Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации
Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Государственное учреждение
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

Санкт-Петербург
Нестор-История
2009

gost.e-ecolog.ru

УДК 556.048

Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

Настоящие Рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в расчетном створе надлежит использовать при расчете гидрологических характеристик для строительного проектирования, а также при подготовке Территориальных строительных норм по территории деятельности УГМС. Кроме того, Рекомендации могут оказаться полезными при обобщении гидрометеорологической информации в пунктах наблюдений Росгидромета, а также в пунктах кратковременных наблюдений, полученных в результате полевых гидрометеорологических изысканий, выполняемых проектно-изыскательскими и научно-исследовательскими организациями при строительном проектировании.

ISBN 978-5-98187-324-9

Методические рекомендации рассмотрены и одобрены
Методической Комиссией ГУ «ГГИ»
3 марта 2009 г. Протокол № 1



© Государственное учреждение «Государственный гидрологический институт» ГУ «ГГИ», 2009

Предисловие

Настоящие Рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в расчетном створе надлежит использовать при расчете гидрологических характеристик для строительного проектирования, а также при подготовке Территориальных строительных норм субъектов Российской федерации. Кроме того, Рекомендации могут оказаться полезными при обобщении гидрометеорологической информации в пунктах наблюдений Росгидромета, а также в пунктах кратковременных наблюдений, полученных в результате полевых гидрометеорологических изысканий, выполняемых проектно-изыскательскими и научно-исследовательскими организациями при строительном проектировании.

Рекомендации составлены в лаборатории расчетов стока Государственного гидрологического института проф. А.В. Рождественским и канд. техн.наук А.Г. Лобановой. Основные разделы Рекомендаций подготовлены: проф. А.В. Рождественским (Общие положения — раздел 5), канд. техн. наук А.Г. Лобановой (раздел 6 и примеры расчетов А.1–А.5) ; канд. геогр. наук. Г.А. Плиткиным (раздел 7) с участием канд. техн. наук А.В. Сикана (включая примеры расчетов А.7–А.9, раздел 7); канд.техн.наук С.М. Тумановской (раздел 8 и Приложения Б, В, Г), с участием канд.техн.наук А.В.Сикана, (раздел 8, примеры расчетов А.11–А.13, А.22); проф. А. М. Владимировым (раздел 9 и пример расчета А.14) с участием канд. геогр. наук М.Л. Маркова (раздел 9 и примеры расчетов А.15, А.16); д-ра техн. наук В.А. Бузина (раздел 10 и примеры расчетов А.17, А.18) с участием вед. инж. Т. Л. Шалашиной (пример расчета А.19); вед. инж. Т.Л. Шалашиной (раздел 11 и пример расчета А.20); канд. геогр. наук В.Ф. Усачевым (раздел 12 и пример расчета А.21), канд. техн. наук Е.В. Орловой и с. н. с. В.Г. Седовым (Приложение Д).

Общее руководство всеми работами по подготовке настоящих методических рекомендаций осуществлял проф. А.В. Рождественский. Научное редактирование рекомендаций выполнили проф. А.В. Рождественский и канд. техн. наук А.Г. Лобанова.

Кроме настоящих Методических рекомендаций в ГГИ подготовлены следующие рекомендации:

1. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 78 с.

2. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. — Гидрометеоиздат, 1979. — 64 с.

3. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. — Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. — 133 с.

4. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных наблюдений. — С.-Петербург: Ротапринт ГНЦ ААНИИ, 2007. — 66 с.

Введение

В настоящих Рекомендациях по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в пункте проектирования более подробно раскрывается смысл многих методических положений, изложенных в Своде правил по определению расчетных гидрологических характеристик [Свод, 2004], приводятся алгоритмы расчета, даются пояснения по использованию вычислительных программ и более полно представлены примеры расчета различных гидрологических характеристик. Кроме того, в Рекомендациях более полно представлены многочисленные таблицы, которые значительно облегчают производство инженерных гидрологических расчетов. Некоторые положения, изложенные в Своде правил [Свод, 2004], не имеют прямого отношения к подготовке Территориальных Справочников — монографий (Территориальные строительные нормы) «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», но могут оказаться полезными при проектировании гидротехнических сооружений и при решении других вопросов научной гидрологии и различных практических вопросов. Территориальные строительные нормы по определению расчетных гидрологических характеристик должны содержать обобщение исходной гидрологической информации в виде удобном для гидрологического обоснования проектирования новых, расширения, реконструкции, ликвидации и технического перевооружения действующих предприятий, зданий и сооружений для всех видов строительства и инженерной защиты территорий. В настоящих Рекомендациях рассматривается обработка исходной гидрометрической информации в пунктах гидрометрических наблюдений, включая их приведение к многолетнему периоду в соответствии с методическими Рекомендациями [Методические, 2007].

Настоящие Рекомендации могут быть использованы не только при подготовке Территориальных строительных норм, а и при гидрологических расчетах для проектирования, строительства и эксплуатации различных водохозяйственных и гидротехнических сооружений на водных объектах России и обеспечивающие их безопасность.

В целях удобства пользователей настоящими методическими рекомендациями основные положения СП 33-101-2003 [Свод, 2004] повторяются, как правило, без ссылки на этот нормативный документ.

1. Область применения

В настоящих Рекомендациях используются положения и методы инженерных гидрологических расчетов, изложенные в нормативном документе СП 33-101-2003 «Определение основных гидрологических характеристик».

Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений предназначены для использования в инженерно-гидрологических расчетах по определению гидрологических характеристик для обоснования проектирования новых, расширения, реконструкции и технического перевооружения действующих предприятий, зданий и сооружений для всех видов строительства и инженерной защиты территорий для строительного проектирования, а также при пространственно-временном обобщении гидрометеорологической информации с целью дальнейшей подготовки справочников-монографий «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» по территории деятельности УГМС Российской Федерации.

Кроме того, данные Рекомендации могут быть использованы при решении практических и научных задач в других отраслях экономики, включая комплексное использование и охрану водных ресурсов и многих других задач, стоящих перед гидрологией.

2. Нормативные ссылки

В настоящем отчете использованы ссылки на следующие стандарты:

СНиП 11-02-96 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения

СП 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик

СП 11-103-97 Инженерные гидрометеорологические изыскания для строительства

ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения

ГОСТ 7.32-2001 Отчет о научно-исследовательской работе

3. Термины и определения

В настоящем отчете использованы следующие термины с соответствующими определениями:

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

Гидрологические характеристики: количественные оценки элементов гидрологического режима.

Клетчатка вероятностей: специальная клетчатка с прямоугольной системой координат, построенная таким образом, что на них спрямляются (полностью или частично) различные кривые обеспеченности.

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

Обеспеченность гидрологической характеристики: вероятность того, что рассматриваемое значение гидрологической характеристики может быть превышено среди совокупности всех возможных ее значений.

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

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

Объем стока: количество воды, протекающее через рассматриваемый створ водотока за какой либо период времени.

Водохозяйственный год: расчетный годичный период времени, начинающийся с самого многоводного сезона.

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

Нелимитирующий период: часть водохозяйственного года за вычетом лимитирующего периода.

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

Подпор воды: повышение уровня воды из-за наличия в русле реки препятствия для ее движения.

Соответственные уровни воды: уровни воды на двух гидрологических постах, относящиеся к одинаковым фазам уровенного режима, — гребням резко выраженных подъемов или самым низким точкам.

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

Водоохранные зоны: территории, которые примыкают к береговой линии морей, рек, ручьев, каналов, озер, водохранилищ.

Береговая полоса: полоса земли вдоль береговой линии водного объекта, предназначенная для общего пользования.

Зона затопления: площадь затопленных земель при заданном значении наблюденного уровня воды

4. Обозначения и сокращения

Росгидромет — Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

ГУ «ГГИ» — Государственное учреждение «Государственный гидрологический институт».

ВФ ГУ «ГГИ» — Валдайский филиал государственного учреждения «Государственный гидрологический институт».

УГМС — межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

ЦГМС — центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ЦГМС-Р — центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями

НИР — научно-исследовательская работа

ГВК — государственный водный кадастр

ОГХ — основные гидрологические характеристики

ЕДС — ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши

МДС — многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши

ГОСТ — Государственный стандарт

СП — свод правил по определению расчетных гидрологических характеристик

СНиП — строительные нормы и правила

ГП — гидрологический пост.

ТН — технический носитель

5. Общие положения

5.1. Исходная гидрометеорологическая информация

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений в расчетном створе применяются региональные методы определения расчетных гидрологических характеристик и пространственные региональные обобщения данных гидрометеорологических наблюдений за многолетний период в соответствии с работами [Свод, 2004; Методические рекомендации, 1986; Методические рекомендации 1996; Методические рекомендации 2007].

Определение расчетных гидрологических характеристик при пространственном обобщении данных гидрометеорологических наблюдений в районе проектирования должно основываться на гидрометеорологических наблюдениях, опубликованных в официальных документах Росгидромета, и неопубликованных данных последних лет наблюдений, а также на данных наблюдений, содержащихся в архивах Госгидрометфонда, изыскательских, проектных и других организаций, включая опросы местных жителей. При отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений в пункте проектирования необходимо проводить полевые гидрометеорологические изыскания [СНиП 11-02-96, СП 11-103-97] с последующей обработкой полученных материалов в соответствии с работами [Свод, 2004; Методические рекомендации, 1986; Методические рекомендации 1996; Методические рекомендации 2007]. Таким образом, мы всегда будем иметь гидрометеорологическую информацию при строительном проектировании и при решении других конкретных практических задач в расчетном створе с учетом полевых гидрометеорологических изысканий. В таком случае могут возникнуть вопросы, зачем необходимо проводить исследование по обобщению в районе проектирования гидрологических наблюдений, зачем осуществлять поиск региональных зависимостей, если имеются данные наблюдений. Ответ на поставленные вопросы следует искать в повышении качества гидрологических расчетов путем использования совокупной оценки расчетной гидрологической характеристики, основанной на использовании нескольких методов ее определения. Тогда окончательное значение расчетной гидрологической характеристики может быть получено путем осреднения расчетных значений, полученных по данным наблюдений и по региональным зависимостям. При осреднении желательно учесть случайные погрешности определения расчетных гидрологических характеристик каждого метода по формуле:

$$y = \frac{\sum_{i-1}^{k} \frac{1}{\sigma_i^2} y_i}{\sum_{i=1}^{k} \frac{1}{\sigma_i^2}}, \qquad (5.1)$$

где y_i — значение рассматриваемой гидрологической характеристики, определенное по различным методам, σ_i^2 — абсолютные дисперсии случайных погрешностей для каждого метода, k — число методов от $i = 1$ до κ.

В этом случае наибольший эффект возникает при одновременном использовании кратковременных наблюдений, полученных, например, в результате полевых

изысканий и региональных зависимостей, когда случайные погрешности определения расчетных гидрологических характеристик не сильно различаются. Программа проведения полевых гидрометеорологических изысканий в пункте или районе проектирования устанавливается в зависимости от состава определения расчетных гидрологических характеристик, в зависимости от уровня надежности (класса капитальности) гидротехнических сооружений. Эта программа полевых работ должна быть отражена заказчиком в условиях договора на проведение проектных работ в соответствии с нормативными документами регламентирующими производство гидрометеорологических изысканий [СНиП 11-02-96, СП 11-103-97]. Ранее проведенные гидрометеорологические изыскания в районе проектирования должны обязательно учитываться при производстве гидрологического обоснования проектирования гидротехнического сооружения в исследуемом створе. При этом должны быть использованы методы обобщения гидрологической информации во времени и пространстве изложенные в работах [Свод, 2004; Рекомендации, 1979, Международное руководство, 1984;, Методические рекомендации, 2007; Рекомендации, 1984; Методические рекомендации, 1966; Методические указания, 1986; Пособие, 1984]. При этом должно быть обращено особое внимание на новые методы, которые ранее не применялись при пространственно-временном обобщении гидрологической информации. В качестве примера можно привести методику восстановления за многолетний период данных кратковременных гидрометеорологических наблюдений, полученных, например, в результате полевых гидрометеорологических изысканий. Действительно, полевые работы могли быть выполнены ранее, то есть до разработки новых методов восстановления кратковременной гидрометеорологической информации [Рождественский и др., 1991; Методические рекомендации, 2007]. В таком случае данные полевых наблюдений следует заново обработать в соответствии с методикой, изложенной в работах [Свод, 2004, Методические рекомендации, 2007].

Кроме того, следует использовать достоверные данные наблюдений за гидрологическими характеристиками по архивным, литературным и другим материалам, относящимся к периоду времени до начала регулярных наблюдений. В этом случае представляет особый интерес также информация, которая может быть получена в период стационарных наблюдений за катастрофическими гидрологическими явлениями, касающаяся продолжительности выдающегося гидрологического явления, выходящего за пределы наблюденного периода времени. При этом необходимо указать источник, на основании которого установлена катастрофическая гидрологическая информация, и произвести оценку достоверности и точности полученных материалов. В качестве примера можно привести сведения за историческими максимумами стока и уровней воды на р. Лена в среднем течении и на реках горной части бассейна р. Кубани.

Кроме того, при обобщении гидрометеорологической информации во времени и пространстве, а также при решении практических задач инженерной гидрологии необходимо использовать метеорологические факторы формирования гидрологических характеристик. Метеорологические элементы могут быть использованы при установлении зависимостей гидрологических характеристик и параметров расчетных схем и формул. Метеорологические факторы стока целесообразно использовать при восстановлении гидрологических характеристик за ранние годы (за период продолжительности наиболее продолжительных

наблюдений в пунктах – аналогах), в периоды пропусков гидрологических наблюдений, а также за поздние годы для закрытых водомерных постов. Подобные работы могут существенно расширить наши представлении о многолетних колебаниях различных гидрологических характеристик. В результате проведения таких гидрологических расчетов точность определения расчетных гидрологических характеристик существенно повысится и, следовательно, улучшится качество гидрологических расчетов при решении практических задач проектирования, эксплуатации, консервации и ликвидации гидротехнических сооружений.

5.2. Оценка качества исходной гидрометеорологической информации

Прежде чем приступить к гидрологическим расчетам по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, то есть прежде чем осуществить пространственное обобщение исходной гидрометеорологической информации за многолетний период, необходимо произвести тщательный анализ исходных данных наблюдений. Этот анализ включает оценку качества исходных данных, оценку случайных и систематических погрешностей исходных данных гидрометеорологических наблюдений [Рождественский А.В. и др., 1990]. Это особенно важно потому, что случайные погрешности исходных данных наблюдений оказывают систематическое влияние на определение выборочных параметров (коэффициенты вариации. асимметрии и автокорреляции между смежными членами исходных рядов наблюдений) и расчетных квантилей гидрологических характеристик. Важно подчеркнуть, что случайные ошибки исходных данных приводят к систематическим ошибкам в определении расчетных значений гидрологических характеристик. К сожалению, сведения о случайных погрешностях публикуемых данных гидрометеорологических наблюдений, как правило, отсутствуют. В результате анализа качества исходных данных восстановить в полном объеме случайные средние квадратические погрешности не представится возможным. Однако, некоторые суждения о качестве данных гидрометеорологических наблюдений сделать можно. Для этого желательно провести анализ качества исходных данных наблюдений за гидрологическими характеристиками. При этом данные гидрометрических наблюдений, вызывающие сомнение следует подвергать проверке, включающей гидрометрический анализ:

– полноты и надежности наблюдений за уровнями и расходами воды;

– наличия данных о наивысших (мгновенных и среднесуточных) и наинизших уровнях воды за время наблюдений при свободном ото льда русле, ледяном покрове, ледоходе, заторе льда, заросшем водной растительностью русле, подпоре от ниже расположенной плотины, сбросах воды выше гидрометрического створа, полноты учета стока воды на пойме и протоках;

– влияние хозяйственной деятельности на речной сток и другие виды анализа.

Ненадежные данные гидрометрических наблюдений при невозможности их уточнения исключают из расчетного ряда наблюдений. В необходимых случаях должен выполняться пересчет стока воды за отдельные периоды.

Для рек, в бассейнах которых имеет место интенсивная хозяйственная деятельность, существенно нарушающая естественный гидрологический режим рек, определение расчетных гидрологических характеристик производят по двум расчетным схемам.

Первая расчетная схема предполагает приведение гидрологических рядов наблюдений к естественным однородным и стационарным условиям с использованием воднобалансовых и регрессионных методов [Методические рекомендации, 1986; Методические рекомендации, 1986]. В расчетное значение гидрологической характеристики, полученной по естественному ряду вводят поправку на влияние хозяйственной деятельности. Численное ежегодное значение поправки представляет собой разность между бытовым стоком и естественным стоком. Значение поправки расчетной вероятности ежегодного превышения определяют по кривой распределения вероятностей поправок.

