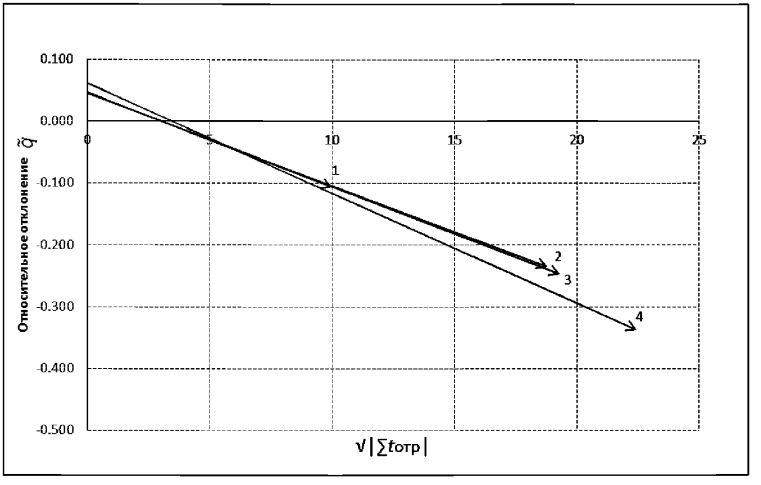


Рисунок И.2 – Зависимость относительных отклонений $\tilde{q}_и$ от корня квадратного из модуля нарастающей суммы отрицательной температуры воздуха для ГП р. Алей – с. Локоть за осенне-зимний период 2005 года

$$\tilde{q}_t = -0{,}0149\sqrt{|\sum t_{отр}|} + 0{,}0449. \qquad (И.6)$$

После следующего измерения (18 декабря) добавляем на график связи еще одну точку и получаем новое уточненное уравнение

$$\tilde{q}_t = -0{,}0152\sqrt{|\sum t_{отр}|} + 0{,}0459. \qquad (И.7)$$

Зависимость, представленная на рисунке И.2, существенно не изменялась в период с 1 по 18 декабря (прямые 1, 2, 3), что подтверждает правомерность принятого решения об использовании дополнительного фактора – среднесуточной температуры воздуха (см. 6.6.1.4.1) при расчете поправок $\tilde{q}_t$ в интервале от начала ледообразования до момента начала устойчивого ледостава.

И.1.12 Уточненная с использованием очередного ИРВ 27 декабря зависимость (И.8), которой соответствует прямая 4 на рисунке И.2, существенно отклоняется от прямых 1, 2, 3. Вероятнее всего, это связано с установлением более устойчивого ледостава. В этом случае дальнейший расчет оперативных расходов воды следует осуществлять по алгоритму, описанному в 6.5 без привлечения данных о температуре воздуха.

$$\tilde{q}_t = -0{,}0178\sqrt{|\Sigma t_{отр}|} + 0{,}0614 \qquad (И.8)$$

И.1.13 Для оценки эффективности предложенного алгоритма рассчитанные оперативные расходы воды сравнивались с режимными данными, полученными по годовой КР 2005 года с учетом изменения $K_{зим}$ (графа 11 таблицы И.2). Относительные погрешности оперативного учета стока на каждый день даны в графе 12. Как показывают результаты расчета, большая часть погрешностей в большинстве случаев не превышают 10 %. Среднеквадратическая погрешность оперативного учета стока за весь рассмотренный период составила 8,6 %.

И.2 Оперативный учет стока в зимнее-весенний переходный период

И.2.1 Расчет оперативных значений расходов воды в зимне-весенний период показан на примере ГП г. Хабаровск на реке Амур для 2012 года. Данные наблюдений в зимне-весенний период предыдущего 2011 года представлены в графах 1, 2, 3, 4, 7 таблицы И.3. По итогам года была построена годовая КР, аппроксимированная аналитической зависимостью:

$$Q = 482{,}62H^2 - 3653H + 10502. \qquad (И.9)$$

По этому уравнению для каждого ежедневного уровня рассчитываются ЕРВ, записанные в графу 5 таблицы И.3. По формуле (9) рассчитываются относительные отклонения $\tilde{q}_и$, которые занесены в графу 6 таблицы И.3. Напомним, что процесс стаивания льда по аналогии со стаиванием наледей развивается более интенсивно – в зависимости от суммы положительных температур воздуха, поэтому в графу 8 таблицы И.3 заносятся нарастающие суммы положительных среднесуточных температур воздуха, начиная с даты устойчивого перехода температуры воздуха через ноль (21 апреля).

И.2.2 Для построения зависимости $\tilde{q}_t = f(\sum t_\tau)$ используется значение относительного отклонения $\tilde{q}_и$ последнего, измеренного при ледоставе (21 марта) расхода воды, которому соответствует $\sum t_\tau$=0 и $\tilde{q}_и$, полученное в период свободного русла (11 мая) при $\sum t_\tau$=83,2. Значение $\tilde{q}_и$, полученное для расхода, измеренного 28 апреля, было отклонено из-за недостаточной устойчивости положительных температур воздуха.

Полученная зависимость представлена на рисунке И.3.

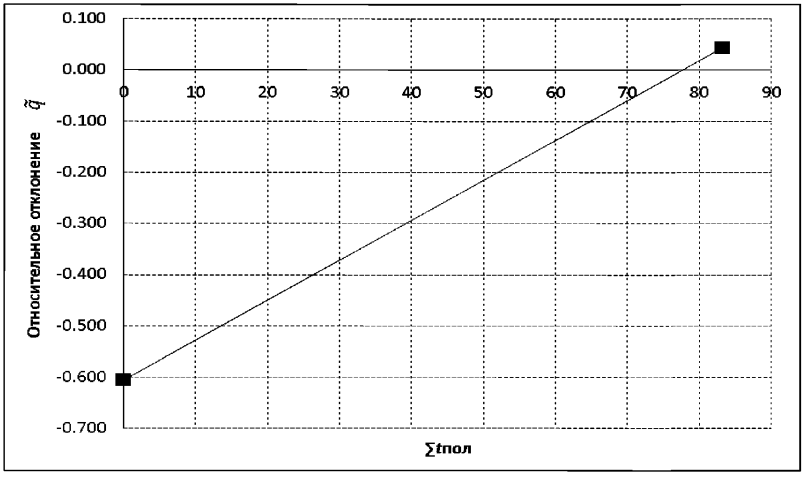


Рисунок И.3 – Зависимость относительных отклонений $\tilde{q}_и$ от нарастающей суммы положительных температур воздуха для ГП р. Амур – г. Хабаровск в зимне-весенний период 2011 года

Зависимость, представленная на рисунке И.3, описывается уравнением

$$\tilde{q}_t = 0{,}0078\sum t - 0{,}6056. \qquad (И.10)$$

Эта зависимость используется для расчетов оперативных значений расходов воды в зимне-весенний период 2012 года.

И.2.3 Дальнейший алгоритм расчета аналогичен представленному в предыдущем примере для ГП р. Алей – с. Локоть, за исключением расчета нарастающей суммы положительных температур воздуха вместо нарастающей суммы отрицательных температур в осенне-зимний переходный период.

Т а б л и ц а И.3 – Данные наблюдений на ГП р. Амур - г. Хабаровск за зимне-весенний период 2011 года и расчеты, необходимые для построения зависимости (33)

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	$\tilde{q}_и$	t, °С	Нараст. суммы t, °С
1	2	3	4	5	6	7	8
15.03	Ледостав, ледяной покров с торосами	6,41	-	6916	-	-16,4	
16.03		6,38	-	6841	-	-20,8	
17.03		6,36	-	6791	-	-20,0	
18.03		6,34	-	6741	-	-10,2	
19.03		6,34	-	6741	-	-1,2	
20.03		6,33	-	6717	-	-8,0	
21.03		6,31	2630	6668	-0,606	-12,2	
22.03		6,28	-	6595	-	-14,0	
23.03		6,27	-	6571	-	-14,8	
24.03		6,27	-	6571	-	-9,0	
25.03		6,25	-	6523	-	-15,2	
26.03		6,23	-	6476	-	-12	
27.03	Ледостав, ледяной покров с торосами, полыньями	6,20	-	6405	-	-9,8	
28.03		6,17	-	6336	-	-3,2	
29.03		6,15	-	6290	-	-2,0	
30.03		6,24	-	6499	-	-3,2	
31.03		6,24	-	6499	-	-2,8	
01.04		6,18	-	6359	-	4,0	
02.04		6,19	-	6382	-	-4,2	
03.04		6,21	-	6429	-	-9,8	
04.04		6,21	-	6429	-	-3,4	
05.04	Ледяной покров с полыньями	6,22	-	6452	-	2,2	
06.04		6,28	-	6595	-	6,4	
07.04		6,35	-	6766	-	-0,2	
08.04		6,45	-	7018	-	-1,6	
09.04		6,54	-	7254	-	3,6	
10.04	Закраины	6,77	-	7891	-	-2,0	
11.04		6,98	-	8517	-	-2,4	
12.04		7,24	-	9352	-	-1,0	
13.04		7,52	-	10324	-	-5,1	
14.04	Подвижка льда, разводья	7,70	-	10988	-	-1,9	
15.04	Разводья	8,12	-	12661	-	-0,3	
16.04	Подвижка льда, разводья	8,41	-	13915	-	-1,4	
17.04	Ледоход, навалы льда на берегах	8,45	-	14094	-	-1,6	
18.04		8,05	-	12370	-	-0,4	

Окончание таблицы И.3

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	$\tilde{q}_и$	t, °С	Нараст. суммы t, °С
1	2	3	4	5	6	7	8
19.04	Ледоход, навалы льда на берегах	7,69	-	10951	-		
20.04		7,45	-	10074	-		
21.04		7,29	-	9520	-	1,8	1,8
22.04		7,30	-	9554	-	-0,1	1,7
23.04		7,57	-	10505	-	1,6	3,3
24.04		7,31	-	9588	-	0,1	3,4
25.04		7,15	-	9056	-	0,4	3,8
26.04		7,01	-	8610	-	1,5	5,3
29.04		6,61	-	7442	-	5,0	13,4
30.04		6,61	-	7442	-	1,2	14,6
01.05		6,76	-	7862	-	6,0	20,6
02.05		6,76	-	7862	-	4,9	25,5
03.05		6,74	-	7805	-	5,4	30,9
04.05		6,74	-	7805	-	5,1	36,0
05.05		6,72	-	7748	-	9,0	45,0
06.05		6,74	-	7805	-	10,0	55,0
07.05		6,82	-	8036	-	10,1	65,1
08.05		6,93	-	8364	-	6,2	71,3
09.05		6,98	-	8517	-	2,8	74,1
10.05		7,02	-	8642	-	4,8	78,9
11.05		7,04	9080	8704	0,043	4,3	83,2

Результаты расчетов заносятся в таблицу И.4.

Т а б л и ц а И.4 – Результаты расчета оперативных значений расходов воды для ГП р. Амур – г. Хабаровск в зимне-весенний период 2012 года

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	t, °С	Нараст. суммы t, °С	$\tilde{q}_и$	$Q_{оп}$, м³/с	Q_{pf}, м³/с	δ,
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
22.03	Ледостав, ледяной покров с торосами	5,06	1970	4375	-8,4		-0,550	1845	1970	6,8
23.03		5,06		4375	-9,0			1970	1970	0,0
24.03		5,06		4375	-12,2			1970	1980	0,5
25.03		5,06		4375	-9,4			1970	1980	0,5
26.03		5,03		4338	-13,2			1954	1990	1,9
27.03		5,02		4326	-8,7			1948	1990	2,1
28.03		5,00		4303	-6,3			1938	2000	3,2
29.03		4,97		4268	1,2			1922	2000	4,1
30.03		4,98		4279	-3,5			1927	2010	4,3

Окончание таблицы И.4

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	t, °С	Нараст. суммы t, °С	$\tilde{q}_и$	$Q_{оп}$, м³/с	Q_{pf}, м³/с	δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
31.03	Ледостав, ледяной покров с торосами	4,96		4256	-13,0			1917	2010	4,9
01.04		4,96		4256	-12,8			1917	2020	5,4
02.04		4,97		4268	-13,6			1922	2020	5,1
03.04		5,06		4375	-8,2			1970	2030	3,0
04.04		5,12		4450	-7,0			2004	2030	1,3
05.04		5,15		4489	-7,4			2022	2050	1,4
06.04		5,16		4503	-8,4			2028	2050	1,1
07.04		5,20		4556	-3,8			2052	2120	3,3
08.04		5,24		4612	-4,6			2077	2160	4,0
09.04		5,29		4683	-1,6			2109	2210	4,8
10.04		5,33		4742	0,0			2136	2230	4,4
11.04	Ледяной покров с полыньями	5,39		4833	0,0			2177	2280	4,7
12.04		5,43		4896	-4,8			2205	2320	5,2
13.04		5,48		4977	-3,2			2241	2400	7,1
14.04		5,55		5094	4,2	4,2	-0,573	2294	2490	8,6
15.04		5,60		5180	3,6	7,8	-0,545	2213	2530	14,3
16.04	Закраины	5,65		5269	2,0	9,8	-0,529	2399	2590	8,0
17.04		5,71		5379	-4,0	5,8	-0,560	2533	2660	5,0
18.04		5,76		5473	-4,0	1,8	-0,592	2406	2770	15,1
19.04	Закраины	5,83		5609	6,2	8,0	-0,543	2291	2850	24,4
20.04		5,93		5811	5,0	13,0	-0,504	2654	2950	11,1
21.04	Подвижка льда, разводья	6,15		6290	11,6	24,6	-0,414	3119	3200	2,6
22.04		6,51		7174	12,0	36,6	-0,320	4206	3920	-6,8
23.04		7,36		9759	8,2	44,8	-0,256	6635	5380	-18,9
24.04	Ледоход, навалы льда на берегах	7,54		10396	7,4	52,2	-0,198	7733	5930	-23,3
25.04		6,99		8548	12,8	65,0	-0,099	6852	5930	-13,5
26.04		6,77		7891	12,2	77,2	-0,003	7113	6110	-14,1
27.04		7,10		8895	4,8	82,0	0,034	8864	7600	-14,3
28.04		6,83		8066	10,6	92,6	0,117	8340	7700	-7,7
29.04		6,24		6499	6,2	98,8	0,165	7258	7370	1,5
30.04	Свободное русло	6,16		6313	3,4	102,2	0,192	7355	7120	-3,2
01.05		6,66		7580	8,0	110,2	0,254	9032	7550	-16,4

И.2.4 Поэтапный алгоритм расчета, как если бы он производился в режиме реального времени представлен в перечислении а) – ж):

а) по уравнению КР за предыдущий (2011) год после получения среднесуточных значений уровней воды рассчитываем ЕРВ, которое помещается в графу 5 таблицы И.4;

б) после каждого ИРВ вычисляется значение относительного отклонения $\tilde{q}_и$ ИРВ от опорной КР. Например, на дату 22 марта получаем:

$$\tilde{q}_и = \frac{Q_{ит} - Q(H_{ит})}{Q(H_{ит})} = \frac{1970 - 4375}{4375} = -0{,}550; \qquad (И.11)$$

в) с момента устойчивого перехода температуры воздуха через ноль начинаем рассчитывать нарастающие суммы их среднесуточных значений (в нашем случае это 14 апреля). При возврате устойчивых отрицательных температур расчет начинают заново. До появления устойчивых положительных среднесуточных температур воздуха оперативные значения расходов воды рассчитываются по алгоритму, изложенному в 5.2;