Во второй расчетной схеме гидрологические ряды наблюдений приводят к бытовому стоку за весь период наблюдений в предположении, что сложившийся комплекс хозяйственной деятельности с учетом реальных планов развития народного хозяйства действовал с начала наблюдений. Восстановление бытового стока за весь период наблюдений производят воднобалансовыми и регрессионными методами в предположении, что режим хозяйственной деятельности за истекшее время не изменялся, то есть находился в стационарном состоянии. Восстановленный ряд проверяют на физическую и статистическую однородность и стационарность. Определение расчетных гидрологических характеристик в этом случае производят по данным за весь период наблюдений с учетом приведения данных наблюдений к многолетнему периоду без введения поправки на хозяйственную деятельность.

Приведение речного стока к естественному периоду не производят, если суммарное значение его изменений не выходят за пределы случайной средней квадратической погрешности исходных данных наблюдений. Предпочтение следует давать первой расчетной схеме, т.к. естественные характеристики стока и других гидрологических характеристик лучше поддаются пространственному обобщению нежели гидрологические характеристики нарушенные под влиянием антропогенных факторов.

Методология предлагаемых двух расчетных схем может быть применена для расчета основных гидрологических характеристик с учетом регионального изменения климата.

Кроме гидрометрических методов анализа качества исходной информации вполне может использоваться первичный анализ исходных данных. К числу таких способов можно отнести:

1. Совмещенные хронологические графики многолетних колебаний основных гидрологических характеристик в однородном районе и по длине реки.

2. Продольные профили водной поверхности основных гидрологических характеристик за конкретные годы.

3. Совмещенные профили водной поверхности основных гидрологических характеристик по длине реки.

4. Хронологические графики нарастающих сумм основных гидрологических характеристик.

5. Тренды основных гидрологических характеристик с оценкой их физической и статистической значимости.

6. Графики связи основных гидрологических характеристик по разным водомерным постам.

7. Графики связи основных гидрологических характеристик от основных факторов, включая высоту водосбора, площадь водосбора и другие.

8. Графики связи нарастающих сумм основных гидрологических характеристик между разными постами.

9. Оценка однородности основных гидрологических характеристик с использованием генетических методов.

10. Оценка качества основных гидрологических характеристик с использованием статистических методов, включая оценку однородности экстремальных значений и оценку стационарности параметров распределения основных гидрологических характеристик.

11. Восстановление естественных значений основных гидрологических характеристик, нарушенных хозяйственной деятельностью [Методические рекомендации, 1966; Методические рекомендации, 1986].

12. Методы водного баланса и руслового водного баланса.

13. Регрессионные методы.

5.3. Оценка качества определения расчетных гидрологических характеристик

Особое значение должно быть уделено оценке точности и оценке надежности расчетных значений гидрологических характеристик. В настоящее время случайные и систематические погрешности определения расчетных значений гидрологических характеристик во многом оказывают влияние на само значение проектных гидрологических характеристик. В качестве примера подобного подхода можно привести оценку расчетного значения гидрологических характеристик, полученную путем осреднения расчетных значений гидрологических характеристик, полученных разными методами, включая региональные зависимости, с учетом случайных погрешностей их определения, когда весовые коэффициенты при осреднении определяются обратно пропорционально дисперсиям случайных погрешностей (5.1). Кроме того, знание случайных погрешностей нередко дает основание для последующего более детального генетического и статистического анализа полученных результатов расчета. Оценка точности определения расчетных гидрологических характеристик при некоторых фиксированных значениях параметров распределения осуществляется в соответствии с нормативным документом [Свод, 2004]. Однако наиболее полные сведения о случайных и систематических погрешностях инженерных гидрологических расчетов при любых значениях выборочных параметров и квантилей представлены в монографиях [Рождественский А.В. , 1977; Рождественский А.В. и др., 1990].

Средняя квадратическая погрешность расчета проектных значений гидрологических характеристик и их параметров, определяемых по региональным зависимостям, определяется с учетом отклонений эмпирических точек от этих зависимостей. При этом используются статистические методы, которые должны быть дополнены генетическими методами анализа случайных и особенно систе-

матических погрешностей полученных региональных зависимостей. При оценке случайных погрешностей расчетных значений основных гидрологических характеристик всегда нужно стремиться к определению случайных погрешностей, полученных на независимом от расчета материале наблюдений. Лишь при невозможности оценить случайные погрешности расчетных значений гидрологических характеристик и параметров расчетных схем и формул на независимом материале наблюдений допускается, как вынужденная мера, производить оценку случайных погрешностей на зависимом от расчета материале наблюдений. При этом следует иметь в виду, что случайные погрешности, полученные на зависимом от расчета материале наблюдений всегда меньше чем погрешности, полученные на независимом от расчета материале наблюдений.

5.4. Основные методы определения расчетных гидрологических характеристик

Наряду с предлагаемыми в настоящих Методических рекомендациях методами определения расчетных гидрологических характеристик можно рекомендовать и использовать другие региональные формулы при надлежащем их обосновании [Свод, 2004]. При прочих равных условиях всегда следует стремиться использовать наиболее простые региональные зависимости, включающие меньшее число параметров, определяемых по выборочным данным наблюдений.

При отсутствии гидрометрических наблюдений в расчетном створе параметры распределения и расчетные значения гидрологических характеристик определяются с помощью следующих основных методов:

— водного баланса;

— гидрологической аналогии;

— осреднения в однородном районе;

— построения карт изолиний;

— построения региональных зависимостей стоковых характеристик и параметров расчетных схем и формул от основных физико-географических факторов водосборов;

— построения зависимостей между годичными стоковыми характеристиками и формирующими сток факторами;

— построения зависимостей, основанных на использовании материалов полевых гидрометеорологических изысканий и кратковременных гидрологических наблюдений, отражающих пространственные закономерности распределения гидрологических характеристик.

Метод водного баланса

Метод водного баланса применяется при наличии качественных наблюдений за основными составляющими водного баланса. Чем за более короткий промежуток времени составляется водный баланс тем больше требуется информации за определением различных элементов водного баланса, которые очень редко определяются с достаточной точностью при определении расчетных гидрологических

характеристик в случае отсутствия данных гидрометрических наблюдений в исследуемом гидрологическом створе. Поэтому метод водного баланса редко применяется в практике гидрологических расчетов. В данном случае можно привести лишь некоторые сведения по использованию метода водного баланса за годичные интервалы времени при исследовании уровней воды бессточных водоемов. Уровни воды за годовой интервал времени для бессточных озер определяется через осадки на поверхность озера и испарение с водной поверхности, а также притока речных вод в озеро за годовые интервалы времени. При этом учитываются морфометрические зависимости площади озера от уровня воды в озере.

В последнее время начинают использоваться русловые водные балансы за более короткие промежутки времени, учитывающие время добегания, русловое регулирование и некоторые другие факторы. При использовании метода водного баланса и руслового водного баланса особенно большое значение имеет оценка случайных и систематических погрешностей выполненных расчетов, которые могут быть получены при определении невязок водного баланса, все составляющие водных балансов определяются независимым путем.

Метод гидрологической аналогии

Общие условия по выбору рек-аналогов включают:

— оценку пространственной структуры колебаний рассматриваемой гидрологической характеристики, отражающей характер пространственной связанности рассматриваемой гидрологической характеристики, включая оценку пространственной корреляционной функции с учетом ее физической и статистической однородности;

— однотипность стока рек аналогов и исследуемой реки;

— географическую близость расположения водосборов;

— однородность условий формирования стока, сходство климатических условий, однотипность почв (грунтов) и гидрогеологических условий, близкую степень озерности, залесенности, заболоченности и распаханности водосборов;

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

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

Для каждой гидрологической характеристики должны учитываться дополнительные условия, которые приведены в соответствующих разделах настоящих рекомендаций. В качестве одного из основных требований является наличие достаточно продолжительного ряда на реке-аналоге, который при недостаточности наблюдений приводится к многолетнему периоду в соответствии с нормативным документом [Свод, 2004] и в соответствии с методическими рекомендациями [Рекомендации, 1979; Методические рекомендации, 2007].

Метод осреднения в однородном районе

При статистической однородности параметров распределения в гидрологическом районе расчетное значение параметров в исследуемом створе следует

определять как среднее арифметическое значение для рек — аналогов, имеющих наиболее продолжительные ряды наблюдений или по приведенным к многолетнему периоду данным. Однородность параметров распределения устанавливается с использованием статистических критериев однородности согласно нормативного документа [Свод, 2004] и методических рекомендаций [Рекомендации, 1984].

Метод построения карт изолиний

При статистической неоднородности значения гидрологических характеристик и их параметров их численные значения следует определять по районным картам изолиний, которые строятся на основе использования всей имеющейся к моменту проектирования гидрологической информации, приведенной к многолетнему периоду, в соответствии с работами [Свод, 2004; Рекомендации, 1979; Методические рекомендации, 2007]. Районные карты строятся также для годичных значений гидрологических характеристик, параметров распределения, расчетных гидрологических характеристик и в других случаях. Наведение изолиний следует осуществлять (сглаживать) с учетом случайных погрешностей исходных данных и случайных погрешностей, обусловленных ограниченностью принятых в расчет выборок. Построение карт изолиний рассматриваемой гидрологической характеристики или параметра осуществляется путем пространственной интерполяции. Могут применяться методы линейной интерполяции, оптимальной линейной интерполяции, основанной на пространственной корреляционной функции, и другие методы, включая широко используемые в географических информационных системах (ГИС). При этом использование пространственной корреляционной функции включает оценку ее однородности [Алексеев Г.А., 1971; Лобанова А.Г. и др., 1973; Рождественский А.В. и др., 1986; Пространственно-временные, 1988]. В случае определяющего влияния других региональных факторов (например, высоты водосборов в горных районах) интерполяция осуществляется с учетом этих факторов. При пространственной интерполяции гидрологических характеристик, а также их параметров и квантилей рекомендуется использовать географические информационные системы. Применение ГИС-технологии в гидрологических расчетах по мере накопления новой гидрометеорологической информации даст возможность создавать альбомы годичных карт гидрологических характеристик, которые будут постоянно пополняться, что открывает новые возможности инженерных гидрологических расчетов при отсутствии данных наблюдений в расчетном створе и при решении других задач для различных отраслей народного хозяйства. В Приложении Д рассматривается применение ГИС-технологии для решения различных пространственных обобщений гидрологических характеристик, а также при определении морфометрических характеристик.

Метод построения региональных зависимостей

Метод построения региональных зависимостей для определения параметров распределения и расчетных гидрологических характеристик в зависимости от влияющих факторов включает в себя следующие основные этапы:

— выбор предполагаемых основных физико-географических факторов для исследуемого однородного района (площадь водосбора, средняя высота водосбо-

ра, уклон водосбора и реки, озерность, заболоченность, залесенность, параметры рядов метеорологических факторов и другие);

— построение и анализ однофакторных зависимостей гидрологических характеристик от региональных факторов с целью выбора основных факторов для исследуемого региона, априорной оценки вида зависимостей и необходимости функциональных преобразований рассматриваемых факторов;

— предварительное формирование общей структуры региональной зависимости на основе генетического анализа и условий формирования стока, результатов анализа однофакторных зависимостей;

— при построении однофакторных и многофакторных зависимостей должны соблюдаться следующие условия: объем совместных данных должен быть больше или равен заданному значению, критическое значение парного или множественного коэффициента корреляции должно быть больше заданного значения, отношение коэффициента парной или множественной корреляции к его средней квадратической ошибке должно быть больше заданного значения, отношение коэффициентов регрессии к их средним квадратическим погрешностям должно быть больше заданного значения, отношение восстановленного значения гидрологической характеристики или ее параметров и квантилей к средней квадратической ошибке должно быть больше заданного значения. Численные значения отмеченных условий назначаются в зависимости от требуемой точности и надежности гидрологических расчетов, а также от объема и качества исходной информации;

— построение региональных зависимостей и формирование окончательного вида расчетных формул;

— оценка эффективности построенных региональных зависимостей и формул.

В связи с ограниченностью данных и преобладающим влиянием физико-географических факторов в однородном районе, региональные зависимости, как правило, включают несколько (не более 4–5) основных переменных. При рассмотрении конкретных гидрологических характеристик (годовой, максимальный, минимальный сток, наивысшие уровни воды) в следующих разделах приводятся наиболее распространенные структуры региональных зависимостей и формул, применяющиеся в гидрологических расчетах. Параметры этих зависимостей для каждого однородного региона должны определяться на основе всей имеющейся информации во времени и пространстве. Оценку эффективности полученных эмпирических зависимостей и формул, применяемых в гидрологических расчетах при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в расчетном створе выполняется на основе анализа остатков, оценки устойчивости параметров и коэффициентов этих зависимостей с обязательной проверкой на зависимом и независимом от расчета материале наблюдений.

Помимо приведенных в настоящих рекомендациях региональных зависимостей и расчетных схем допускается использование других региональных формул при надлежащем их физическом и статистическом обосновании.

Построение зависимостей между годичными стоковыми характеристиками и формирующими их факторами практически не отличается от построения региональных зависимостей за многолетний период. Поэтому все особенности построения региональных зависимостей полностью относятся и к построению годичных зависимостей гидрологических характеристик и параметров стока.

Аналогичным образом построение зависимостей, основанных на использовании материалов полевых гидрометеорологических изысканий и кратковременных гидрологических наблюдений, отражающие пространственные закономерности распределения гидрологических характеристик также определяются на основе рассмотренных положений по определению региональных зависимостей за многолетний период.

5.5. Основные гидрографические и физико-географические факторы, определяющие основные гидрологические характеристики

Для построения региональных зависимостей используются следующие основные гидрографические и физико-географические характеристики (факторы стока) [Руководство, 1986]:

1) площадь водосбора F, км^2,

2) гидрографическая длина водотока L, км,

3) средневзвешенный уклон водотока I, (‰), представляющий собой условный выровненный уклон ломанного профиля, эквивалентный сумме частных средних уклонов профиля водотока, вычисляется по формуле:

$$\lg \bar{I} = \sum_{i=1}^{n} [(l_i / L) \lg I_i] \quad \text{или} \quad \bar{I} = \prod_{1}^{n} I_i^{l_i / L}, \tag{5.2}$$

где I_i — частный средний уклон отдельных участков продольного профиля водотока, ‰; l_i — длина частных участков продольного профиля между точками перегиба, км; L — гидрографическая длина водотока до пункта наблюдений, км.

Средневзвешенный уклон определяется только для не зарегулированных водотоков, а также для участков рек, расположенных в нижних бьефах водохранилищ;

4) средняя высота водосбора $\bar{H}_в$, м над уровнем моря; определяется либо непосредственно по гипсографической кривой водосбора, либо по формуле:

$$\bar{H}_B = [\sum_{i=1}^{n} (H_{B,i} + H_{B,i+1})(\Delta A_i)]/(2A), \tag{5.3}$$

где $H_{в,i}$ — высота поверхности горизонтального сечения (горизонтали), м; ΔA_i — площадь между двумя соседними горизонталями, км^2; A — общая площадь водосбора, км^2;

5) относительная лесистость водосбора $f_л$ в % от общей площади водосбора (лес и кустарники на проходимых болотах в лесные угодья не включаются);

6) относительная заболоченность водосбора $f_б$ в % от общей площади водосбора (вычисляется с разделением болот на верховые и низинные);

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

8) средневзвешенная озерность для непроточных озер $f'_{оз}$ в % от общей площади водосбора, вычисляется с учетом расположения озер на водосборе по формуле:

$$f'_{оз} = (\sum_{i=1}^{n} S_i f_i)/\Lambda^2, \tag{5.4}$$

где S_i — площади озер, f_i — площади водосборов этих озер, A — площадь водосбора реки до замыкающего створа;

9) закарстованность водосбора $f_к$ в % от общей площади водосбора, определяется отношением закарстованной площади водосбора ко всей его площади;

10) относительная распаханность водосбора $f_р$ в % от общей площади водосбора, определяется отношением площади распаханных земель под сельскохозяйственные культуры на водосборе ко всей его площади;

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

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

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

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

Для водотоков малых рек (F<200 км^2) дополнительно определяются следующие характеристики:

1) средний уклон склонов водосбора $I_{ск}$, в ‰, определяется по картам и планам в горизонталях по формуле:

$$I_{ск} = (h\sum_{i=1}^{n} l_i)/A. \qquad (5.5)$$

где h — высота сечения рельефа, м;

$\sum_{i=1}^{n} l_i$ — сумма длин измеренных горизонталей в пределах водосбора, км;

2) густота речной сети водосбора $\rho_р$ км/км^2, определяется как отношение суммарной длины всех водотоков (реки, каналы, канавы) на водосборе к общей площади водосбора

$$\rho_р = (\sum_{i=1}^{n} l)/A. \qquad (5.6)$$

3) густота русловой сети водосбора ρ_0 км/км^2, определяется как отношение суммарной длины речных долин, сухих русел, оврагов, балок и логов к общей площади водосбора.