г) расчет поправок $\tilde{q}_t$ с учетом температур воздуха выполняется, начиная с даты устойчивого перехода среднесуточных температур через ноль (14 апреля) по зависимости (33), полученной по данным прошлого года в виде уравнения

$$\tilde{q}_t = 0{,}0078\sum t_\tau - 0{,}6056. \qquad (И.11)$$

д) со второго дня наличия положительных температур воздуха (15 апреля) оперативные значения оперативных расходов воды рассчитываются по формуле (8) с использованием $\tilde{q}_t$, полученного по формуле (И.11). Например, для 15 апреля расчет оперативных значений расходов воды будет выглядеть следующим образом:

$$Q_{опт} = Q(H_t)(1+\tilde{q}_t) = 5180\cdot(1+(-0{,}573)) = 2213 \text{ м}^3/\text{с}. \qquad (И.12)$$

Расчет по этому алгоритму выполняется до следующего измерения расхода воды (в нашем случае это 3 мая);

е) с 30 апреля русло полностью освободилось от ледяных образований, и расчет оперативных значений расходов воды с этой даты может опять производиться по алгоритму, изложенному в 6.4, а именно, непосредственно по опорной КР, в качестве которой принята КР 2011 года;

ж) в графе 11 таблицы И.4 приведены относительные погрешности оперативного учета стока, полученные путем сравнения оперативных значений расходов воды с режимными данными, полученными в конце года. В большинстве случаев погрешности для периода весеннего таяния не превышают 15 %, а среднеквадратическая погрешность за весь переходный зимне-весенний период с 14 по 29 апреля оказалась равной 13,5 %.

Приложение К
(рекомендуемое)

Пример оперативного учета стока в осенне-зимний переходный период, основанный на закономерностях спада зимних расходов и истощения стока

К.1 Расчет оперативных расходов в период осеннего ледообразования с учетом закономерностей спада зимних расходов и истощения стока выполнен по данным ГП г. Алейск на реке Алей (Алтайский ЦГМС) в осенне-зимний переходный период 2005 года. Расчет оперативных расходов воды с учетом закономерностей спада зимних расходов выполнен в период от даты появления первых ледяных образований на участке ГП до даты первого измерения расхода воды в период устойчивого ледостава.

Первые ледяные образования в 2005 году на участке ГП г. Алейск на реке Алей отмечены 14 ноября, устойчивый ледостав установился 20 ноября, а первый расход при устойчивом ледоставе измерен 9 декабря.

К.2 Перед началом расчетов по данным предыдущего (2004) года по формуле (34) необходимо оценить значение параметра α_0. В 2004 году первые ледяные образования на участке ГП г. Алейск на реке Алей отмечены 7 ноября, устойчивый ледостав установился 16 ноября. В расчетах используется последний ИРВ, измеренный в период свободного состояния русла 5 ноября (Q_0 равный 18,5 м³/с), и первый расход, измеренный при устойчивом ледоставе 18 декабря, на 42-й день от первого появления ледяных образований (Q_0 равный 10,5 м³/с).

$$\alpha_0 = \frac{\sqrt{Q_0/Q_T} - 1}{T} = \frac{\sqrt{18{,}5/10{,}5} - 1}{42} = 0{,}0078. \qquad (К.1)$$

Рассчитанное по (К.1) значение α_0 используется для расчетов оперативных расходов воды в течение периода осеннего ледообразования с 14 ноября по 18 декабря 2005 года.

К.3 Для выполнения расчетов оперативных расходов воды в осенне-зимний переходный период 2005 года формируется таблица К.1.

К.3.1 В графы 1 – 4 таблицы К.1 заносятся данные наблюдений на ГП р. Алей – г. Алейск за осенне-зимний период 2005 года.

К.3.2 В графу 5 таблицы К.1 заносится расход воды, полученный по опорной КР, в качестве которой принята КР 2004 года, аппроксимированная уравнением (К.2)

$$Q = 0{,}1776H^3+0{,}547H^2+18{,}716H+17{,}592; \quad (К.2)$$

К.3.3 В графу 6 таблицы К.1 заносятся значения относительных отклонений, полученные по формуле (9).

К.4 В соответствии 6.6.2.3 для расчета оперативного расхода воды по формуле (34) используется значение расхода воды Q_0 в последний день открытого русла перед началом ледообразования – в 2005 году это 13 ноября. Для оценки Q_0 не может быть использован последний измеренный при свободном состоянии русла, так как он был измерен 17 октября (почти за месяц до появления ледяных образований). Поэтому Q_0 определяется по опорной КР для значения уровня воды, наблюденного в день, предшествующий дате наступления ледовых явлений – 13 ноября. В графу 7 таблицы К.1 заносятся значения количества суток, прошедших от первого появления ледяных образований, а в графу 8 таблицы К.1 заносится оперативный расход, вычисленный по формуле (34). Например, на дату 20 ноября расчет оперативного расхода воды записывается в виде

$$Q = \frac{Q_0}{(1+\alpha_0 T)^2} = \frac{15{,}0}{(1+0{,}0078\cdot 7)^2} = 13{,}5 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (К.3)$$

Такой порядок расчета оперативных расходов воды сохраняется до даты первого измерения расхода воды при устойчивом ледоставе, которое в 2005 году состоялось 9 декабря.

К.5 Вычисление оперативных расходов воды в период устойчивого ледостава следует производить по алгоритму, изложенному в 6.5 для оперативного учета стока при отсутствии однозначной КР.

К.6 По окончании года для оценки эффективности принятого алгоритма оперативного учета стока необходимо выполнить сравнение оперативных и режимных расходов воды. Вычисленные ежедневные относительные погрешности оперативного учета стока заносятся в графу 10 таблицы К.1. Среднеквадратическая погрешность оперативного учета стока с учетом закономерностей спада зимних расходов и истощения стока за расчетный период составила 4,1 %.

Т а б л и ц а К.1 – Результаты расчета оперативных значений расходов воды в период осенне-зимнего ледообразования 2005 года для ГП р. Алей – г. Алейск, осуществленный с учетом закономерностей спада зимних расходов и истощения стока

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	$\tilde{q}_и$	T^*, сут	$Q_{оп}$, м³/с	Q_{pt}, м³/с	δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10.11	Свободное русло	-0,16	-	14,6	-				
11.11		-0,16	-	14,6	-				
12.11		-0,16	-	14,6	-				
3.11		-0,14	-	15,0	-				
14.11	Сало, забереги	-0,16	-	14,6	-	1	14,8	15,3	3,7
15.11		-0,17	-	14,4	-	2	14,5	14,6	0,5
16.11		-0,21	-	13,7	-	3	14,3	13,1	-8,4
17.11		-0,11	-	15,5	-	4	14,1	13,1	-7,0
18.11		-0,10	-	15,7	-	5	13,9	12,9	-7,1
19.11		0,02	-	18,0	-	6	13,7	12,8	-6,4
20.11	Ледостав	0,00	-	17,6	-	7	13,5	12,7	-5,7
21.11		-0,11	-	15,5	-	8	13,3	12,6	-5,1
22.11		-0,18	-	14,2	-	9	13,1	12,4	-5,2
23.11		-0,15	-	14,8	-	10	12,9	12,3	-4,6
24.11		-0,08	-	16,1	-	11	12,7	12,2	-4,0
25.11		-0,10	-	15,7	-	12	12,5	12,1	-3,4
26.11		-0,15	-	14,8	-	13	12,4	12,0	-2,8
27.11		-0,20	-	13,9	-	14	12,2	11,9	-2,3
28.11		-0,18	-	14,2	-	15	12,0	11,8	-1,7
29.11		-0,17	-	14,4	-	16	11,8	11,6	-2,1
30.11		-0,19	-	14,1	-	17	11,7	11,5	-1,6
1.12		-0,22	-	13,5	-	18	11,5	11,4	-1,1
2.12		-0,20	-	13,9	-	19	11,4	11,3	-0,6
3.12		-0,17	-	14,4	-	20	11,2	11,2	-0,1
4.12		-0,15	-	14,8	-	21	11,1	11,1	0,3
5.12		-0,10	-	15,7	-	22	10,9	11,0	0,8
6.12		-0,08	-	16,1	-	23	10,8	10,8	0,2
7.12		-0,06	-	16,5	-	24	10,6	10,7	0,6
8.12		-0,06	-	16,5	-	25	10,5	10,6	1,0
9.12		-0,05	10,5	16,7	-0,370	26	10,4	10,5	1,4
10.12		-0,07	-	16,3	-		10,3	10,7	4,2
11.12		-0,08	-	16,1	-		10,1	10,9	7,4
12.12		-0,09	-	15,9	-		10,0	11,1	10,7
13.12		-0,08	-	16,1	-		10,1	11,4	12,3
14.12		-0,05	-	16,7	-		10,5	11,6	10,5
15.12		-0,03	-	17,0	-		10,7	11,8	9,9
16.12		-0,01	12	17,4	-0,311		11,0	12,0	9,4

Окончание таблицы К.1

Число, месяц ЧЧ.ММ	СВО	H, м	$Q_и$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	$\tilde{q}_и$	T*, сут	$Q_{оп}$, м³/с	Q_{pf}, м³/с	δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17.12		0,00	-	17,6	-		12,1	12,0	-1,1
18.12		0,00	-	17,6	-		12,1	11,9	-1,9
19.12		0,01	-	17,8	-		12,3	11,9	-2,9
20.12		0,01	-	17,8	-		12,3	11,8	-3,7
21.12		0,02	-	18,0	-		12,4	11,8	-4,7
22.12		0,03	-	18,2	-		12,5	11,8	-5,7
23.12		0,03	-	18,2	-		12,5	11,7	-6,5
24.12		0,05	-	18,5	-		12,8	11,7	-8,4
25.12		0,04	-	18,3	-		12,6	11,7	-7,5
26.12		0,06	-	18,7	-		12,9	11,6	-10,1
27.12		0,06	-	18,7	-		12,9	11,6	-10,1
28.12		0,06	-	18,7	-		12,9	11,5	-10,9
*T – время от начала расчета.									

Приложение Л
(рекомендуемое)

Примеры оперативного учета стока в период зарастания русла

Л.1 Оперативный учет стока в условиях зарастания русла с использованием интерполяционно-гидравлической модели

Л.1.1 Алгоритм оперативного учета стока в период зарастания русла на основе интерполяционно-гидравлической модели заключается в следующем:

- с каждым новым измерением расхода воды, площади поперечного сечения и ширины русла вычисляется значение параметра Великанова $m_з$ по формуле (36);

- полученное значение $m_з$ экстраполируется – принимается для расчета оперативного расхода воды $Q_{оп}$ по формуле (37) вплоть до следующей даты измерения расхода воды.

Л.1.2 Для надежной оценки параметра Великанова по данным прошлых лет строятся зависимости площади живого сечения и ширины русла от уровня воды при заросшем русле $\omega_з = f(H)$ и $B_з = f(H)$, представленные на рисунках Л.1 и Л.2. Для построения этих зависимостей необходимо выбирать значения $\omega_з$ и $B_з$, измеренные в том же створе, для которого выполняется расчет.

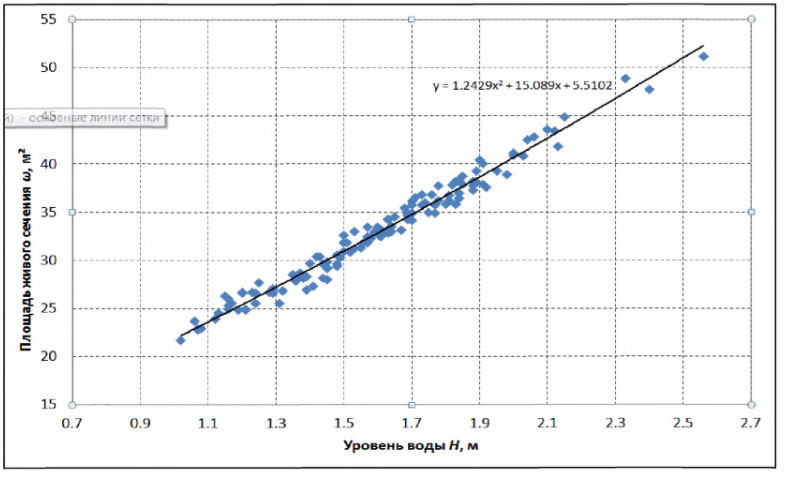


Рисунок Л.1 – Многолетняя зависимость площади живого сечения русла от уровня воды за период зарастания русла 2004-2011 годы в створе № 2 ГП р. Матыра – с. Крутое

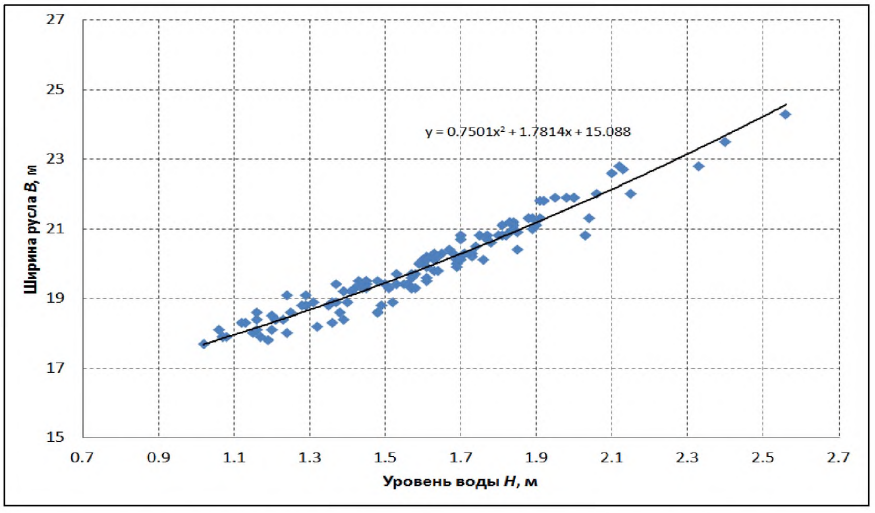


Рисунок Л.2 – Многолетняя зависимость ширины русла от уровня воды за период зарастания русла 2004-2011 годы в створе № 2 ГП р. Матыра – с. Крутое

Л.1.3 Значения оперативных расходов воды определяются на каждую новую дату по формуле (37). При этом значения площади живого сечения и ширины русла определяются по зависимостям $\omega_з = f(H)$ и $B_з = f(H)$ (рисунки Л.1 и Л.2) для значения среднего суточного уровня воды.

Пример расчета на дату 10 июня представлен в перечислении а) – в):

а) последнее измерение расхода воды, площади живого сечения и ширины русла состоялось 31 мая. Измеренные значения составили: $Q_{и\ 31\ мая}$= 5,57 м³/с, $\omega_{и\ 31\ мая}$= 30,7 м², $B_{и\ 31\ мая}$= 18,3 м. По этим данным рассчитано значение параметра Великанова:

$$m_{з31\ мая} = \frac{Q_{и\ 31\ мая} B_{и\ 31\ мая}^{2/3}}{\omega_{и\ 31\ мая}^{5/3}} = \frac{5{,}57 \cdot 18{,}3^{2/3}}{30{,}7^{5/3}} = 0{,}129; \qquad (Л.1)$$

б) значение среднего суточного уровня воды 10 июня $H_{10\ июн}$ =1,69 м. По уравнениям зависимостей, представленным на рисунках Л.1 и Л.2, определяем значения площади живого сечения и ширины русла:

$$\omega(H_{10\ июн}) = 34{,}6\ м^2,\ B(H_{10\ июн}) = 20{,}3\ м;$$

в) по формуле (37) вычисляем значение оперативного расхода воды на дату 10 июня:

$$Q_{10\ июн} = m_{з31\ мая} \frac{\omega_{10\ июн}^{5/3}}{B_{10\ июн}^{2/3}} = 0{,}129 \frac{34{,}6^{5/3}}{20{,}3^{2/3}} = 6{,}33\ м^3/с. \qquad (Л.2)$$

Л.2 Пример оперативного учета стока в условиях зарастания с использованием усовершенствованного метода оптимальной экстраполяции относительных отклонений $\tilde{q}$

Л.2.1 Рассмотрим пример расчета оперативных расходов воды на р. Матыра в створе с. Крутое в период зарастания русла 2012 года.