Гидрографические характеристики реки и ее водосбора определяются по новейшим топографическим картам, масштабы которых выбираются в зависимости от размера реки и рельефа водосбора по следующим рекомендациям:

а) для определения площадей водосборов, длин рек и уклонов — по таблице 5.1;

б) для определения гидрографических характеристик водоемов — по таблице 5.2;

4) характер почвогрунтов, степень закарстованности, глубина залегания уровня грунтовых вод определяются по специальным картам (почвенно-грунтовым и гидрогеологическим).

Категории рек (большие, средние, малые) в зависимости от площади водосбора приняты в соответствии с ГОСТом 19179 – 73 «Гидрология суши. Термины определения»

При определении гидрографических характеристик водотока и водосбора выбор масштаба топографических карт, установление местоположения водораздельных линий, истоков, устьев водотоков и картометрические измерения производятся в соответствии с таблицами 5.1. и 5.2.

Таблица 5.1. Масштабы карт, используемые для определения площадей водосборов, длин рек и уклонов

Характер местности	Площадь водосбора, км^2			
	< 10	10–50	50–200	>200
Равнинные, пустынные и заболоченные слаборасчлененные районы	1:10000	1:25000	1:50000	1:100000
Горные и холмистые Сильнорасчлененные районы	1:25000	1:50000	1:100000	1:100000

Таблица 5.2. Масштабы карт для определения гидрографических характеристик водоемов

Водоемы	Примерная площадь изображения водоема на карте, см^2	Масштабы карт
Крупнейшие и большие	>1000	1:100000 – 1:500000
Средние	500–1000	1:50000 – 1:100000
Малые	100–500	1:25000 – 1:50000
Самые малые	10–100	1:10000 – 1:25000

Для восстановления многолетних рядов гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений применяются зависимости стока от стокоформирующих факторов, которые строятся для продолжительных рядов на реках-аналогах в однородном районе. Основная особенность при построении эмпирических зависимостей – их общая для территории структура, позволяющая интерполировать параметры, коэффициенты и стокоформирующие факторы на неизученный водосбор.

Оценку случайности гидрометеорологических характеристик следует производить на основании группового анализа коэффициентов автокорреляции в рассматриваемом районе. Другие методы анализа случайности гидрометеорологических характеристик, как правило, приводят к одним и тем же результатам, не повышая качество полученных выводов.

При анализе сглаживания многолетних колебаний гидрометеорологических характеристик рекомендуется использовать известные методы статистической обработки исходной информации [Рождественский А.В., 1977; Пространственно-временные, 1984 и другие публикации]. Аналогичным образом это полностью относится и к анализу пространственно – временной структуры различных гидрометеорологических характеристик.

6. Годовой сток

При отсутствии гидрометрических наблюдений в расчетном створе параметры распределения годового стока (среднее многолетнее значение, коэффициент вариации, отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации и коэффициент автокорреляции между стоком смежных лет) и расчетные значения гидрологических характеристик определяются с помощью следующих основных методов:

– гидрологической аналогии;

– осреднения в однородном районе;

– построения карт изолиний параметров распределения и карт значений стока за каждый год;

– построения зависимостей между годичными стоковыми характеристиками и формирующими сток факторами;

– построения региональных зависимостей годового стока, параметров распределения и расчетных квантилей от основных физико-географических факторов.

– водного баланса;

– построения зависимостей, основанных на использовании материалов полевых гидрометеорологических изысканий и кратковременных гидрологических наблюдений, отражающих пространственные закономерности распределения гидрологических характеристик.

Таким образом, методы расчета годового стока при отсутствии гидрометрической информации в исследуемом створе базируются:

– на методах, основанных только на гидрологической информации в пунктах, где проводятся наблюдения. К этим методам относится картирование или осреднение в однородном районе параметров распределения годового стока на основе всей имеющейся в исследуемом районе гидрометрической информации за годовым стоком рек [Воскресенский К.П., 1962];

– на методах, основанных на региональных зависимостях, использующих дополнительную информацию о морфометрических характеристиках бассейна. К ним относятся эмпирические формулы стока, связывающие среднее многолетнее значение (норму) стока, коэффициент вариации или отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации с различными факторами;

– на методах, основанных на моделях формирования стока, использующих всю возможную информацию (гидрологическую, метеорологическую, агрофизическую, водно-физическую информацию, о характеристиках гидрографической сети, рельефа, почв и пр.). Эти методы основаны на непрерывном расчете детальных воднобалансовых соотношений за суточные интервалы времени по однородным участкам [Кучмент Л.С.,1972, 1980; Виноградов Ю.Б. и др., 1986] и на разбиении годового стока на фазовооднородные сезоны и построении сезонных регрессионных зависимостей слоев стока со стокоформирующими факторами [Лобанов В.А., 2006].

Методы расчета годового стока, основанные на моделях формирования стока, как правило, требуют очень большого объема гидрометеорологической, гидрофизической и другой информации по суточным интервалам времени, и ча-

сто дают неоправданно большие случайные погрешности определения годового стока, которые, как правило, даже превосходят погрешности расчета по сравнительно простым региональным зависимостям. Упрощение же этих методов нередко приводит к зависимостям годового стока от основных факторов.

Методы расчета годового стока, основанные на разбиении годового стока на фазовооднородные, не повышают точность расчета по сравнению со ставшими уже традиционными и более простыми методами расчета годового стока. Вместе с тем следует отметить, что с увеличением объема наблюдений за гидрометеорологическими и гидрофизическими характеристиками водосборов во времени и пространстве и представлении этой информации на технических носителях, есть основания полагать, что в будущем математические модели формирования речного стока возможно смогут войти в арсенал рекомендуемых методов инженерных гидрологических расчетов годового стока и других гидрологических характеристик для строительного проектирования и решения других практических и научных задач, стоящих перед гидрологией.

6.1. Карты параметров распределения годового стока

Средний годовой сток рек меняется в соответствии с зональным изменением климатических факторов и элементов природного ландшафта. В соответствии с расположением природных зон и высотных поясов наблюдается широтная и вертикальная зональность, которая дает основание для построения карт параметров распределения годового стока. Построение карт основано на допущении плавного изменения годового стока по территории в соответствии с распределением климатических и физико-географических факторов (рельефа, почвы, глубины залегания подземных вод и другие).

Карты параметров распределения годового стока относятся к центру тяжести водосбора реки, т.к. наблюденное значение стока относится не к точке (створу гидрометрических наблюдений), а к водосбору и является его интегральной характеристикой. Карты среднего многолетнего стока строятся в модулях (л/с км^2) или в слоях стока (мм), т.е. в значениях стока приведенных к единице площади.

Характер изолиний параметров распределения стока на карте и точность определения этих параметров зависит от числа пунктов наблюдений, используемых при составлении карты, т.е. от густоты гидрометрической сети наблюдений, от пространственной структуры годового стока, отражаемой пространственной корреляционной функции, от плавности изменения рельефа в исследуемой местности и точности нанесения центров тяжести водосборов как при построении карты, так и при дальнейшем ее использовании.

Для построения карт параметров стока (среднего многолетнего значения стока и коэффициента вариации) могут быть использованы данные по рекам, сток которых определяется зональными факторами. Изменение зональной величины в пределах речного водосбора и влияние азональных факторов должно быть незначительное. Таким условиям отвечают так называемые «средние» реки, площадью водосбора от 1000 до 50 000 км^2, бассейн которых расположен в пределах одной географической зоны. Реки, имеющие площади водосборов больше

указанных, могут иметь различные значения стока в отдельных частях бассейна, отличающиеся от осредненной величины стока по всему водосбору. Такие реки с межзональным формированием годового стока при построении карт, как правило, не используются или используются только для контроля построения карт.

Точность определения параметров стока по карте в разных районах будет неодинакова для различных географических регионов. В равнинных районах, в зоне достаточного увлажнения, значения параметров, полученные по карте, будут иметь наименьшие случайные погрешности, которые связаны с повышенными коэффициентами пространственной корреляционной связанности и, следовательно, будут близки к наблюденным значениям. В зоне недостаточного увлажнения, в горных областях, где влияние местных факторов велико, значения параметров, определенные по карте, могут значительно отличаться от наблюденных значений.

Существует сложность, а иногда и невозможность построения карт в районах севера, где практически отсутствует сеть гидрометрических наблюдений, и задача картирования параметров годового стока сводится к их интерполяции на больших расстояниях или даже к задаче экстраполяции. Погрешность расчета по картам этих районов может быть велика. В этих случаях при построении карт параметров годового стока рекомендуется использование метеорологической информации с учетом водобалансовых соотношений за многолетний период.

Следует особо оговорить, что при построении карт годового стока и его параметров распределения предварительно необходимо осуществлять восстановление исходной гидрометеорологической информации в соответствии с работами [Рекомендации, 1979; Рождественский А.В и др., 1990; Свод, 2004; Методические рекомендации, 2007;].

Приведение данных наблюдений за годовым стоком рек и метеорологических факторов, его определяющих к многолетнему периоду существенно повышает точность построения годичных карт годового стока и его параметров распределения.

Использование карт изолиний в горных районах достаточно сложно в связи и с тем, что с высотой увеличиваются осадки и, следовательно, сток, но также возрастает влияние местных факторов: экспозиция склонов, направление влагонесущих потоков, динамика таяния ледников и т.д. Как правило, изолинии характеристик стока в горных районах проводятся в соответствии с высотными горизонталями. При этом учитываются зависимости годового стока и параметров распределения со средней высотой водосборов. Градиенты параметров стока между изолиниями в горных районах значительны, пункты наблюдений, как правило, редки, поэтому погрешность интерполяции годового стока для горных районов будет больше, чем для равнинных территорий.

Среднее многолетнее значение стока (в модулях или слоях стока) для расчетного пункта (центра тяжести водосбора) на равнинной территории или при незначительно меняющемся рельефе определяется, как правило, линейной интерполяцией между изолиниями стока. Такая линейная интерполяция допустима в случаях, если рельеф в пределах исследуемого водосбора однообразный и плавный. Если же между двумя изолиниями имеет место резкое изменение рельефа, простая линейная интерполяция невозможна. В этом случае следует учесть возможное повышение или уменьшение стока в связи с изменением рельефа.

В случае пересечения водосбора несколькими изолиниями средневзвешенное значение стока вычисляется по формуле:

$$q_{ср.}=(q_1A_1 + q_2A_2 + ...+..q_nA_n)/A, \quad (6.1)$$

где q_1, q_2, ..., q_n — средние значения стока между соседними изолиниями, пересекающими водосбор; A_1, A_2, ..., A_n — соответствующие площади между изолиниями; A — общая площадь водосбора до расчетного створа.

Интерполяцию можно производить лишь между точками, относящимися к центрам тяжести водосборов, находящихся в одинаковых условиях по отношению к климатическим и азональным факторам годового стока. Многочисленные примеры построения карт годового стока и его параметров представлены в «Атласе расчетных гидрологических карт и номограмм», представленных в Приложении к работе [Пособие, 1984].

Погрешность расчета среднего многолетнего значения (нормы) годового стока , полученной по интерполяции, определяется в зависимости от точности ее расчета в опорных пунктах.

При оценке пространственной интерполяции годового стока полезно использование пространственных корреляционных функций $r=f(L)$ с оценкой ее статистической однородности. Пространственная корреляционная функция (ПКФ) представляет собой зависимость парных коэффициентов корреляции между стоком рек от расстояния между центрами тяжести водосборов. По данным многих исследователей [Алексеев Г.А., 1971, 1975; Лобанова А.Г. и др., 1973, Пространственно-временные, 1988; Рождественский А.В. и др., 1989] установлено, что коэффициенты парной корреляции с увеличением расстояния убывают. Как правило, ПКФ имеют нелинейный вид. Пространственные корреляционные функции могут быть использованы и при выборе рек-аналогов в однородном гидрологическом районе. Под однородностью района имеются в виду одинаковые условия формирования стока.

С помощью осредненной (сглаженной) пространственной корреляционной функции можно определить погрешности исходных данных по значению r при $L = 0$, хотя к такой оценке надо относиться с осторожностью, т.к. точность исходных данных в большей степени определяется качеством гидрометрических измерений, а не естественной изменчивостью многолетних колебаний.

Многочисленные расчеты пространственных корреляционных функций с оценкой их однородности для 33 регионов проведены и проанализированы в работе [Пространственно-временные,1988]. Установлено, что ПКФ имеют четко выраженную закономерность уменьшения пространственной связи в направлении с севера на юг, что объясняется различными условиями формирования годового стока в различных физико-географических районах.

6.2. Карты изолиний годового стока за конкретные годы

При отсутствии данных наблюдений в расчетном створе допускается строить карты изолиний годового стока за конкретные годы по рядам, приведенным к многолетнему периоду. По таким картам можно получить весь ряд, который со-

держит информацию о процессе годового стока в исследуемом водосборе, и рассчитать по нему параметры распределения (среднее, коэффициенты вариации, асимметрии, автокорреляции). Точность восстановления годичных значений стока зависит от количества пунктов, по которым производится интерполяция, их расположению по отношению к расчетному пункту, однородности условий формирования стока в исследуемом районе.

Для решения этой задачи, зная координаты трех пунктов наблюдений (X_1, Y_1; X_2, Y_2; X_3, Y_3) и значения стока в этих пунктах за конкретные годы (Z_i), определяется уравнение плоскости в трехмерном пространстве:

$$\begin{vmatrix} X-X_1 & Y-Y_1 & Z-Z_1 \\ X_2-X_1 & Y_2-Y_1 & Z_2-Z_1 \\ X_3-X_1 & Y_3-Y_1 & Z_3-Z_1 \end{vmatrix} = 0$$

Решение этой матрицы относительно значения Z при задаваемом конкретном значении X и Y приводит к вычислению характеристики стока за конкретный год. Выполняя подобные расчеты за все годы наблюдений от $i=1$ до $i=n$, приведенные к многолетнему периоду, получаем ряд восстановленных значений стока в расчетном пункте. Предлагаемая методика апробирована на годовом стоке рек Верхней Оки. (Пример расчета по этой методике дан в Приложении А).

Восстановление рядов годового стока по годичным картам стока и расчет параметров распределения является достаточно трудоемким процессом. В связи с этим велись работы по автоматизации нанесения значений стока за каждый год для центров тяжести водосборов, а также построению годичных карт. При решении этой задачи необходимо исходные гидрологические ряды привести к многолетнему периоду и использовать ГИС — технологии для автоматизации наведения изолиний годового стока. Такой подход к решению задачи интерполирования и построения карт изолиний стока дан в Приложении Д. Использование ГИС позволяет строить в автоматическом режиме годичные карты годового стока, что и проиллюстрировано на примере среднего, многоводного и маловодного годов.

При создании карт годового стока за каждый год целесообразно получить поправки к этим картам для малых рек, основанным на влиянии незональных факторов годового стока аналогично тому, как это было описано при картировании параметров распределения годового стока.

6.3. Поправочные коэффициенты к картам параметров распределения для малых рек

В значения среднего многолетнего зонального стока (нормы) малых рек, определенные по региональной карте, следует вводить поправки на влияние местных азональных факторов. Эти факторы учитывают неполное дренирование реками подземных вод, наличие карста, выходов подземных вод, особенности геологического строения бассейна, характер почв (грунтов), промерзание и пересыхание рек, различие средних высот водосборов и другие особенности формирования годового стока рек. Поправки определяются путем построения

зависимостей среднего многолетнего зонального стока от азональных факторов, включая, в первую очередь, площадь водосбора.

Многочисленные примеры таких зависимостей, обобщенных для большого числа пунктов наблюдений, даны в [Пособии, 1984]. Эти зависимости носят только методический характер, приведены только в качестве примеров и не могут быть использованы для конкретных проектных расчетов. Такие таблицы должны обязательно уточняться по территориям деятельности УГМС при составлении Территориальных монографий-справочников «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» с использованием информации за годовым стоком малых рек за весь период наблюдений, включая наблюдения за самые последние годы. Поэтому использование ранее подготовленных карт с уточнением поправочных коэффициентов для малых водосборов совершенно недопустимо. Естественно, что использование более полной информации может значительно уточнить численные значения указанных зависимостей, что и представляет одну из основных задач, стоящих перед специалистами УГМС Росгидромета.

Причиной расхождения параметров распределения стока больших и малых рек в одних случаях является неодинаковое соотношение поверхностных и грунтовых вод, поступающих в русла рек, в других — различные величины потерь стока на испарение с поверхности водосборов и многие другие.

При переходе от северных районов, характеризующихся избыточным увлажнением, к зоне недостаточного увлажнения происходит постепенное закономерное уменьшение стока малых рек по сравнению с большими и средними реками.

В равнинных территориях засушливой зоны грунтовые воды залегают глубоко и дренируются только большими реками с глубоким эрозионным врезом русла. В таких районах соотношение стока больших и малых рек определяется дополнительными потерями на испарение и инфильтрацию в различных бессточных понижениях на водосборах и в руслах рек, условиями аккумуляции осадков, условиями накопления снега и пр.

Отклонения стока малых рек от зонального среднего многолетнего значения устанавливаются эмпирическим путем при построении зависимостей параметров распределения стока от различных факторов, в частности от площади водосбора. На основании этих зависимостей устанавливаются поправочные коэффициенты, учитывающие разный характер уменьшения стока, которые при расчетах стока неизученных водосборов вносятся в значения стока, полученные по карте.

Для расчета поправочных коэффициентов необходимо для исследуемого района установить «критическую» площадь водосбора, меньше которой значения параметров распределения годового стока отличаются от зональных.

Известно, что по мере перехода от северных районов с избыточным увлажнением к районам с недостаточным увлажнением «критическая» площадь увеличивается, среднее многолетнее значение годового стока для площадей водосборов меньше «критической» уменьшается по сравнению с зональным значением.

Для водосборов малых и средних рек, на которых наблюдается карст, отклонения среднего многолетнего стока от зональных значений может быть значительным вследствие несовпадения поверхностного и подземного водосборов.

В случае особых гидрологических и гидрогеологических условий должны учитываться: согласованность поверхностного и подземного водосбора, некон-

тролируемые подземные притоки или потери вод, карстовые явления и нарушения естественных гидрологических условий, вызванные хозяйственной деятельностью человека.

В зависимости от соотношения поверхностного и подземного водосборов величина стока рек, особенно малых, может отклоняться как в сторону увеличения (в случае значительного превышения подземного водосбора над поверхностным), так и в сторону уменьшения (в случае поглощения стока в карстовых трещинах и воронках). Поэтому норма стока рек, протекающих в карстовых районах, может быть надежно установлена только на основании гидрометрических наблюдений, а при их отсутствии — методом аналогии по данным бассейнов-аналогов, имеющих однородные физико-географические условия формирования годового стока, что может быть установлено в результате полевых гидрометеорологических изысканий.

6.4. Региональные зависимости параметров распределения годового стока от основных факторов

При отсутствии данных наблюдений за годовым стоком в расчетном створе допускается применять эмпирические зависимости параметров распределения от метеорологических и других факторов. Эмпирические формулы являются приблизительным и косвенным приемом расчета, но дают возможность получить немедленное решение практической задачи. Как правило, эти зависимости устанавливают связь параметров распределения годового стока с площадью водосбора, и средней высотой водосбора, коэффициентами заболоченности, залесенности, озерности, уклонами водосбора и другими факторами. Эффективность этих зависимостей определяется преобладающим влиянием одного или нескольких факторов на фоне однородных климатических условий. Как правило, в эмпирических формулах имеются параметры, рассчитанные по данным наблюдений на реках рассматриваемой территории.

В некоторых случаях при недостаточности или отсутствии данных наблюдений за годовым стоком применяются эмпирические зависимости стока от осадков. Степень достоверности такой зависимости определяется условиями формирования стока в изучаемом бассейне. Необходимо при установлении зависимости стока от осадков учитывать такие факторы, как предшествующие осадки, влажность почвы, температурный режим.

Следует подчеркнуть, что эмпирические формулы, являющиеся обобщенной зависимостью между стоком и средними условиями речного водосбора, могут применяться только тогда, когда в исследуемом речном пункте преобладают естественные условия формирования стока. При применении эмпирических зависимостей необходим тщательный анализ способа их получения и оценки погрешностей расчета на независимом от расчета материале наблюдений.

Построение региональных зависимостей связано с выбором однородного гидрологического района, который и определяет степень надежности получаемых решений. Границы района могут увеличиваться до тех пор, пока не начнут ухудшаться показатели этих зависимостей, например, увеличиваться погрешности

расчета определяемых параметров, или уменьшаться коэффициент парной или множественной корреляции.

Примеры зависимостей параметров распределения годового стока от гидрографических характеристик представлены в Приложении А. Эти зависимости носят исследовательский характер и не могут быть непосредственно использованы в практических расчетах. При расчетах стока эти зависимости должны уточняться, при их получении должна быть использована вся исходная гидрометеорологическая информация по настоящее время.

Методика построения этих зависимостей следующая:

На основе статистической обработки данных гидрологических наблюдений за годовым стоком рек Северо-запада и Севера Европейской территории России (ЕТР) рассчитаны несмещенные оценки параметров распределения (среднее значение, коэффициенты вариации, асимметрии и корреляции между стоком смежных лет (автокорреляции)). По этим данным исследовалась взаимосвязь между оценками параметров распределения и морфометрическими характеристиками водосборов (площади водосбора, залесённости, заболоченности), а также взаимосвязь между самими параметрами распределения.

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

На горных реках, в бассейнах которых имеются ледники, занимающие более 10% их общей площади, устанавливаются районные зависимости коэффициента вариации от степени оледенения водосборов рек.

Эффективность региональных зависимостей определяется согласно рекомендаций СП 33-101-2003 [Свод, 2004].

6.5. Определение коэффициентов вариации, асимметрии и автокорреляции

Значения коэффициента вариации C_v неисследованных рек следует определять по карте изолиний этого параметра или по районным эмпирическим формулам, в которые вводятся поправки на азональные факторы.

Основной причиной колебания годового стока является изменение от года к году таких стокоформирующих факторов, как осадки и испарение. Значения коэффициентов вариации, как правило, уменьшаются с увеличением годового стока. Кроме того, коэффициенты вариации, как правило, уменьшаются с увеличением зарегулированности речного стока.

Изменение коэффициента вариации носит зональный характер, также как и изменение среднего многолетнего стока. Если значения среднего многолетнего стока (нормы стока) уменьшается с севера на юг, то значения коэффициентов вариации увеличиваются. Пример зависимости коэффициентов вариации от средних многолетних значений модулей годового стока рек Северо-запада и Севера ЕТР представлен в Приложении А.

Определение коэффициентов вариации по районным эмпирическим формулам осуществляется в зависимости от среднего многолетнего значения стока, площади водосбора реки или средней высоты бассейна (для горных районов).

Как правило, устанавливается зависимость коэффициента вариации от площади водосбора. Площадь водосбора отражает регулирующее влияние бассейна. Пример такой зависимости дан в приложении А.

Коэффициент асимметрии C_s устанавливается в соответствии с работой [Свод, 2004].

Обобщение коэффициентов асимметрии по территории, как правило, трудно реализовать в связи с большими случайными погрешностями этого параметра, связанного с ограниченным объемом исходных данных наблюдений.

В практике гидрологических расчетов обычно рассчитывается отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации (C_s/C_v).

При определении отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации (C_s/C_v) возможно построение карт районов с одинаковыми их значениями. Как правило, изменение этого параметра носит прерывистый характер в отличии карт изолиний.

Обобщение отношения коэффициентов асимметрии к коэффициенту вариации (C_s/C_v) проводится для больших районов при условии, что численное значение отношения (C_s/C_v) в пунктах наблюдений, представленное стандартной ошибкой не превышает его случайную погрешность. Для годового стока это отношение в основном равняется двум. Для отдельных районов изменяется от 0 до 3,5. Последние значения характерны для годового стока засушливых и горных районов, а малые значения, как правило, соответствуют прибрежным районам вблизи морей Мирового океана.

В практике гидрологических расчетов необходимо учитывать внутрирядную связанность рядов гидрологических характеристик, которая определяется коэффициентом автокорреляции $r(1)$ между смежными членами ряда. Необходимость учета внутрирядной корреляции связана с учетом случайных и систематических погрешностей при оценке параметров распределения годового стока и структурой многолетних колебаний годового стока, которая, например, учитывается при регулировании речного стока. Расчетные параметры стоковых рядов, имеющих высокую внутрирядную связанность, имеют большие случайные погрешности. Кроме того, автокорреляция годового стока учитывается при многолетнем регулировании речного стока, так как коэффициент автокорреляции отражает группировки многоводных и маловодных лет.

Положительная автокорреляция в рядах годового стока обусловлена наличием запасов переходящей влаги в бассейне (поверхностной и подземной), т.е. связана с инерционностью процессов. Другой причиной, определяющей появление временных связей, может быть инерционность отдельных метеорологических факторов, таких как осадки и испарение.

Коэффициент автокорреляции зависит как от среднего многолетнего стока, так и от его изменчивости. Как правило, для зоны избыточного и достаточного увлажнения наблюдается обратная зависимость коэффициента от среднего многолетнего стока. В зоне недостаточного увлажнения с увеличением водности увеличивается и коэффициент автокорреляции.

С увеличением коэффициента вариации годового стока увеличиваются и значения коэффициента автокорреляции, что также связано с водностью рек.

Значения коэффициента автокорреляции для неизученных районов определяются по рекам-аналогам с учетом приведения наблюдений к многолетнему периоду и далее путем группового анализа. Это связано с большими случайными ошибками коэффициентов автокорреляции и асимметрии, а также отношения коэффициентов асимметрии к коэффициенту вариации при оценке этих параметров. Групповая оценка параметров определяется при осреднении частных значений этих параметров по совокупности наиболее продолжительных рядов наблюдений [Свод, 2004]. В этом случае большие случайные ошибки выборочных параметров уменьшаются. Очень важно при осреднении не исключить географические закономерности в оценке этих параметров, то есть осреднение нужно делать только в пределах случайных ошибок, обусловленных случайными погрешностями исходных данных наблюдений и случайными ошибками связанными с ограниченной продолжительностью исходных рядов наблюдений [Рождественский А.В., 1977; Рождественский А.В и др., 1990]. Согласно работы [Пространственно-временные, 1988] на территории бывшего СССР выделено 9 однородных районов, для которых рассчитаны средневзвешенные коэффициенты автокорреляции, диапазон их изменения колеблется от 0,14 до 0,64.

6.6. Определение параметров стока на основе метода оптимальной линейной интерполяции

В некоторых случаях можно рассчитать ряды годового стока и по ним определить параметры на основе метода множественной линейной корреляции. Применение такого метода возможно в однородном гидрологическом районе. Поэтому по рядам-аналогам исследуемого района производится проверка этих рядов и параметров распределения на однородность с использованием статистических критериев Стьюдента и Фишера с заданным уровнем значимости.

Убедивших в однородности исходных данных, определяем среднее значение и дисперсию по соответствующим формулам:

$$\overline{q}_0 = \frac{\sum_1^n q_i n_i}{\sum_1^n n_i} = \frac{q_1 n + q_2 n_2 + ... + q_i n_i}{n_1 + n_2 + ... + n_i} \qquad (6.2)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{\sum_1^k \sigma_i^2}{k} + \frac{\sum_1^k (q_i - \overline{q}_0)^2}{k} \qquad (6.3)$$

где: $\overline{q}_0$ — среднее значение годового стока в исследуемом створе, q_i — значения стока за каждый год в пунктах-аналогах, n_i — число лет наблюдений в пунктах–аналогах, σ_i — стандартное отклонение в пунктах-аналогах.

Для однородного гидрологического района норма стока и коэффициенты вариации или дисперсии принимаются в соответствии с (6.2) и (6.3).

Для исследуемого района рассчитывается пространственная корреляционная функция или матрица коэффициентов парной корреляции, которая используется при расчете уравнения множественной регрессии. Пример расчета стока с использованием аппарата множественной линейной регрессии приводится в Приложении А.

6.7. Определение значений стока по интерполяции по длине реки

При отсутствии гидрометрических наблюдений в пункте проектирования и наличии наблюдений в пунктах по длине реки выше и ниже проектируемого створа возможна интерполяция или экстраполяция значений стока или уровней с учетом изменения площадей или расстояний между пунктами наблюдений по основному руслу реки.

При этом наблюденные гидрометрические данные по створам-аналогам приводятся к многолетнему периоду, производится оценка однородности и стационарности этих рядов. Далее по длине реки с учетом расстояния между пунктами наблюдений или изменения площадей водосбора в створе проектирования рассчитываются годовые значения стока или уровней воды, при этом получаем многолетний ряд, по которому рассчитываются параметры распределения и строятся кривые обеспеченности, или интерполируются сами значения квантилей распределения с учетом изменения площадей. Пример такого расчета различных характеристик стока и уровней приведен в Приложении А.

6.8. Расчеты годового стока на основе суммы сезонных компонент

Годовой сток при наличии продолжительных рядов метеорологических факторов допускается рассчитывать как сумму слоев стока сезонных составляющих за генетически однородные периоды [Свод, 2004; Лобанов В.А., 2006].

Для рек с весенним половодьем можно выделить три основные генетически однородные сезона внутри года по условиям формирования стока: сезон весеннего половодья, сезон летне-осенней межени и дождевых паводков и сезон зимней межени. Методика включает следующие основные этапы:

— для каждого водосбора определяются однородные гидрологические сезоны и за каждый сезон рассчитываются слои стока и предполагаемые стокоформирующие факторы;

— для каждого водосбора и каждого гидрологического сезона строятся зависимости слоев стока от стокоформирующих факторов и из них выбираются наиболее значимые с общей для территории структурой;

— даты начала и окончания однородных гидрологических сезонов обобщаются по территории и их значения определяются для неизученного водосбора;

— в границах полученных сезонов для неизученного водосбора определяются многолетние ряды стокоформирующих факторов, входящие в уравнения территориально-общей структуры;

— коэффициенты уравнений сезонного стока территориально-общей структуры обобщаются по территории и их значения определяются для неизученного водосбора;

— на основе рядов стокоформирующих факторов и коэффициентов уравнений для неизученного водосбора вычисляются многолетние ряды сезонного стока;

— слои годового стока определяются как суммы слоев сезонного стока;

— по ряду вычисленного годового стока определяются параметры и квантили распределения как для случая гидрологических расчетов при наличии данных наблюдений в соответствии с работами [Свод, 2004; Методические, 2007].

В результате многочисленных расчетов установлено, что для большей части территории России можно выделить три основные однородные сезона, принципиально отличающиеся по комплексу стокоформирующих факторов: сезон весеннего половодья (комплекс факторов снеготаяния), сезон летне-осенних паводков (выпадение осадков и испарение), сезон зимней межени (истощение стока в зависимости от предзимнего увлажнения и зимней температуры).

В качестве примера рассмотрено определение годового стока по простому балансовому уравнению: осадки минус испарение. Предлагаемая методика синтеза данных имеет следующий алгоритм:

— в районе, где находится рассматриваемый пункт проектирования, выбираются ряды факторов и значения стока на соседних водосборах;

— осуществляется приведение непродолжительных рядов к многолетнему периоду;

— определяются однородные гидрологические сезоны и рассчитываются слои стока и стокоформирующие факторы за сезоны;

— для каждого гидрологического сезона строятся зависимости слоев стока от стокоформирующих факторов и выбираются наилучшие с общей для территории структурой;

— определятся пространственные модели для дат начала сезонов и их значения переносятся на неизученный водосбор;

— осуществляется генерализация коэффициентов уравнений общей структуры по территории и их значения определяются для неизученного водосбора;

— на основе коэффициентов и стокоформирующих факторов для неизученного водосбора синтезируются слои сезонного и годового стока как суммы сезонных составляющих;

— по ряду синтезированных слоев годового стока рассчитываются параметры и квантили функции распределения.

Полученные территориально-общие уравнения сезонного стока, например, для района Северного края, имеют следующие средние коэффициенты множественной корреляции: $R = 0{,}86$ — для сезона весеннего половодья, $R = 0{,}77$ — для летне-осеннего сезона и $R = 0{,}60$ — для сезона зимней межени,

Для обобщения факторов стока и дат начала сезонов по территории применялись следующие методы:

— арифметическое среднее,

— взвешенное по площадям среднее,

— параметры распределений пространственного поля.