В качестве опорной КР для расчета оперативных расходов воды принята МКР, полученная по данным расходов воды, измеренных при свободном состоянии русла в 1994, 2000 – 2011 годы, представленная на рисунке Л.3. Параметры полученной МКР приведены в таблице Л.1.

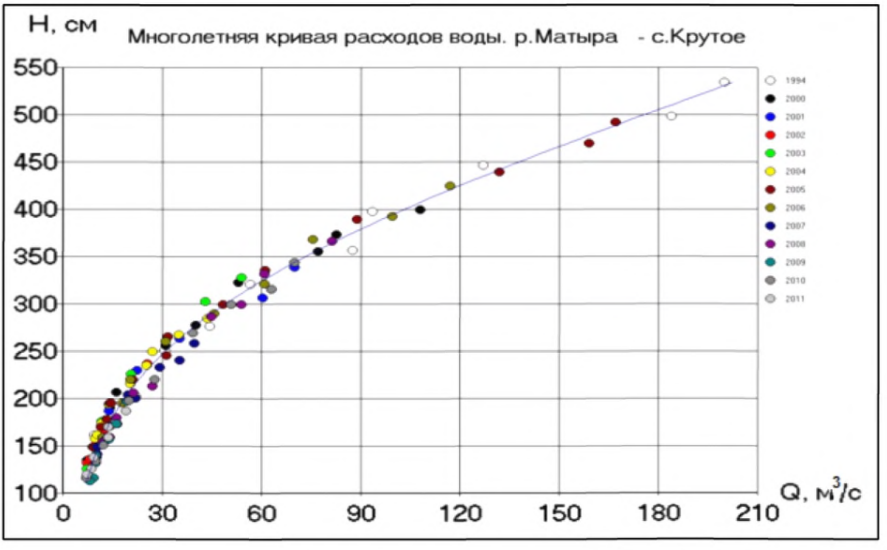


Рисунок Л.3 – МКР в створе ГП р. Матыра – с. Крутое при свободном состоянии русла

Т а б л и ц а Л.1 – Параметры зависимости, аппроксимирующей МКР в створе ГП р. Матыра – с. Крутое за периоды свободного русла 1994, 2000 – 2011 годы

МКР,год	Диапазон уровней воды, м	Параметры МКР					Ограничения по	
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	H, м	Q, м^3/с
1994, 2000-2011	От 1,13 до 5,35	-3,9812	16,873	-11,54	5,2112	-0,4291	0,85	5

Л.2.2 Хронологический ход относительных отклонений $\tilde{q}$ расходов, измеренных в периоды зарастания русла от опорной МКР представлен на рисунке Л.4.

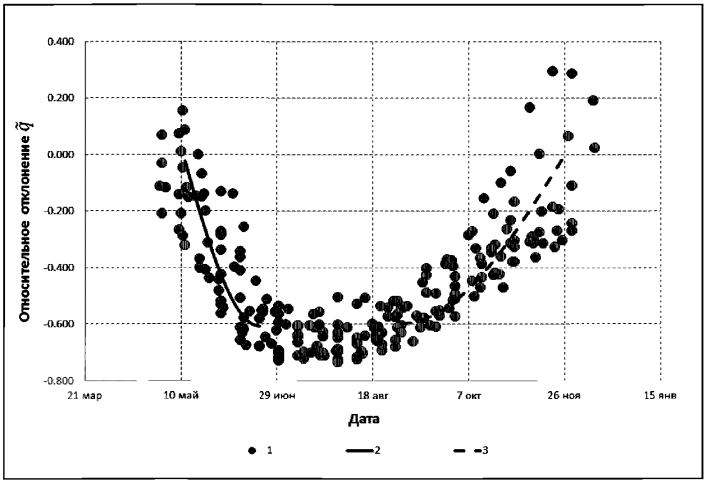


Рисунок Л.4 – Хронологический ход относительных отклонений $\tilde{q}$ от опорной МКР расходов воды, измеренных в периоды зарастания русла 1994, 2000 – 2011 годов

Значения относительных отклонений начинают уменьшаться после перехода среднесуточной температуры воды через 8 – 10 °С незадолго до явного появления водной растительности. По ходу развития растительности $\tilde{q}$ продолжают уменьшаться и достигают минимальных значений в середине лета (примерно одинаковые значения наблюдаются в период с 30 июня до 10 августа), что соответствует стоянию наивысших в году температур воздуха и воды. С уменьшением среднесуточных температур значения отклонений начинают увеличиваться. Это продолжается вплоть до появления первых ледяных образований, когда отклонения $\tilde{q}$, обусловленные растительностью, сменяются отклонениями, обусловленными ледовыми явлениями.

В рассматриваемом примере аппроксимацию хронологического хода относительных отклонений $\tilde{q}$ целесообразно выполнить с использованием тригонометрической функции косинуса (38) отдельно для ветви нарастания водной растительности и ветви ее отмирания. Для определения параметров уравнений косинусоиды для ветвей нарастания и спада водной растительности был проведен анализ всех имеющихся данных наблюдений за периоды зарастания русла предшествующих лет. Были определены даты начала и окончания зарастания (путем

осреднения соответствующих дат прошлых лет). Даты начала и окончания зарастания определяются путем осреднения соответствующих дат прошлых лет.

Сложнее определить даты окончания нарастания и начала отмирания. С этой целью необходимо построить хронологические графики отклонений $\tilde{q}$ ИРВ каждого года от опорной кривой, как показано на рисунке Л.5. За дату последнего дня нарастания рекомендуется принимать дату ИРВ, на которой прекращается резкое увеличение (по модулю) значений $\tilde{q}$. Например, для периода зарастания 2010 года эта дата приходится на 12 июня (см. рисунок Л.5). После этого наступает период приблизительно стабильного состояния растительности. За дату первого дня спада растительности целесообразно принять дату ИРВ, с которой начинается явное уменьшение по модулю значений $\tilde{q}$. Для 2010 г. эта дата приходится на 21 августа (см. рисунок Л.5). Средние даты окончания нарастания и начала спада определяются путем простого осреднения соответствующих дат всех рассматриваемых предшествующих лет.

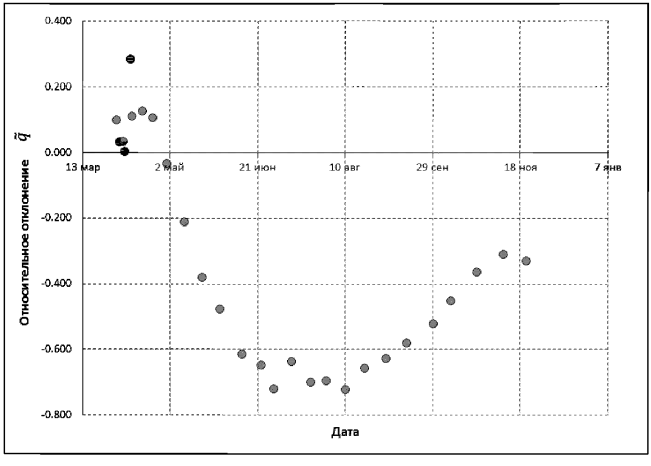


Рисунок Л.5 – Хронологический ход относительных отклонений $\tilde{q}$
ИРВ-от опорной МКР свободного русла
(период зарастания с 4 мая по 29 ноября.2010 г.)