По разработанной методике было осуществлено восстановление многолетних рядов годового стока в различных по климатическим и орографическим условиям районам: Северный край, Верхняя Волга, район Южного Урала. Проверка эффективности методики осуществлялась на независимом от расчетов материале, когда выбранный пункт с многолетним рядом наблюдений рассматривался как случай отсутствия информации и синтезированный на основе информации в других пунктах ряд сравнивался с фактическими наблюдениями. В результате, например, для района Северного Края, получены диапазоны погрешностей синтезированных слоев стока сезона весеннего половодья — 64–48%, летне-осеннего сезона — 60–64%, сезона зимней межени — 13–33% и годового стока — 8–14%.

Пример расчета годового стока в виде суммы сезонных составляющих по стокоформирующим факторам дан в Приложении А.

6.9. Учет влияния хозяйственной деятельности

При определении расчетных величин годового стока рекомендуется вносить поправки, учитывающие изменение условий формирования стока, вызванные хозяйственной деятельностью.

Основными факторами, влияющими на изменение параметров распределения годового стока, являются:

— регулирование речного стока;

— изъятия стока из русла реки на водоснабжение, орошение, обводнение, сбросы в соседние речные бассейны;

— испарение с поверхности водохранилищ, входящих в речную систему;

— агротехнические, мелиоративные, лесотехнические мероприятия, меняющие суммарные потери стока на испарение и инфильтрацию;

Поправки, учитывающие влияние факторов хозяйственной деятельности, рассчитываются согласно рекомендаций [Методические рекомендации, 1986; Методические указания, 1986].

7. Внутригодовое распределение стока

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений в створе проектирования расчетное внутригодовое распределение стока определяется по данным рек-аналогов, по районным схемам и по региональным зависимостям.

В первом случае относительные значения стока заданной вероятности превышения за все месяцы водохозяйственного года и соответствующей градации водности, определяются путем расчета по данным достаточно длительных наблюдений на реке — аналоге, а во втором — путем составления районной схемы внутригодового распределения стока по результатам расчетов по группе рек-аналогов.

Применение метода аналогии для расчета внутригодового распределения стока рекомендуется для равнинных территорий и плоскогорий при сравнительно однообразных физико-географических условиях. Допускается при надлежащем обосновании применение этого метода и для горных районов. За аналог принимается река, удовлетворяющая условиям, приведенным в СП 33-101-2007.

Кроме того, расчет внутригодового распределения стока производится по региональным зависимостям параметров сезонного стока от определяющих факторов подстилающей поверхности: площадь водосбора реки, озерность, заболоченность, лесистость, характер почво-грунтов, а в горных условиях — также от средней высоты водосбора и метеорологических факторов сезонного стока.

Особо следует подчеркнуть, что при приведении месячного, сезонного и годового стока к многолетнему периоду используются СП 33-101-2003 [Свод, 2004] и Методические рекомендации [Методические, 2007]. В этом случае при наличии кратковременных наблюдений, полученных, например, в результате полевых работ, после процедуры восстановления месячного или сезонного стока за многолетний период расчеты внутригодового распределения стока производятся как при наличии данных гидрометрических наблюдений.

Определение расчетного внутригодового распределения стока по каждой из рек-аналогов производится согласно рекомендациям СП 33-101-2003 [Свод, 2004].

Основным методом обобщения данных по внутригодовому распределению стока, как для равнинных, так и для горных районов является составление районных схем межсезонного и внутрисезонного распределения стока, необходимых для определения расчетного календарного распределения месячного стока в характерном по водности году исследуемой неизученной реки. Межсезонное распределение стока выражается в долях от годового стока, а внутрисезонное распределение стока — в долях от стока соответствующего сезона. В зависимости от характера решаемой практической задачи и принятого в расчетах метода определения внутригодового распределения стока для района исследования (или района проектирования) могут быть построены различные расчетные схемы. Общим при их установлении является выявление и учет основных природных факторов (площадь водосбора и озерность на равнинах и плоскогорьях, средняя высота водосбора — в пересеченных горных районах).

Построение средней многолетней кривой продолжительности суточных расходов воды производится методом аналогии. Средняя многолетняя кривая

продолжительности, построенная для реки-аналога в относительных значениях (в долях от ее среднемноголетнего годового расхода воды), переносится на неизученную реку с учетом нормы стока неизученной реки, полученной в соответствии с СП 33-101-2003 [Свод, 2004] и настоящими рекомендациями.

Определение расчетного внутригодового распределения стока при длительности наблюдений рядов — аналогов или восстановленных данных в расчетном створе n, равных 15 годам и более, производится следующими методами:

— компоновки;

— реального года;

— среднего распределения стока за годы характерной градации водности.

При расчетах внутригодового распределения стока рек используются данные о среднемесячных (а в отдельных случаях и среднедекадных) расходах воды.

Целесообразно переводить расходы воды в объемы стока в км^3 или в тыс. м^3, так как при этом учитывается различие в числе дней не високосных и високосных лет и в числе секунд в разные месяцы года.

Расчеты внутригодового распределения стока производят по водохозяйственным годам (ВГ). За начало водохозяйственного года принимается наиболее ранняя дата наступления многоводной фазы с округлением до месяца.

На практике за начало водохозяйственного года допустимо принимать первый месяц, для которого средняя многолетняя величина месячного расхода превышает норму годового стока.

В отдельных случаях возможно выполнение расчетов внутригодового распределения стока для обычных календарных лет, а также для гидрологических лет, начинающихся с первого месяца периода накопления влаги (в климатических условиях территории России за начало гидрологического года принимается 1 октября или 1 ноября, когда переходящие из года в год запасы влаги малы).

В зависимости от типа водного режима реки и преобладающего вида ее использования водохозяйственный год делят на два различающихся по длительности периода: лимитирующий (ЛП) и нелимитирующий (НП), а лимитирующий

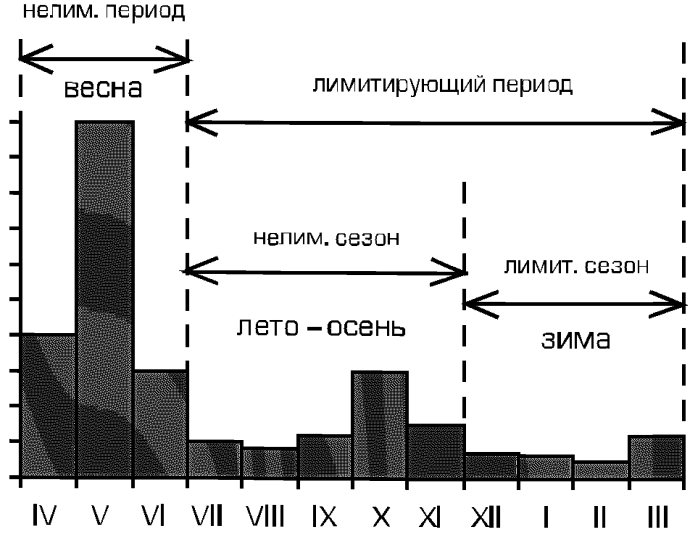

Рис. 7.1. Пример разбивки водохозяйственного года на сезоны и периоды при расчете внутригодового распределения стока

период соответственно на два сезона: лимитирующий (ЛС) и нелимитирующий (НС) (рисунок 7.1). Границы сезонов назначают едиными для всех лет с округлением до месяца. Примерные сроки и продолжительность основных гидрологических сезонов для территории РФ приводятся в Приложении Б, таблица Б1.

Расчетное внутригодовое распределение месячного стока в пунктах — аналогах, включающее методологию внутригодового распределения стока с примерами расчета более подробно изложена в работах [Пособие, 1984; Рекомендации, 2007]. Примеры расчета внутригодового распределения приводятся в Приложении А.

При недостаточной продолжительности наблюдений в пунктах — аналогах следует осуществить восстановление месячного стока по методам, изложенным в документах [Свод, 2004; Пособие, 1984; Рекомендации, 2007].

В соответствии с отмеченными работами определяют для водохозяйственного года расчетной вероятности превышения $P_{расч}$, соответствующей заданной проектной обеспеченности гарантированной отдачи.

При периоде наблюдений в пунктах аналогах n от 15 до 30 лет из исходного ряда выделяют три группы:

— многоводные годы ($P < 33{,}3$ %);

— средние по водности годы ($33{,}3$ % $\le P \le 66{,}7$ %);

— маловодные годы ($P > 66{,}7$ %).

При продолжительности наблюдений более 30 лет выделяют пять групп:

— очень многоводные годы ($P < 16{,}7$ %);

— многоводные годы ($16{,}7$ % $\le P < 33{,}3$ %);

— средние по водности годы ($33{,}3$ % $\le P \le 66{,}7$ %);

— маловодные годы ($66{,}7$ % $< P \le 83{,}3$ %);

— очень маловодные годы ($P > 83{,}3$ %).

При расчете внутригодового распределения стока методом **«среднего распределения стока за годы характерной градации водности»** формируется ряд годовых объемов стока. Дальнейший расчет производится в следующем порядке:

— Полученный ряд ранжируется и для каждого члена ранжированного ряда определяется его эмпирическая обеспеченность [Свод, 2004].

— В зависимости от периода наблюдений исходного ряда и расчетной обеспеченности отбираются годы соответствующей группы водности.

— По этой группе лет рассчитываются средние месячные значения объемов стока и выражаются в долях (или процентах) от среднегодового объема стока для данной группы. Полученные значения принимаются в качестве модели относительного внутригодового распределения стока.

— Расчетное распределение стока вычисляют путем умножения месячных долей стока на годовой объем стока расчетной вероятности превышения, определяемый по аналитической кривой обеспеченности.

При использовании **метода «реального года»** формируется три ряда, состоящих из ежегодных объемов стока за водохозяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон. При необходимости формируется четвертый ряд — из объемов стока за лимитирующий месяц (ЛМ). Дальнейший расчет производится в следующем порядке.

— Каждый из полученных рядов ранжируется и для каждого члена ранжированного ряда определяется его эмпирическая обеспеченность [Свод, 2004].

— Для каждого из рядов в соответствии с длительностью исходного ряда в зависимости от расчетной обеспеченности отбираются годы соответствующей группы водности.

— Выбирается реальный водохозяйственный год, для которого эмпирические обеспеченности объемов стока за ВГ, ЛП, ЛС и ЛМ наиболее близки к расчетной обеспеченности. Для объективного выбора такого года используется следующий критерий:

$$\Delta P_j = (P_{вг} - P_{расч})_j^2 + (P_{лп} - P_{расч})_j^2 + (P_{лс} - P_{расч})_j^2 + (P_{лм} - P_{расч})_j^2, \qquad (7.1)$$

где $P_{расч}$ — расчетная вероятность превышения, принимаемая одинаковой для всех расчетных интервалов времени;

$P_{вг}, P_{лп}, P_{лс}, P_{лм}$ — значения вероятностей превышения стока за выбранный водохозяйственный год, его лимитирующий период, лимитирующий сезон и лимитирующий месяц;

ΔP_j — суммарное отклонение, которое определяют для каждого из исследуемых водохозяйственных лет, вошедших в расчетную группу водности;

В качестве расчетного года принимают тот водохозяйственный год, для которого по формуле (7.1) получено наименьшее значение ΔP_j.

— Месячные объемы стока расчетного водохозяйственного года выражаются в долях (или процентах) от объема годового стока и принимаются в качестве модели относительного внутригодового распределения стока.

— Расчетное распределение стока вычисляют путем умножения полученных месячных долей стока на годовой объем стока расчетной вероятности превышения, определяемый по аналитической кривой обеспеченности.

При использовании **метода «компоновки»** по аналитическим кривым обеспеченностей определяются объемы стока расчетной вероятности превышения для водохозяйственного года, лимитирующего периода, лимитирующего сезона (а при необходимости и лимитирующего месяца): $W_{ВГ, P\%}$, $W_{ЛП, P\%}$, $W_{ЛС, P\%}$.

Расчетные объемы стока за нелимитирующий период ($W_{НЛП}$) и нелимитирующий сезон ($W_{НЛС}$) определяются по остаточному принципу:

$$W_{НЛС} = W_{ВГ, P\%} - W_{ЛС, P\%} \qquad (7.2)$$

$$W_{НЛС} = W_{ЛП, P\%} - W_{ЛС, P\%} \qquad (7.3)$$

В результате получают расчетные объемы стока для каждого из трех сезонов. Выражая расчетные объемы стока за каждый сезон в долях от расчетного объема стока за водохозяйственный год, получают модель относительного внутригодового распределения стока по сезонам.

Внутрисезонная компоновка стока осуществляется в следующем порядке:

— Для каждого из трех сезонов формируется ряд ежегодных сезонных объемов стока.

— По каждому ряду в соответствии с периодом наблюдений в исходном ряду в зависимости от расчетной обеспеченности отбираются годы соответствующей группы водности.

— Для каждого из трех сезонов формируется таблица, в которой месячные объемы стока располагаются в убывающем порядке с указанием календарных месяцев, к которым они относятся (ранжирование по строке).

Для составного сезона (например, лето-осень) месячные расходы располагаются в порядке убывания отдельно для каждого из составляющих их сезонов.

— По каждому столбцу таблицы рассчитывается средний объем месячного стока и указывается месяц, наиболее часто встречающийся в этом столбце.

— Полученные месячные объемы стока выражаются в долях от среднего объема стока за сезон (по соответствующей группе водности) и принимаются в качестве модели относительного внутрисезонного распределения стока.

— Используя модель относительного внутригодового распределения стока по сезонам и модели относительного внутрисезонного распределения стока получают модель относительного внутригодового распределения стока по месяцам водохозяйственного года.

— Расчетное распределение стока вычисляют путем умножения полученных месячных долей стока на годовой объем стока расчетной вероятности превышения.

Определение расчетного внутригодового распределения суточного речного стока воды внутри года или характерного его периода, независимо от хронологического хода стока, производят путем **построения кривых продолжительности суточных расходов воды.** Могут использоваться следующие виды кривых:

а) средняя многолетняя годовая кривая продолжительности суточных расходов воды, дающая характеристику среднего многолетнего типового распределения суточных расходов воды;

б) средняя многолетняя кривая продолжительности суточных расходов воды за тот или иной расчетный период года (навигационный, лесосплавной, вегетационный и т.д.).

Выбор кривой определяют характером решаемой практической задачи. Кривые продолжительности суточных расходов воды строят следующим образом:

— Среднюю многолетнюю годовую кривую продолжительности суточных расходов воды определяют путем осреднения ординат ежегодных кривых среднесуточных расходов воды 30-, 90-, 180-, 270- и 355-суточной продолжительности (или соответствующих относительных продолжительностей стояния, равных 8 %, 25 %, 50 %, 75 % и 97 % общей длительности года) и абсолютных (срочных) значений максимального и минимального расходов воды за конкретные годы наблюдений.

Аналогичным образом строят среднюю многолетнюю кривую продолжительности стояния среднесуточных расходов воды за тот или иной расчетный внутригодовой период. Ее ординаты могут выражаться в долях среднемноголетнего расхода воды за рассматриваемый период (вегетационный, навигационный и т. д.), а абсциссы — в долях его длительности;

— Ежегодную кривую продолжительности суточных расходов воды строят на основе расположенных в убывающем порядке суточных расходов воды конкретного года. Этим ранжированным значениям присваивают порядковые номера с 1-го по 365-й или 366-й. При этом в качестве расходов воды продолжительностью стояния 1 сутки и 365 (или 366) суток используют данные соответственно о максимальном и минимальном срочном (а не среднесуточном) расходах воды.

Кривую продолжительности суточных расходов воды для расчетной части конкретного года (вегетационного, навигационного, лесосплавного периода и т. д.) строят аналогичным образом по данным о расположенных в убывающем порядке среднесуточных расходах воды и их порядковых номерах. Эти порядковые номера могут быть заменены их относительными характеристиками, выраженными в долях или в процентах общего числа в расчетном периоде.

При наличии короткого ряда наблюдений ($5 \leqslant n < 15$) для приближенного расчета допустимо использовать метод реального года. При этом в качестве года-модели для многоводных, маловодных и средних по водности лет принимаются соответственно самый многоводный, самый маловодный и наиболее близкий к среднему из имеющихся лет наблюдений.

При отсутствии данных наблюдений расчет внутригодового стока может производиться любым из перечисленных методов.

В этом случае модель относительного внутригодового распределения стока рассчитывается по данным реки-аналога, а расчетный объем годового стока на исследуемой реке определяется по методике, в соответствии с [Свод, 2004].

8. Максимальный сток рек

Методы определения расчетных характеристик максимального стока весеннего половодья и дождевых паводков подразделяют на следующие:

а) при наличии одной или нескольких рек-аналогов;

б) при отсутствии рек-аналогов.

Значения параметров и коэффициентов в расчетных формулах следует уточнять на основе использования гидрометеорологической информации за весь период наблюдений, включая последние годы стационарных наблюдений и материалы полевых гидрометеорологических изысканий, в соответствии с работой [Свод, 2004].

Выбор рек-аналогов следует проводить с соблюдением требований, указанных в [Свод, 2004], а также при соблюдении условий:

$$L/A^{0,56} \approx L_a/A_a^{0,56} \tag{8.1}$$

$$JA^{0,50} \approx J_a A_a^{0,50} \tag{8.2}$$

где L и L_a — длина исследуемой реки и реки-аналога соответственно, км; J и J_a — уклон водной поверхности исследуемой реки и реки-аналога, промилле; A и A_a — площади водосборов исследуемой реки и реки-аналога соответственно, км^2.

При использовании нескольких независимых (но не более трех) региональных методов и схем расчета максимального стока окончательное расчетное значение рассматриваемой характеристики принимают в соответствии с [Свод, 2004].

При отсутствии гидрометрических наблюдений необходимо проводить инженерно-гидрометеорологические изыскания в исследуемом створе или районе проектирования [Свод, 2004] с последующим учетом этих данных при определении расчетных максимальных расходов воды.

Параметры распределения и расчетные значения характеристик максимального стока определяются с помощью следующих основных методов:

— гидрологической аналогии;

— осреднения в однородном районе;

— построения карт изолиний параметров распределения максимального стока;

— построения региональных зависимостей максимального стока, параметров распределения и расчетных квантилей от основных физико-географических факторов.

— построения зависимостей между годичными стоковыми характеристиками и формирующими сток факторами;

— построения зависимостей, основанных на использовании материалов полевых гидрометеорологических изысканий и кратковременных гидрологических наблюдений, отражающих пространственные закономерности распределения гидрологических характеристик.

При определении параметров и коэффициентов расчетных формул максимальные расходы воды и используемые метеорологические факторы должны быть приведены к многолетнему периоду в соответствии с работами [Рекомендации,1979; Свод, 2004; Методические рекомендации, 2007].

8.1. Весеннее половодье

Расчет максимальных расходов воды рек весеннего половодья с использованием редукционной формулы производят для рек с площадями водосборов от элементарно малых (менее 1 км^2) до 20000 км^2 для европейской части России и до 50000 км^2 — для азиатской части, за исключением транзитных участков рек, где происходит сильное распластывание волны половодья, вызывающее снижение максимальных расходов воды.

При наличии данных метеорологических наблюдений, позволяющих рассчитывать водоотдачу из снежного покрова, расходы воды малых рек допускается определять по упрощенным генетическим формулам.

Расчетный максимальный расход воды весеннего половодья $Q_{P\%}$, м^3/с, заданной вероятности превышения $P_\%$ при наличии рек-аналогов определяют по редукционной формуле

$$Q_{P\%} = \left(K_0 h_{P\%} \mu_{P\%} \delta\delta_1\delta_2\delta_3 A\right)/\left(A + A_1\right)^n \qquad (8.3)$$

где K_0 — параметр, характеризующий дружность весеннего половодья; $h_{P\%}$ — расчетный слой суммарного весеннего стока (без срезки грунтового питания), мм, ежегодной вероятности превышения $P_\%$; $\mu_{P\%}$ — коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды; δ, δ_1, δ_2, δ_3 — коэффициенты, учитывающие влияние водохранилищ, прудов и проточных озер (δ), залесенности (δ_1), заболоченности (δ_2) и распашки (δ_3) речных водосборов на максимальные расходы воды; A — площадь водосбора исследуемой реки до расчетного створа, км^2; A_1 — дополнительная площадь, учитывающая снижение интенсивности редукции модуля максимального стока с уменьшением площади водосбора, км^2; n — районный показатель степени редукции.

Показатель степени редукции n и параметр A_1 в формуле (8.3) определяют на основе анализа зависимости $\lg(h_{1\%}/q_{1\%}) = f\,[\lg(A+1)]$, которая строится по данным наблюдений на изученных реках исследуемого района.

При отсутствии уменьшения редукции в зоне малых площадей водосборов — параметр A_1 принимается равным единице.

Параметр K_0, характеризующий дружность весеннего половодья, рассчитывают как среднее из значений, определенных по данным нескольких рек-аналогов обратным путем из формулы (8.3).

Расчетный слой суммарного весеннего стока $h_{P\%}$ определяют в зависимости от среднего многолетнего слоя стока половодья h_0, коэффициента вариации C_v и отношения C_s/C_v.

Значения среднего многолетнего слоя стока h_0 и коэффициента вариации C_v определяют по данным рек-аналогов или интерполяцией по картам, построенным для исследуемого района с учетом последних лет наблюдений. В качестве расчетного отношения C_s/C_v принимается значение осредненное в пределах гидрологического однородного района.

В значение среднего многолетнего слоя половодья, определенное на основе пространственной интерполяции, вносят поправки на учет влияния местных

факторов (площадь водосбора, уклоны склонов на водосборе, озерность, залесенность, заболоченность, распаханность):

а) для рек степной зоны России и полупустынной зоны Западной Сибири с площадями водосборов менее 3000 км^2 в значения h_0 следует вводить поправки на учет площади водосбора на основе анализа зависимости $h_0 = f(A)$ с учетом материалов наблюдений последних лет;

б) для малых равнинных рек с площадями водосборов менее 200 км^2 лесостепной, степной, полупустынной зон и засушливых степей поправочные коэффициенты устанавливают на основе анализа зависимости $h_0 = f(I_в)$, где $I_в$ — уклон водосбора;

в) при наличии озер, расположенных на водосборе реки, поправочные коэффициенты к среднему многолетнему слою стока весеннего половодья определяют по связи слоя стока со значениями средней взвешенной озерности речных бассейнов $h_0 = f(A_{оз})$, при этом параметр $A_{оз}$, %, определяют по формуле

$$A_{оз} = \sum_{i=1}^{n} \left(100 S_i A_i / A^2\right) \tag{8.4}$$

где S_i — площадь зеркала озера, км^2; A_i — площадь водосбора озера, км^2; A — площадь водосбора в расчетном створе реки;

г) для водосборов с залесенностью, отличной от средней зональной (районной), поправочные коэффициенты к среднему многолетнему слою стока весеннего половодья определяют на основе анализа зависимости $h_0 = f(A_л/A_{л,р})$, где $A_л$ — залесенность расчетного водосбора, %; $A_{л,р}$ — среднее районное значение залесенности, %.

Значение средней районной залесенности водосборов рассчитывают как среднеарифметическое из значений залесенности, %, по ближайшим речным водосборам (водосборы с $A > 200$ км^2 — для лесной и лесостепной зон и $A > 2000$–3000 км^2 — для зон степей и полупустынь).

В значение коэффициента вариации, полученное на основе пространственной интерполяции, для рек с площадями водосборов $A < 200$ км^2 следует вводить поправки, определяемые по зависимостям $C_v = f(A)$ для равнинных рек и $C_v = f(H)$ — для горных рек, где H — средняя высота речного бассейна, м.

Коэффициенты, учитывающие неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды, рассчитывают по группе рек с наиболее продолжительными рядами наблюдений по формуле

$$\mu_{P\%} = (q_{P\%} h_{1\%}) / (q_{1\%} h_{P\%}) \tag{8.5}$$

где $q_{P\%}$ и $q_{1\%}$ — модули максимального весеннего стока л/с км^2 соответственно обеспеченностью $P\%$ и 1%. Полученные значения для каждой обеспеченности осредняют в пределах однородного гидрологического района.

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

$$\delta = 1/(1 + C\Delta_{оз}) \tag{8.6}$$

где C — коэффициент, принимаемый равным 0,2 для лесной и лесостепной зон и 0,4 — для степной зоны. При отсутствии сведений о средневзвешенной озерности допустимо использовать относительную озерность, в этом случае коэффициент C для всех зон принимается равным 0,11.

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

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

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

$$\delta_1 = \alpha/(A_л + 1)^{n'} \tag{8.7}$$

где n' и α — коэффициенты, зависящие от природной зоны, преобладающих на водосборе почв и грунтов и расположения леса на водосборе (равномерное, в верхней или нижней части водосбора), устанавливаются на основе анализа зависимости $q_{1\%} = f(A_л)$. В первом приближении коэффициенты n' и α определяются по таблице 21 [Пособие, 1984].

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

$$\delta_2 = 1 - \beta \lg(0{,}1A_б + 1) \tag{8.8}$$

где $A_б$ — относительная площадь болот, заболоченных лесов и лугов в бассейне реки, %; β — коэффициент, определяемый в зависимости от типа болот и механического состава почвогрунтов вокруг болот и заболоченных земель (со слоем торфа не менее 30 см). В первом приближении коэффициент β определяется по таблице 22 [Пособие, 1984].

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

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

Для горных рек коэффициенты δ_1 и δ_2 равны единице.

Коэффициент δ_3, учитывающий снижение максимального расхода воды вследствие распашки водосбора под сельскохозяйственные угодья (реки с $A < 200$ км^2), определяется по региональным зависимостям с учетом характера и степени распашки. В первом приближении коэффициент δ_3 определяется по таблице 23 [Пособие,1984]

В первом приближении при отсутствии надежных аналогов допускается производить расчет максимальных расходов весеннего половодья по упрощенной редукционной формуле

$$Q_{P\%} = (B\lambda_p A\delta)/(A + A_1)^{n_2} \tag{8.9}$$

где B — элементарный модуль стока, м^3/с км^2 обеспеченностью $P = 1\,\%$; n_2 — районный показатель редукции; λ_p — переходный коэффициент от обеспеченности 1 % к обеспеченности P %; δ — то же, что и в формуле (8.6).

Показатель степени редукции n_2 и параметр A_1 в формуле (8.9) определяют на основе анализа зависимости $\lg(q_{1\%}) = f[\lg(A+1)]$, которая строится по данным наблюдений на изученных реках исследуемого района.

При отсутствии уменьшения редукции в зоне малых площадей водосборов — параметр A_1 принимается равным единице.

Элементарный модуль стока (B) определяется для изученных рек обратным путем из формулы (8.10), принимая $\lambda_P = \lambda_{1\%} = 1$, $\delta = 1$ и $A_1 = 1$:

$$B = q_{1\%}(A+1)^{n_2} \tag{8.10}$$

Затем строится карта изолиний элементарного модуля стока и по этой карте определяется параметр B для расчетного створа (значение следует снимать для центра тяжести водосбора).

При построении карты не используются данные по бассейнам с аномальным для района показателем озерности.

λ_P — переходные коэффициенты от расхода воды обеспеченностью 1 % к расходу обеспеченностью P % рассчитывают по группе рек с наиболее продолжительными рядами наблюдений по формуле

$$\lambda_P = Q_{P\%}/Q_{1\%} \tag{8.11}$$

Полученные значения λ_p для каждой обеспеченности осредняют в пределах гидрологического однородного района.

При наличии данных метеорологических наблюдений, позволяющих рассчитывать водоотдачу из снежного покрова, расходы воды весеннего половодья малых рек допускается определять по упрощенным генетическим формулам, структура которых и методы определения параметров регламентируются в Справочниках — монографиях «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», подготовка которых предусматривается в УГМС и ГГИ Росгидромета. Вместе с тем следует отметить, что в качестве основного метода определения максимальных расходов воды рекомендуются редукционные формулы.

8.2. Дождевые паводки

Выбор типа расчетной формулы для определения максимального срочного расхода воды дождевого паводка заданной вероятности превышения $Q_{p\%}$ следует производить согласно приложению Б, таблица Б.2 настоящих Рекомендаций.

Расчетная формула типа I (редукционная) для определения $Q_{p\%}$ при наличии одной или нескольких рек-аналогов имеет вид:

$$Q_{P\%} = q_{P\%,a}\varphi_{\mu}\left(\delta\delta_2/\delta_a\delta_{2a}\right)A \tag{8.12}$$

где $q_{p\%,a}$ — модуль максимального срочного расхода воды реки-аналога расчетной вероятности превышения $P_{\%}$, м^3/с·км^2, рассчитывается по формуле

$$q_{р\%,а} = Q_{р\%,а}/A_a \quad (8.13)$$

где $Q_{р\%,а}$ — максимальный расход воды дождевого паводка реки-аналога вероятностью превышения $P_{\%}$, м^3/с; $A_а$ — площадь водосбора реки-аналога, км^2; $\varphi_м$ — коэффициент, учитывающий редукцию максимального модуля стока дождевого паводка ($q_{1\%}$) с увеличением площади водосбора (A, км^2) или продолжительности руслового времени добегания ($\tau_р$, мин); рассчитывают в зависимости от значения коэффициента $\eta_ф$, представляющего соотношение коэффициентов формы водосбора исследуемой реки и реки-аналога:

$$\eta_ф = LA^{0,56}/L_a A_a^{0,56} \quad (8.14)$$

где L и $L_а$ — гидрографическая длина водотока для исследуемой реки и реки-аналога соответственно, км;

При $\eta_ф < 1,5$ расчетное значение коэффициента $\varphi_м$ определяют по формуле

$$\varphi_м = (A_a/A)^{n_1} \quad (8.15)$$

где n — коэффициент, отражающий редукцию модуля максимального стока с увеличением площади водосбора; определяется по зависимости $\lg(q_{1\%}) = f[\lg(A)]$, которая строится по данным изученных рек исследуемого района.

При $\eta_ф > 1,5$ расчетное значение коэффициента $\varphi_м$ определяют по формуле

$$\varphi_м = (\Phi_a/\Phi)^{n_1} \quad (8.16)$$

где Φ и Φ_a — гидроморфометрическая характеристика русла для исследуемой реки и реки-аналога соответственно, определяемая по формуле

$$\Phi = (1000L)/(m_р I_р^m A^{0,25}) \quad (8.17)$$

где $m_р$ и m — гидравлические параметры, характеризующие состояние и шероховатость русла водотока; определяют согласно приложению Б, таблица Б.3; $I_р$ — средневзвешенный уклон русла водотока, ‰; n_1 — коэффициент, отражающий редукцию модуля максимального стока с увеличением руслового времени добегания $\tau_р$.

Коэффициент редукции n_1 определяется по зависимости $\lg(q_{1\%}) = f[\lg(\tau_р)]$, которая строится по данным изученных рек исследуемого района.

Руслове время добегания ($\tau_р$) ч, для гидрологически изученной реки определяют по формуле

$$\tau_р = (1000L)/(V) = (1000L)/(m_р I_р^m Q_{1\%}^{0,25}) \quad (8.18)$$

где V — максимальное значение средней скорости добегания воды по главному водотоку, м/с; $m_р$, m и $I_р$ — то же, что и в формуле (8.17).

Параметры δ, $\delta_а$, и δ_2, $\delta_{2а}$ в формуле (8.12) — поправочные коэффициенты, учитывающие для исследуемой реки и реки-аналога регулирующее влияние соответственно озер (прудов, водохранилищ), а также болот и заболоченных земель. Коэффициенты δ и $\delta_а$ определяются по формуле (8.5); коэффициенты δ_2

и $\delta_{2а}$ определяются по формуле (8.6) при $\beta = 0{,}5$. При использовании формулы (8.16) значения коэффициентов δ_2 и $\delta_{2а}$ принимают равными единице.

Расчетная формула типа II для определения $Q_{р\%}$ при отсутствии рек-аналогов имеет вид:

$$Q_{P\%} = q_{200}\left(200/A\right)^{n} \delta\delta_2\delta_3\lambda_{P\%}A \qquad (8.19)$$

где q_{200} — модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения $P = 1$ %, приведенный к условной площади водосбора, равной 200 км^2 при $\delta = \delta_2 = \delta_3 = 1{,}0$;

Для изученных рек q_{200} определяется обратным путем из формулы (8.19). По этим данным строится региональная карта изолиний параметра q_{200}.

Для исследуемой реки значение q_{200} определяется для центра тяжести водосбора путем интерполяции по региональной карте.

В горных районах значение q_{200} допустимо определять по графику связи $q_{200} = f(\bar{H})$, где $\bar{H}$ — средняя высота водосбора.

Коэффициенты δ и δ_2 определяются также как в формуле типа 1. Параметр δ_3 — поправочный коэффициент, учитывающий изменение параметра q_{200} с изменением средней высоты водосбора, вводится к значению q_{200}, снятому с региональной карты; определяется по данным гидрологически изученных рек. При использовании зависимости $q_{200} = f(\bar{H})$ коэффициент δ_3 не вводится.