Л.2.3 Значения параметра τ для расчета функции косинусоиды по формуле (38) для периодов нарастания/спада задаются равными

$$\tau = 1,2,3\ldots n, \qquad (Л.3)$$

где n – последний по счету день нарастания/спада растительности.

Длительности периодов нарастания и спада вычисляются как разности дат окончания и начала соответствующих периодов.

Л.2.4 Значение параметра a вычисляется для периода нарастания как среднее из максимальных (по модулю) значений $\tilde{q}$, рассчитанных на даты, принятые за последние дни периодов нарастания растительности каждого из рассмотренных лет. Значение параметра a для периода спада вычисляется как среднее из максимальных (по модулю) значений $\tilde{q}$, рассчитанных на даты, принятые за первые дни периодов отмирания растительности каждого из лет:

$$a_{\text{н}} = \frac{\sum_1^n \left|\tilde{q}_{\max \text{н}}\right|}{n}, \qquad (\text{Л.4})$$

$$a_{\text{с}} = \frac{\sum_1^n \left|\tilde{q}_{\max \text{с}}\right|}{n}, \qquad (\text{Л.5})$$

где n – число лет в совокупности.

Л.2.5 С использованием полученных параметров τ, $a_{\text{н}}$ и $a_{\text{с}}$ уравнения, аппроксимирующие ход относительных отклонений в период зарастания русла приобретают вид:

- для периода нарастания водной растительности:

$$\tilde{q}_{\text{нcos}} = 0{,}607 cos(2\pi\tau/(4 \cdot 40) + \pi/2); \qquad (\text{Л.6})$$

- для периода спада (отмирания) водной растительности:

$$\tilde{q}_{\text{ссos}} = 0{,}598 cos(2\pi\tau/(4 \cdot 86) + \pi). \qquad (\text{Л.7})$$

Полученные косинусоиды (Л.6) и (Л.7) нанесены на рисунок Л.4: соответственно линии 2 и 3.

Л.2.6 Уравнения для расчета АКФ приобретают следующий вид:

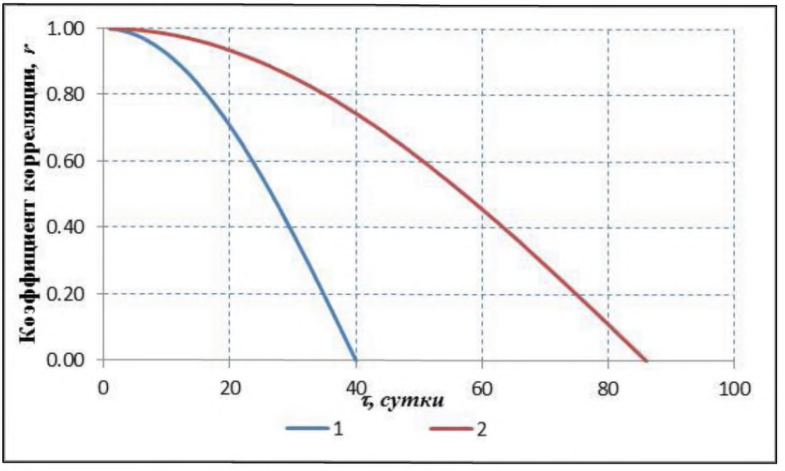
- для периода нарастания водной растительности

$$r(\tau) = cos(2\pi\tau/(4 \cdot 40)). \qquad (\text{Л.8})$$

- для периода спада (отмирания) водной растительности:

$$r(\tau) = \cos(2\pi\tau/(4 \cdot 86)). \qquad (Л.9)$$

На рисунке Л.6 представлены: 1 – АКФ, рассчитанная по формуле (Л.8) для периода нарастания, 2 – АКФ, рассчитанная по формуле (Л.9) для периода спада водной растительности. Как видно из рисунка Л.6, в период нарастания связанность между значениями ряда $\tilde{q}(t)$ значительно меньше, чем в период спада.



1 – для периода нарастания водной растительности;
2 – для периода спада водной растительности

Рисунок Л.6 – АКФ процесса отклонений $\tilde{q}$

Л.2.7 Следующие шаги соответствуют расчетам по методу оптимальной экстраполяции, изложенному в приложении Ж.

Л.2.8 Представленные на рисунке Л.4 отрезки косинусоид 2 и 3 отражают осредненные за многолетие характеристики ПСР в створе ГП р. Матыра – с. Крутое в период его зарастания водной растительностью. Как видно из графика (см. рисунок Л.4), разброс точек $\tilde{q}_и$, соответствующих, ИРВ относительно осредняющих линий достаточно велик: СКО разброса точек $\tilde{q}_и$, для обеих линий составляет 0,14, среднее значение для линии нарастания водной растительности равно 0, для линии отмирания водной растительности – 0,25. При этом в отдельные годы все отклонения могут иметь или положительный, или отрицательный знак, поэтому для расчета

оперативных расходов воды необходимо учитывать особенности изменения ПСР в каждом конкретном году. Будем выполнять учет этих особенностей на основе рядов остаточных отклонений $\tilde{q}''_{и}$ точек $\tilde{q}_{и}$ от значений, рассчитанных по уравнению косинусоиды $\tilde{q}_{cos}$, а именно рядов:

$$\tilde{q}''_{и} = \tilde{q}_{и} - \tilde{q}_{cos}. \qquad (Л.10)$$

Значения поправок $\tilde{q}_{t}$ в формуле (8) рассчитываются по формуле оптимальной экстраполяции, которая в этом случае запишется в следующем виде:

- для периода нарастания водной растительности:

$$\tilde{q}_{t} = p_1\tilde{q}''_1 + p_2\tilde{q}''_2 + \tilde{q}_{нcos}; \qquad (Л.11)$$

- для периода спада (отмирания) водной растительности:

$$\tilde{q}_{t} = p_1\tilde{q}''_1 + p_2\tilde{q}''_2 + \tilde{q}_{ccos}. \qquad (Л.12)$$

где $\tilde{q}''_1$ и $\tilde{q}''_2$ – значения остаточных отклонений, вычисленных на даты соответственно последнего и предпоследнего измерений расходов воды.

Исследования показали, что в период приблизительно стабильного состояния водной растительности, когда не происходит значительного изменения ПСР, поправки $\tilde{q}_t$ в формуле (8) можно вычислять методом скользящего среднего с использованием значений относительных отклонений одного или двух последних ИРВ по формуле (24).

Л.2.9 Процедура расчета оперативных расходов воды в период зарастания русла 2012 г. для ГП р. Матыра – с. Крутое, результаты которого представлены в таблице Л.2, представлена в перечислении а) – ж):

а) после завершения периода ледовых явлений на каждые сутки по значению среднего суточного уровня воды вычисляется значение расхода по опорной МКР. В то же время необходимо отслеживать рост температур воздуха и воды;

б) с каждым новым измерением расхода воды по формуле (9) получаем значение отклонения $\tilde{q}$;

в) если при приближении средней многолетней даты начала периода зарастания и установлении устойчивых температур воды выше 10 °С – 12 °С значение $\tilde{q}$ при очередном измерении расхода становится отрицательным (в рассматриваемом примере это произошло 10 мая, $\tilde{q}$ оказалось равным -0,048), то дату 11 мая можно принимать за дату начала периода нарастания водной растительности. Значение τ на эту дату принимается равным 1, и начинается расчет по формуле (Л.6);

г) расчет значений АКФ осуществляется по формуле (Л.8). Расчет весовых коэффициентов p_1 и p_2 – по формулам (19) и (20);

д) с каждым новым измерением расхода воды производится расчет значений остаточных отклонений $\tilde{q}_{и}^{''}$ по формуле (Л.10);

е) экстраполированные значения $\tilde{q}_t$ на период до следующего измерения расхода вычисляются по формуле (Л.11);

ж) расходы воды вычисляются по формуле (8).