$\lambda_{р\%}$ — переходный коэффициент от максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятности превышения $P = 1$ % к значениям другой вероятности превышения $P < 25$ %; рассчитывают по группе рек с наиболее продолжительными рядами наблюдений по формуле (8.11). Полученные значения для каждой обеспеченности осредняют в пределах гидрологически однородного района.

Расчетная формула типа III (формула предельной интенсивности) используется для определения максимальных расходов дождевых паводков на реках с площадью водосбора менее 200 км^2. Формула имеет вид:

$$Q_{P\%} = q'_{1\%}\varphi H_{1\%}\delta\lambda_P A \qquad (8.20)$$

где $q'_{1\%}$ — максимальный модуль стока ежегодной вероятности превышения $P = 1$ %, выраженный в долях от произведения $\varphi H_{1\%}$, при $\delta = 1$; φ — сборный коэффициент стока; $H_{1\%}$ — максимальный суточный слой осадков вероятности превышения $P = 1$ %, мм; определяют по данным ближайших метеорологических станций; δ, $\lambda_{р\%}$, A — то же, что и в формуле (8.19).

Параметр $q'_{1\%}$ определяется для исследуемого района в зависимости от гидроморфометрической характеристики русла $\Phi_р$ и продолжительности склонового добегания $\tau_{ск}$, мин. В первом приближении параметр $q'_{1\%}$ допустимо определять по табл. 9 прил. 2 [Пособия, 1984].

Гидроморфометрическую характеристику русла исследуемой реки $\Phi_р$ определяют по формуле

$$\Phi_р = (1000L)\Big/\left[m_р I_р^m A^{0{,}25}\left(\varphi H_{1\%}\right)^{0{,}25}\right] \qquad (8.21)$$

где $m_р$, $I_р$, A — то же, что и в формуле (8.17).

Сборный коэффициент стока для равнинных рек при наличии рек-аналогов определяется по формуле

$$\varphi = \frac{q_{1\%,a}}{16{,}67\overline{\psi}(\tau_б)\delta H_{1\%}}\left(\frac{I_в}{I_{в,a}}\right)^{n_2}\left(\frac{A_a+1}{A+1}\right)^{n_3} \qquad (8.22)$$

где $q_{1\%,a}$ — модуль максимального срочного расхода воды реки-аналога ежегодной вероятности превышения P = 1 %, м^3/с·км^2; $16{,}67\xi\overline{\psi}(\tau_б)$— ордината кривой редукции осадков, определяемая в зависимости от бассейнового времени добегания $\tau_б$, мин по таблицам, включенным в проектируемые Справочники — монографии по определению основных расчетных гидрологических характеристик; в первом приближении значение $16{,}67\xi\overline{\psi}(\tau_б)$ допустимо определять по таблице 10 приложения 2 [Пособия, 1984]; $I_в$, $I_{в,a}$ — соответственно для исследуемой реки и реки-аналога средний уклон водосбора, ‰; n_2 — степенной коэффициент, определяемый в зависимости от механического состава почв и природной зоны по таблице11 приложения 2 [Пособие, 1984]; n_3 — степенной коэффициент, принимаемый для лесотундры и лесной зоны равным 0,07, для остальных природных зон — 0,11; δ — поправочный коэффициент.

Продолжительность бассейнового времени добегания определяется по формуле

$$\tau_б = 1{,}2\tau_p^{1,1} + \tau_{ск}, \qquad (8.23)$$

где τ_p — продолжительность руслового добегания, мин; определяют по формуле (8.18); $\tau_{ск}$ — продолжительность склонового добегания.

Продолжительность склонового добегания ($\tau_{ск}$, мин.) допускается принимать: для водотоков расположенных в лесной и тундровой зонах заболоченностью менее 20 % — 60, от 20 % до 40 % — 100, более 40 % — 150; в лесостепной зоне — 60; в степной зоне и засушливых степях — 30; в полупустынной зоне — 10; в горных районах — 10.

Сборный коэффициент стока при отсутствии рек-аналогов определяется по формуле

$$\varphi = \frac{C_2}{(A+1)^{n_3}}\varphi_0\left(\frac{I_в}{50}\right)^{n_2}, \qquad (8.24)$$

где c_2 — эмпирический коэффициент, который для тундры и лесной зоны принимают равным 1,2, для остальных природных зон –1,3; φ_0 — сборный коэффициент стока для условного водосбора с площадью A, равной 10 км^2, и средним уклоном $I_в$, равным 50 ‰; определяется по таблице11 приложения 2 [Пособие, 1984]; n_2, n_3, A — то же, что и в формуле (8.22).

При различной крутизне склонов или значительной пестроте почвогрунтов, слагающих исследуемый водосбор, сборный коэффициент стока φ принимают как средневзвешенное значение.

Для водотоков со средним уклоном водосбора более 150 ‰ сборный коэффициент стока φ рассчитывают по формуле (8.23) при $I_в$, равном 150 ‰, а для водотоков со средним уклоном водосбора менее 15 ‰ — при $I_в$, равном 15 ‰.

Расчетный слой дождевого паводка $h_{p\%}$ для водосборов площадью более 50 км^2 следует определять по формуле

$$h_{p\%} = h^{*}_{p\%} h_H \qquad (8.25)$$

где $h^{*}_{p\%}$ — слой дождевого паводка расчетной вероятности превышения $P_{\%}$, мм; принимают по данным реки-аналога или по карте, построенной для гидрологически изученных рек при $k_H = 1$; k_H — эмпирический коэффициент, учитывающий уменьшение (редукцию) слоя дождевого паводка с увеличением площади водосбора в засушливых районах; устанавливают на основе исследования зависимости $h^{*}_{p\%}=f(A)$.

Расчетный слой дождевого паводка $h_{p\%}$ для водосборов площадью менее 50 км^2 при наличии рек-аналогов примерно такой же площади следует принимать равным расчетным слоям рек-аналогов.

При отсутствии рек-аналогов расчетные слои дождевого стока следует определять по формуле

$$h_{p\%} = \psi(\tau_{б=150\ мин})\varphi\, H_{1\%}\lambda p, \qquad (8.26)$$

где $\psi(\tau_{б=150\ мин})$ — относительная интенсивность осадков, принимаемая для водосборов площадью менее 1 км^2 степной и лесостепной зон по таблице10 приложения 2 [Пособие, 1984]; для других водосборов значение $\psi(\tau_{б=150\ мин})$ принимается равным единице; φ, $H_{1\%}$ — то же, что и в формуле (20); $\lambda_{p\%}$ — переходные коэффициенты от слоя стока дождевого паводка вероятности превышения P =1 % к слоям других вероятностей превышения.

Значения $\lambda_{p\%}$ рассчитывают по данным ближайших метеостанций по формуле

$$\lambda_{p\%} = H_{p\%} / H_{1\%} \qquad (8.27)$$

где $H_{P\%}$ и $H_{1\%}$ — слои максимальных суточных осадков вероятностью превышения соответственно $P_{\%}$ и 1 % , мм; определяются по кривым обеспеченности суточных осадков. При использовании нескольких метеостанций значения $\lambda_{p\%}$ осредняются для каждой обеспеченности.

В качестве основного метода определения максимальных расходов воды дождевых паводков рекомендуется использование редукционных формул.

8.3. Гидрографы стока воды рек весеннего половодья и дождевых паводков

Параметры основных элементов расчетного гидрографа следует определять согласно СП 33-101-2003 [Свод, 2004].

Коэффициент перехода k_t от максимального мгновенного расхода воды весеннего половодья Q'_p к среднесуточному Q_p устанавливается по рекам-аналогам. При их отсутствии для равнинных рек определение коэффициента k_t осуществляется по региональным зависимостям от площади водосбора.

Одновершинный гидрограф стока воды весеннего половодья (дождевого паводка) рассчитывается согласно Приложению Б, табл. Б.9 по значению коэффициента несимметричности k_s, определяемого по формуле (5.50) СП [Свод, 2004]

по данным рек-аналогов или по значению коэффициента формы гидрографа λ, определяемого по формуле:

$$\lambda = qt_n / 0{,}0116h. \tag{8.28}$$

Ординаты расчетного гидрографа определяются по формуле:

$$Q_i = yQ_p, \tag{8.29}$$

а абсцисса по формуле:

$$t_i = xt_n, \tag{8.30}$$

где t_n — продолжительность подъема весеннего половодья (дождевого паводка), определяется по формуле:

$$t_n = 0{,}0116\lambda h_p / q_p, \tag{8.31}$$

где x, y — относительные ординаты расчетного гидрографа стока воды, определяемые по Приложению Б, таблица Б.9; q_p — расчетный модуль максимального среднего суточного расхода воды весеннего половодья или максимального мгновенного расхода воды дождевого паводка, $м^3/с\ км^2$.

Внутрисуточный гидрограф стока определяется по формуле (8.29), значения относительных ординат y которого принимается по Приложению Б, таблица Б.10.

Для рек с площадью водосбора менее 200 $км^2$, с продолжительностью подъема дождевого паводка 1 сутки или менее, расчетная продолжительность определяется по формуле:

$$T_n = \beta\lambda h_p / q_p, \tag{8.32}$$

где β — коэффициент, принимаемый при расчете продолжительности подъема дождевого паводка в часах, равным 0,28, в минутах — 16,7.

При определении расчетных гидрографов дождевых паводков коэффициент несимметричности k_s следует принимать по рекам-аналогам; при отсутствии аналогов допускается k_s принимать равным 0,30, для рек с площадью менее 1 $км^2$, степной и полупустынной зон — равным 0,20.

9. Минимальный сток воды рек

Основной расчетной характеристикой является минимальный 30-суточный или среднемесячный расход воды в зимний и (или) летне-осенний сезоны. Минимальный среднесуточный расход определяется по связи с 30-суточным.

Минимальный среднесуточный расход воды обычно используется в случаях, когда не допускается перерывов в подаче воды.

Способ определения минимального 30-суточного расхода воды зависит от категории реки — малая, средняя или большая.

Река считается малой, если модуль (q_{30}) минимального 30-суточного стока изменяется (увеличивается или уменьшается) с увеличением площади водосбора (A). Это можно установить по графику связи $q_{30}=f(A)$ для относительно однородных по условиям формирования минимального стока гидрологических районов. При этом связь обычно бывает недостаточно тесной, чтобы ее можно было использовать непосредственно в расчетах, но определенной, чтобы выявить тенденцию увеличения (или уменьшения) модуля стока с увеличением площади водосбора до определенного предела. Наиболее заметно это видно по нижней огибающей линии поля точек.

Для предварительной оценки (без построения графика) к малым можно отнести реки с площадью водосбора до 1000–1500 км^2 в тундре и лесной зоне, до 2000–2500 км^2 в лесостепной и степной зонах, до 5000 км^2 в зоне сухих степей и полупустынь, а также в зоне многолетней мерзлоты в зимний сезон. В горных и полугорных районах к малым относятся реки со средней высотой водосбора до 1500 м.

К средним относятся реки с площадью водосбора от вышеуказанных до 50000–75000 км^2. Реки с большей площадью считаются большими.

Минимальные расходы воды на больших и средних реках определяют по интерполяции между пунктами наблюдений с учетом боковой приточности и данных полевых гидрометеорологических изысканий в расчетном створе.

При невозможности использовать указания предыдущего абзаца, для расчета минимальных 30-суточных (среднемесячных) расходов применяют методы пространственной интерполяции минимального 30-суточного модуля стока 80 %-ной обеспеченности для зимнего или летне-осеннего сезонов (карта изолиний).

Минимальный сток малых равнинных и полугорных рек рассчитывается по зависимости минимальных 30-суточных расходов воды 80 %–ной обеспеченности от площади водосбора для районов однородных по условиям формирования минимального стока. В общем виде эта зависимость имеет вид [Владимиров А.М., 1970, 1990]:

$$Q_{p\%} = b(A \pm A_1)^m \delta_1 \delta_2 \lambda_{p\%}, \qquad (9.1)$$

где $Q_{p\%}$ — минимальный 30-суточный расход воды расчетной обеспеченности, м^3/с; A — площадь водосбора, км^2; A_1 – дополнительная площадь водосбора: при положительном значении отражает дополнительное подземное питание рек (за счет карста, выхода глубоких трещинных вод, подпитывание из водоносных

горизонтов других бассейнов), в случае отрицательного значения показывает площади водосбора с ежегодным отсутствием стока в течение 30 суток; δ_1 — коэффициент, учитывающий увеличение минимальных расходов воды на озерных реках; (при расположении озер в верхней части водосбора и озерности менее 5 % коэффициент δ_1 может быть принят равным 1); δ_2 — коэффициент, учитывающий увеличение минимальных расходов воды заболоченных водосборов; $\lambda_{P\%}$ — переходный коэффициент от минимального 30-суточного расхода воды 80 %-ной обеспеченности к расходу воды расчетной обеспеченности; b, m — параметры, определяемые по рекам-аналогам или как средние районные значения с использованием минимальных расходов воды опорной обеспеченности, обычно 80 %.

Основой формулы (9.1) является связь минимального расхода воды с площадью водосбора, описываемая выражением

$$Q_{30_{80\%}} = bA^m, \tag{9.2}$$

где $Q_{30_{80\%}}$ — минимальный 30-суточный (месячный) расход воды 80%-ной обеспеченности в зимний или летне-осенний сезоны.

Связь строится для районов, однородных по гидрогеологическим, морфологическим, климатическим и растительным характеристикам.

В зависимости от условий формирования минимального стока в каждом относительно однородном районе интенсивность увеличения расходов воды с ростом площади водосбора, характеризуемая коэффициентом m, может меняться от $m>1$ до $m<1$ (рис. 9.1).

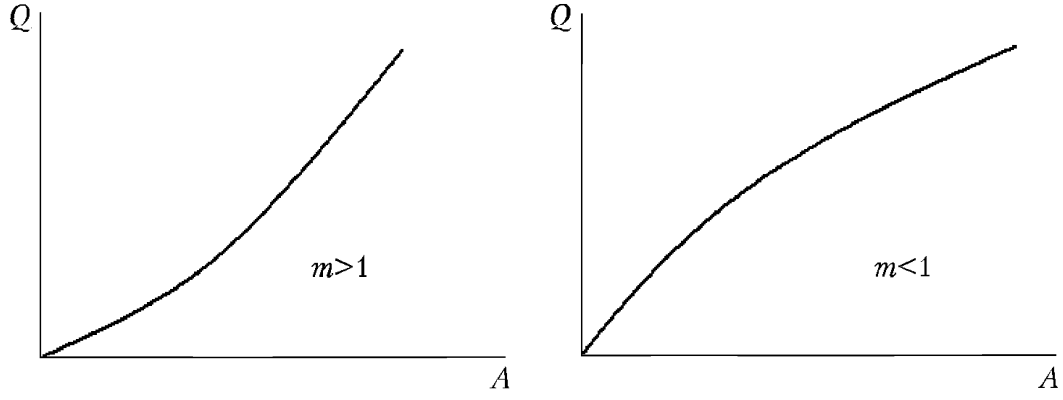

Рис. 9.1. Виды связи минимального расхода воды с площадью водосбора

Выражение (9.2) может использоваться в районах с отсутствием озер, болот, пересыхающих или перемерзающих рек. В этом случае расчетная формула приобретает вид:

$$Q_{P\%} = bA^m\lambda_{P\%}. \tag{9.3}$$

Пример расчета параметров этой формулы дан в примере А.14, а при наличии эпизодических и кратковременных экспедиционных наблюдений в примере А.15 Приложения А.