Л.2.10 Например, на дату 3 июня, 23-й день от начала зарастания, расчет выглядит следующим образом:

- предварительно по данным прошлых лет рассчитывается значение меры погрешности измерений расходов воды

$$\eta = \frac{\tilde{\sigma}_{и}^2}{\sigma_{\tilde{q}}^2 \tilde{\sigma}_{и}^2} = \frac{0{,}10^2}{0{,}52^2 \cdot 0{,}10^2} = 0{,}04. \qquad (Л.13)$$

- по значению уровня воды, наблюденного 3 июня (H = 1,52 м) вычисляется расход воды ($Q(H)$ = 11,0 м^3/с);

- по значениям относительных отклонений последнего и предпоследнего ИРВ, равным соответственно: $\tilde{q}_1$ = -0,472, и $\tilde{q}_2$ = -0,247, и значениям отклонений $\tilde{q}_{нсоs}$, рассчитанных на эти же даты по формуле (Л.6), ($\tilde{q}_{нсоs1}$ = -0,429 и $\tilde{q}_{нсоs1}$ = -0,210, по формуле (Л.10) вычисляются остаточные отклонения $\tilde{q}_{и}^{''}$):

$$\tilde{q}_{и1}^{''} = \tilde{q}_{и1} - \tilde{q}_{cos1} = -0{,}472-(-0{,}429) = -0{,}043; \qquad (Л.14)$$

$$\tilde{q}_{и2}^{''} = \tilde{q}_{и2} - \tilde{q}_{cos2} = -0{,}247-(-0{,}210) = -0{,}038; \qquad (Л.15)$$

- с учетом значений τ_{01}= 1, τ_{12}= 11, τ_{02}= 14 по формуле (Л.8) вычисляются значения АКФ: r_{01}= 0,993, r_{12}= 0,908, r_{02}= 0,853;

- затем рассчитываются весовые коэффициенты формулы оптимальной экстраполяции:

$$p_1=\frac{(1+\eta)r(\tau_{01})-r(\tau_{02})\cdot r(\tau_{12})}{(1+\eta)^2-[r(\tau_{12})]^2}=\frac{(1+0{,}04)\cdot 0{,}993-0{,}853\cdot 0{,}908}{(1+0{,}04)^2-0{,}908^2}=1{,}006; \qquad (Л.16)$$

$$p_2=\frac{(1+\eta)r(\tau_{02})-r(\tau_{01})\cdot r(\tau_{12})}{(1+\eta)^2-[r(\tau_{12})]^2}=\frac{(1+0{,}04)\cdot 0{,}853-0{,}993\cdot 0{,}908}{(1+0{,}04)^2-0{,}908^2}=-0{,}059. \qquad (Л.17)$$

- по формуле (Л.6) рассчитывается значение отклонения $\tilde{q}_{нсоs}$ для значения τ = 23, что соответствует дате 3 июня, $\tilde{q}_{нсоs}=-0{,}476$;

- далее вычисляется экстраполированное значение поправки по формуле (Л.11)

$$\tilde{q}_э=p_1\tilde{q}_1''+p_2\tilde{q}_2''+\tilde{q}_{нсоs}=$$
$$=1{,}006\cdot(-0{,}043)+(-0{,}059)\cdot(-0{,}038)+(-0{,}476)=-0{,}518 \qquad (Л.18)$$

и значение оперативного расхода воды на дату 3 июня по формуле (8)

$$Q_{оп}=11{,}0\cdot(1-0{,}518)=5{,}31\ м^3/с. \qquad (Л.19)$$

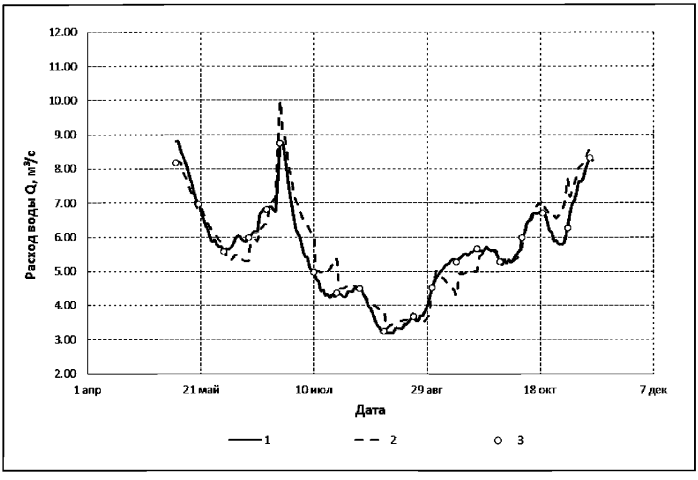
Дата начала периода приблизительно стабильного состояния растительности определяется как средняя по многолетним данным. Для этого периода значения поправок $\tilde{q}_t$ определяются на основе одного-двух последних измерений расходов воды методом скользящего среднего.

Дату начала периода спада развития водной растительности также можно определить как среднюю многолетнюю. Для периода спада расчет оперативных расходов воды выполняется аналогично описанному в перечислении а) – ж). При этом расчет значений АКФ осуществляется по формуле (Л.9), расчет отклонений $\tilde{q}_{ссоs}$ – по формуле (Л.7), а экстраполированные значения $\tilde{q}_t$ на период до следующего измерения расхода вычисляются по формуле (Л.12).

Т а б л и ц а Л.2 – Результаты расчета оперативных расходов воды для ГП р. Матыра в створе с. Крутое в период зарастания русла

Число, месяц, ЧЧ.ММ	$t_{водн}$, °С	H, м	$Q_{изм}$, м³/с	$Q(H)$, м³/с	$\tilde{q}$	т	$\tilde{q}_{cos}$	$\tilde{q}''_{н}$	τ_{01}	τ_{12}	τ_{02}	r_{01}	r_{12}	r_{02}	p_1	p_2	$\tilde{q}_э$	$Q_{оп}$, м³/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20.05	20,3	1,36	6,97	9,26	-0,247	9	-0,210	-0,038	10	15	25	0,924	0,832	0,556	1,278	-0,488	-0,271	6,76
21.05	20,4	1,37	-	9,36	-	10	-0,232	-	1	10	11	0,999	0,924	0,908	0,878	0,094	-0,270	6,84
22.05	20,6	1,38	-	9,47	-	11	-0,254	-	2	10	12	0,997	0,924	0,891	0,937	0,025	-0,290	6,72
23.05	21,0	1,38	-	9,47	-	12	-0,275	-	3	10	13	0,993	0,924	0,873	0,994	-0,044	-0,311	6,53
24.05	20,0	1,39	-	9,57	-	13	-0,296	-	4	10	14	0,988	0,924	0,853	1,050	-0,113	-0,330	6,41
25.05	19,0	1,40	-	9,67	-	14	-0,317	-	5	10	15	0,981	0,924	0,832	1,104	-0,181	-0,350	6,29
26.05	18,2	1,41	-	9,78	-	15	-0,337	-	6	10	16	0,972	0,924	0,809	1,157	-0,250	-0,369	6,17
27.05	17,2	1,43	-	9,99	-	16	-0,356	-	7	10	17	0,962	0,924	0,786	1,208	-0,317	-0,387	6,13
28.05	16,9	1,44	-	10,10	-	17	-0,375	-	8	10	18	0,951	0,924	0,761	1,256	-0,385	-0,405	6,02
29.05	17,7	1,45	-	10,20	-	18	-0,394	-	9	10	19	0,938	0,924	0,735	1,303	-0,452	-0,422	5,91
30.05	18,4	1,47	-	10,40	-	19	-0,412	-	10	10	20	0,924	0,924	0,707	1,348	-0,518	-0,438	5,87
31.05	18,2	1,48	5,57	10,50	-0,472	20	-0,429	-0,043	11	10	21	0,908	0,924	0,679	1,391	-0,583	-0,454	5,76
01.06	17,6	1,49	-	10,70	-	21	-0,445	-	1	11	12	0,999	0,908	0,891	0,895	0,075	-0,487	5,47
02.06	17,3	1,50	-	10,80	-	22	-0,461	-	2	11	13	0,997	0,908	0,873	0,951	0,008	-0,503	5,36
03.06	16,9	1,52	-	11,00	-	23	-0,476	-	3	11	14	0,993	0,908	0,853	1,006	-0,059	-0,518	5,31

Л.2.11 На рисунке Л.7 представлены режимный и оперативный гидрографы стока реки Матыра в створе с. Крутое за период зарастания русла 2012 г.



1 – режимный; 2 – оперативный; 3 – ИРВ

Рисунок Л.7 – Гидрографы стока реки Матыра в створе села Крутое за период зарастания русла с 18 мая по 10 ноября 2012 г.

Л.2.12 Для оценки эффективности предложенных методов выполнен расчет оперативных расходов воды в периоды зарастания русла 2008 – 2013 годов. Результаты сравнительных расчетов оперативных расходов воды с использованием экстраполяционно-гидравлической модели и усовершенствованного метода оптимальной экстраполяции приведены в таблице Л.3.

Относительные погрешности оперативных ЕРВ определялись по формуле

$$\delta_{\text{оп}\,t} = \frac{Q_{\text{оп}} - Q_{\text{р}\,t}}{Q_{\text{р}\,t}} \cdot 100, \qquad (Л.20)$$

где $Q_{\text{р}\,t}$ – значение ЕРВ по данным, опубликованным в справочниках водного кадастра «Ежедневные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши».

Случайная среднеквадратическая погрешность оперативного учета за весь период зарастания русла рассчитывается по формуле

$$\sigma_{оп}=\sqrt{\frac{\sum_1^N \delta_{оп}^2}{N\text{-}1}}, \qquad (Л.21)$$

где N – количество членов ряда.

Т а б л и ц а Л.3 – Оценка эффективности методов оперативного учета стока в период зарастания русла

Год	Годы, принятые для получения МКР,	Количество суток с $\delta_{опер\,t}$ >15 %, в % от общего числа суток в периоде				Систематическая, Средняя погрешность, %	Случайная среднеквадратическая погрешность оперативного учета стока $\sigma_{опер}$			
		зарастание (весь период)	нарастание водной растительности	стабильное состояние растительности	спад водной растительности		зарастание (весь период)	нарастание водной растительности	стабильное состояние растительности	спад водной растительности
Экстраполяционно-гидравлическая модель										
2008	1994, 2000-2007	16	36	5	18	-3,4	11,3	14	6,1	13,1
2009	1994, 2000-2008	5	10	8	0	-3,4	8,1	9,5	8,7	7,1
2010	1994, 2000-2009	15	33	22	0	5,7	11,3	14,7	14,0	5,4
2011	1994, 2000-2010	12	28	14	0	5,1	12,5	19,2	12,3	5,3
2012	1994, 2000-2011	13	21	16	8	-1,2	9,8	10,8	10,5	8,9
2013	1994, 2000-2012	13	48	0	9	1,3	10,4	19,3	4,3	8,3
Усовершенствованный метод оптимальной экстраполяции относительных отклонений $\tilde{q}$										
2008	1994, 2000-2007	5	0	7	6	-1,2	7,3	6,6	7,3	7,7
2009	1994, 2000-2008	8	3	17	2	-2,3	8,9	8,6	10,0	7,6
2010	1994, 2000-2009	4	6	5	0	1,7	7,4	8,4	7,9	6,1
2011	1994, 2000-2010	1	9	0	0	1,7	5,8	8,8	5,2	3,8
2012	1994, 2000-2011	7	0	8	8	1,3	7,9	5,8	9,2	7,7
2013	1994, 2000-2012	10	26	0	10	-0,6	8,2	11,2	4,0	9,9

Систематические погрешности оперативного учета стока определялись как средние значения по всей совокупности относительных погрешностей оперативного учета стока в период зарастания.

Значение максимально допустимой относительной погрешности оперативного учета стока принято равным 15 %.

Как видно из таблицы Л.3, расчет оперативных расходов воды в период зарастания русла с использованием усовершенствованного метода оптимальной экстраполяции относительных отклонений позволяет существенно снизить случайные средние квадратические, систематические и наибольшие погрешности оперативного учета стока по сравнению с экстраполяционно-гидравлической моделью.

Следует отметить, что отдельные случаи превышения допустимой погрешности наблюдаются в каждом из исследованных периодов зарастания. Установлено, что в период приблизительно стабильного состояния водной растительности снижение ПСР, которому соответствует увеличение отрицательных значений $\tilde{q}$, может происходить в результате потепления и, как следствие, более бурного развития растительности. И наоборот, увеличение ПСР с уменьшением значений $\tilde{q}$ по модулю может происходить после прохождения значительных осадков и паводков и, как следствие, пригибания водной растительности ко дну. В период спада водной растительности допустимая погрешность оперативного учета стока может быть превышена из-за недоучета увеличения ПСР при прохождении небольших дождевых паводков.

Библиография

[1] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2. Гидрометеорологические наблюдения на постах. Ч. II. Гидрологические наблюдения на постах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 264 с.

[2] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Ч. I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. – *3-е изд., переработанное и дополненное.* – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 384 с.

[3] Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Ч. II. Гидрологические наблюдения и работы на малых реках. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 262 с.

[4] Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Служба гидрологических прогнозов. Ч. I. Прогнозы режима вод суши – Л.: Гидрометеоиздат, 1962. – 193 с.

[5] Карасев И. Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 310 с.

[6] Карасев И. Ф., Яковлева Т. И. Усовершенствованные методы гидрометрического учета стока. Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда, Секция 1. – М.: Метеоагенство Росгидромета, 2006. – С. 195-202

[7] 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

[8] Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.

[9] Гандин Л.С., Каган Р.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 360 с.

[10] Карасев И. Ф., Яковлева Т. И. Экстраполяционно-аналитический метод оперативного учета стока рек с неустойчивым руслом (на примере р. Амударьи) – Труды ГГИ, 1988, вып.325, С. 19-30.

[11] 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.

[12] 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.: Гидрометеоиздат, 1958. – 292 с.

[13] Kolupaila St. Hidrometrija, T.1, Kaunas, 1939. – 396 с.

[14] Поляков Б. В. Гидрологические исследования нижней Волги. – М.: Госстройиздат, 1938. – 160 с.

[15] Соколов Б. Л. Наледи и речной сток. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 190 с.

[16] Методические рекомендации по учету стока на реках в зимний и переходный периоды. – Л., ГГИ, 1980. – 80 с.

[17] Пономарев В.П. Подземное питание горных рек юга Дальнего Востока. – Труды ГГИ, 1979. – Вып. 272

[18] 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

[19] Статистические методы в гидрологии / под ред. Русинова М.И. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 200 с.

[20] Устойчивые статистические методы оценки данных / под ред. Р.Л. Ленера, Г.Н. Уилкинсона. – М. Машиностроение, 1984. – 232 с.

Ключевые слова: расход воды, пропускная способность русла, кривая расходов, аппроксимация, оперативный учет стока, мера погрешности, автокорреляционная функция, экстраполяция расходов воды, оптимальная экстраполяция

Лист регистрации изменений

Номер изме-нения	Номер страницы				Номер документа (ОРН)	Подпись	Дата	
	изме-ненной	заме-ненной	новой	аннулированной			внесения изменений	введения изменений

gost.e-ecolog.ru