При наличии в районе пересыхающих или перемерзающих рек, в которых сток ежегодно отсутствует в течение 30 суток формула (9.1) преобразуется в уравнение:

$$Q_{P\%} = b(A-A_1)^m\lambda_{P\%}, \quad (9.4)$$

При наличии дополнительного подземного питания рек формула (9.1) имеет вид:

$$Q_{P\%} = b(A+A_1)^m\lambda_{P\%}, \quad (9.5)$$

На рисунке 9.2 показан характерный вид связи при ежегодном отсутствии стока на части рек (а) или при дополнительном питании рек (б)

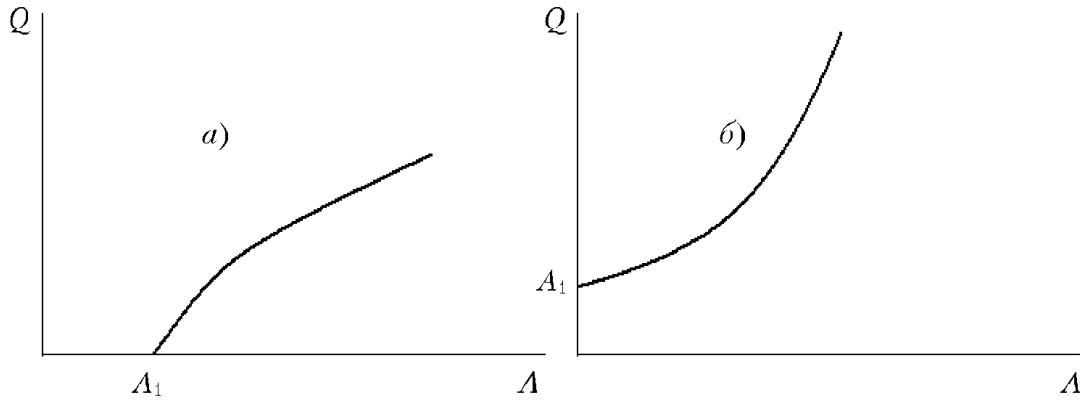

Рис. 9.2. Виды районной связи: а — при ежегодном отсутствии стока у части рек, формула (9.4), б — при дополнительном питании, формула (9.5)

В озерных или сильно заболоченных районах формула (9.1) приобретает вид:

$$Q_{P\%} = bA^m\delta_1\delta_2\lambda_{P\%}, \quad (9.6)$$

Коэффициент δ_1, учитывающий увеличение минимальных расходов воды на озерных реках при относительной озерности более 5 % рассчитывается по формуле [Сакович В.М, 2009]:

$$\delta_1=(1+cA_{оз})^n, \quad (9.7)$$

где $A_{оз}$ — относительная озерность водосбора; c, n — районные параметры.

Допускается также использовать упрощенные варианты формулы (9.7):

$$\delta_1=(1+cA_{оз}), \quad (9.8)$$

$$\delta_1=(1+A_{оз})^n, \quad (9.9)$$

При озерности более 15 % в формуле (9.7) предпочтительно использовать не относительную, а средневзвешенную озерность, которая определяется по формуле (5.4)

Если нет данных по нескольким рекам аналогам для выявления районных параметров уравнения (9.7) и река вытекает или протекает через одно озеро, то дополнительный приток воды за счет регулирующей емкости озера можно учесть при расчете по следующему уравнению [Марков М.Л., Гуревич Е.В., 2004].

$$Q_{P\%} = b(A \pm A_1)^m \delta_2 \lambda_p + Q_{оз}, \quad (9.10)$$

где

$$Q_{оз\,P\%} = (0{,}84 H_{30} f_{оз})/T, \quad (9.11)$$

где, $f_{оз}$ –площадь зеркала озера, м^2; H_{30} — амплитуда изменения уровня воды в озере за меженный 30-ти суточный период м; T — продолжительность расчетного периода, сек. (86400 сек · 30 сут.).

Расчет H_{30} выполняется по следующим уравнениям:

для маловодного года $H_{30} = 0{,}0236 H_{оз} + 0{,}0054, \quad (9.12)$

для среднего по водности года $H_{30} = 0{,}0411 H_{оз} + 0{,}0052, \quad (9.13)$

для многоводного года $H_{30} = 0{,}0555 H_{оз} + 0{,}0074, \quad (9.14)$

где $H_{оз}$ — средняя многолетняя амплитуда колебания уровня воды в озере, см; рассчитывается по уравнению:

$$H_{оз} = 85{,}3 A_{оз}^{0{,}096}, \quad (9.15)$$

где $A_{оз}$ – площадь водосбора озера, км^2.

В случаях, когда река протекает через два и более озер или река вытекает из озера, которое соединяется водотоками с несколькими другими озерами, расчет средней многолетней амплитуды колебания уровня воды в самом нижнем озере рассчитывается по следующему выражению, учитывающему регулирующее влияние выше расположенных озер:

$$H_{оз} = 85{,}31 (A_{оз1} - A_{оз2} - \ldots - A_{озn})^{0{,}096}, \quad (9.16)$$

где $A_{оз1}$ — площадь водосбора нижнего озера, км^2; $A_{оз2}$, ... $A_{озn}$ — частные площади водосборов вышележащих озер.

Коэффициенты в формулах 9.11–9.16 получены на основе осреднения данных по территории Прибалтики и ЕТР и должны уточняться при разработке региональных методик.

Пример расчета минимального летнего 30-суточного стока озерной реки ежегодной вероятности превышения 95 % дан в Приложении А.16

Коэффициент δ_2 определяется по формуле:

$$\delta_2 = 1 + \beta \lg(0{,}1 A_б + 1), \quad (9.17)$$

где β — эмпирический коэффициент, определяемый в зависимости от типа болот; $A_б$ — относительная площадь болот на водосборе.

При заболоченности водосбора менее 10 % коэффициент δ_2 принимается равным 1.

В горных районах минимальный сток следует определять по графической зависимости модуля минимального 30-суточного стока от средней высоты водосбора. Дополнительным параметром для водосборов со средней высотой до 2500 м может служить площадь водосбора.

Коэффициент $\lambda_{p\%}$, определяется как средний в однородном районе по данным рек-аналогов с учетом гидрогеологических условий, глубины вреза русла реки и других факторов минимального стока.

Коэффициент $\lambda_{p\%}$ можно определить по графику связи $Q_{80\%}=f(Q_{p\%})$, рисунок 9.3. Вместо $Q_{80\%}$ можно использовать другой расход в диапазоне 75–97%.

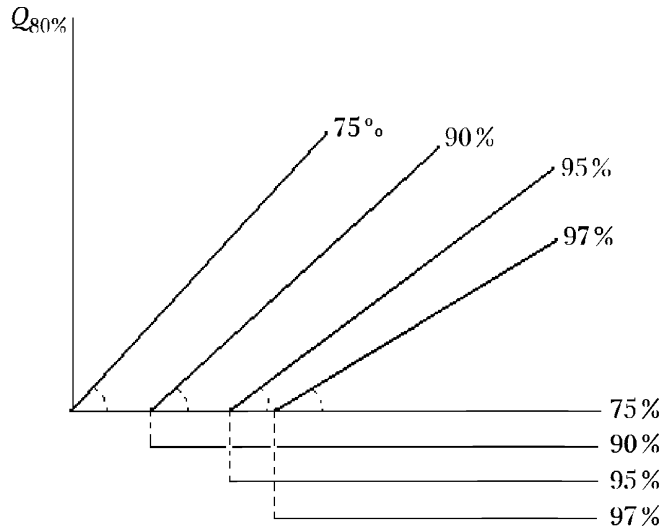

Рис. 9.3. Вид связи минимальных 30-суточных расходов воды 80%-ной обеспеченности с такими же расходами другой обеспеченности

Значение коэффициента $\lambda_{p\%}$ устанавливается как величина углового коэффициента линии связи. Отклонение эмпирических точек от линии связи обычно не превышает 15 %.

Минимальный среднесуточный расход воды расчетной обеспеченности определяется по формуле:

$$Q_{сут.p\%} = kQ_{30,\,80\%}\lambda_{p\%}, \qquad (9.18)$$

где k –коэффициент, определяемый как средний по району по связи суточных и 30-суточных минимальных расходов (см. пример, приложение А.14) .

Продолжительность ежегодного пересыхания или перемерзания реки в расчетном створе определяется по формуле [Владимиров А.М.,1976].

$$T = d_1(A+1)^{-m_1}, \qquad (9.19)$$

где T — максимальная или средняя многолетняя (в зависимости от требований проекта) продолжительность отсутствия стока, сутки; A — площадь бассейна до расчетного створа, км^2; d_1 и m_1 — районные параметры.

На территории криолитозоны (зоны многолетней мерзлоты) в зимний сезон ежегодно промерзают реки с площадью бассейна до 5000 км^2. Продолжительность промерзания рекомендуется определять по формуле [Аржакова С.К., 2001]:

$$T = d_2(L+1)^{-m_2}, \tag{9.20}$$

где L — длина реки от истока до расчетного створа, км; d_2 и m_2 — районные параметры.

Продолжительность эпизодического отсутствия стока в расчетном створе определяется по формуле:

$$T = d_3 q_{30}^{-m_3}, \tag{9.21}$$

где q_{30} — средний многолетний или 80 %-ной обеспеченности (в зависимости от требований проекта) модуль минимального 30-суточного или среднемесячного стока, л/с·км^2; d_3 и m_3 — районные параметры.

Пример расчета параметров уравнения (9.17) при наличии эпизодических и кратковременных экспедиционных наблюдений дан в примере А.15 Приложения А.

10. Расчет наивысших уровней воды рек

10.1. Полевые изыскания

Для повышения точности определения расчетных уровней воды при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в расчетном створе необходимо проводить инженерно-гидрометеорологические изыскания. Основными задачами при проведении полевых изысканий являются:

— гидрографическое обследование исследуемого участка реки;

измерение продольных и поперечных (для пойменных участков рек) уклонов водной поверхности;

— русловые съемки исследуемого участка реки с определением морфометрических характеристик поперечного сечения исследуемого водного объекта в расчетном створе или створах;

— проведение кратковременных гидрометрических наблюдений за уровнями расходами воды на исследуемом участке реки;

— определение наивысшего уровня воды по меткам уровня высоких вод (УВВ) за исторический период по опросам местных жителей другим свидетельствам;

— установление вероятности образования скоплений льда, их местоположение и мощность;

— проведение промеров глубин в реке ниже уреза воды и нивелирование русла береговых склонов выше уреза до предполагаемой высоты уровня воды 1%-ной вероятности ежегодного превышения плюс один метр;

— проведение учащенных наблюдений за ледовыми явлениями и уровнем воды в периоды замерзания и вскрытия реки; измерения скоростей перемещения льдин.

В объем исходной гидрологической информации (первичные материалы) по максимальным расходам и наивысшим уровням воды помимо официальных данных Росгидромета и результатов инженерных гидрологических изысканий следует включать все имеющиеся достоверные сведения из архивных и литературных источников со ссылкой на эти издания.

10.2. Определение расчетных наивысших уровней воды, обусловленных весенним половодьем и дождевыми паводками на реках

Расчетные наивысшие уровни воды, обусловленные половодьями и паводками, определяются по кривым $Q = f(H)$ через расходы воды заданной вероятности ежегодного превышения $Q_{P\%}$, рассчитанные в соответствии с рекомендациями [Свод, 2004]. При наличии широкой поймы кривые расходов устанавливаются отдельно для русла и поймы, а затем они суммируются. Для средних и больших рек расходы воды в пойме могут быть определены в первом приближении с ис-

пользованием соотношений, приведенных в таблице 10.1. Дальнейшее уточнение расходов воды в пойме должно быть произведено в соответствии с полевыми гидрометеорологическими изысканиями.

Таблица 10.1. Зависимость расхода воды в пойме ($Q_п$) в долях от суммарного расхода ($Q_р$+$Q_п$) от отношения общей ширины реки ($B_р$+ $B_п$) к ширине русла ($B_р$)

$\frac{B_р + B_п}{B_р}$	5	10	25	50
$\frac{Q_п}{Q_р + Q_п}$	0,02	0,05	0,17	0,40

Кривые расходов воды строятся с помощью формулы

$$Q = \frac{\omega}{n} h^{2/3} I^{1/2}, \qquad (10.1)$$

где ω — площадь поперечного сечения русла или поймы (м^2) при отметке уровня H, n — коэффициент шероховатости (с/м^{0,33}), h — средняя глубина воды (м) в русле или пойме, I — уклон водной поверхности. Кривые $\omega = f(H)$ и $h = f(H)$ устанавливаются путем промеров глубин в реке ниже уреза воды и нивелирования русла и береговых склонов выше уреза до предполагаемой высоты уровня воды 1%-ной вероятности превышения плюс один метр. Коэффициент шероховатости находится по приложению Б.11. Уклон воды I определяется при высокой воде или в первом приближении по таблице Б.12 приложения Б.

Расчетные значения наивысших уровней воды при весенних подвижках льда и ледоходе оцениваются по кривой $Q = f(H)$ через расходы, вычисленные по формуле

$$Q'_{P\%} = (\eta / K_Q) Q_{P\%}, \qquad (10.2)$$

где η — коэффициент, учитывающий соотношение расходов воды при подвижке (ледоходе) и на пике весеннего половодья ($Q_{P\%}$) и несовпадение по годам этих расходов одной вероятности превышения, K_Q — коэффициент, характеризующий изменение гидравлических характеристик водного потока льдом. Значения коэффициентов η и K_Q определяются методом аналогии.

10.3. Расчет наивысших зажорных и заторных уровней воды

Для определения наивысших уровней воды при зажорах и заторах требуется предварительно выполнить специальные полевые гидрометеорологические изыскания с целью установления вероятности образования скоплений льда, их местоположения и мощности.

Возможность образования зажоров определяют следующие признаки:

— замерзание, происходящее путем перемещения кромки ледяного покрова снизу вверх по течению, что имеет место на реках, которые текут с юга на север или выходят с гор на равнину;

— наличие в пределах участка проектирования или непосредственно ниже его перелома продольного профиля его водной поверхности с резким уменьшением к устью уклонов (в 3 раза и более), сужений русла, крутого поворота, островов и других русловых образований, уменьшающих способность русла пропускать лед;

— уклон водной поверхности выше очага зажора, превышающей 0,05 ‰, при котором шуговые скопления вовлекаются под кромку ледяного покрова;

— интенсивный и длительный (6 и более суток) шугоход с расположенного выше по течению участка, что характерно для всех рек, процесс замерзания которых прерывается оттепелями, и для участков рек с большим тепловым стоком из глубоких озер и водохранилищ;

— большая осенняя водность (модуль стока более 3 л/с км^2).

Наличие русловых препятствий для движения льда является главным условием образования и весенних заторов льда. Дополнительно учитываются следующие признаки заторов:

— более позднее вскрытие участка реки, расположенного ниже по течению, которое имеет место на реках, текущих с юга на север, при выходе рек с гор на равнину и в устьях рек;

— интенсивное снеготаяние и быстрый сброс воды в русловую сеть, чему благоприятствуют большой уклон и малые залесенность, заболоченность и озерность бассейна;

— большая толщина и прочность льда перед вскрытием, наличие зажорных скоплений и наледей в пределах исследуемого участка, интенсивное поступление льда после вскрытия с расположенного выше по течению участка реки, а также с раньше вскрывающихся крупных притоков.

Расчетный наивысший уровень, обусловленный зажором или затором вычисляется по формуле

$$H_{з,p\%} = (\mu I^{0,3}_{Qз,p\%} - 1)h_{Qз,p\%} + H_{Qз,p\%}, \qquad (10.3)$$

где μ — коэффициент зажорности или заторности речного участка; $I_{Qз,p\%}$, $h_{Qз,p\%}$ и $H_{Qз,p\%,}$ — уклон водной поверхности, средняя глубина реки и уровень воды в расчетном створе при расходе $Q_{З,p\%}$ и свободном ото льда русле, $Q_{З,p\%}$ — расход воды в период образования зажора или затора с вероятностью превышения $P\%$.

Коэффициент μ определяется путем полевых изысканий, в ходе которых на временном гидрологическом посту ведутся учащенные наблюдения за ледовыми явлениями и уровнем воды в период замерзания или вскрытия. Путем измерения скоростей перемещения льдин или расчета модулей стока оценивается расход $Qз$ и уровень $H_{Qз}$. Последний может быть определен и с помощью графической срезки уровней с учетом данных о стоке воды. Уклон водной поверхности измеряется в период со свободным ото льда руслом.

При отсутствии полевых работ значение μ может быть определено по аналогии. При выборе речных участков-аналогов учитываются следующие условия:

— возможная географическая близость расположения;

— однонаправленность течения;

— одни и те же факторы формирования осеннего (весеннего) стока;

— подобие поперечных и плановых форм русла в пределах участков;

— равенство уклонов водной поверхности;

— отсутствие факторов, существенно искажающих естественное развитие процессов образования зажоров и заторов.

Ориентировочно, лишь в первом приближении, коэффициент μ может быть определен по табл. 10.2 в зависимости от вида ледяного образования и приращения ширины реки в пределах подъема уровня от $H_{Q_3,p\%}$ до $H_{3,p\%}$.

Таблица 10.2. Коэффициент зажорности (заторности) μ

Вид ледяного образования	$\Delta B/B_{Q_3,p\%}$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	⩾1,0
Зажор	27,1	22,2	18,2	14,9	12,2	10,0
Затор	17,3	14,2	11,6	9,5	7,8	6,4

Расход воды Q_3 рассчитывается через модуль стока, который определяется методом гидрологической аналогии. Помимо обычных требований к реке-аналогу по условиям формирования стока воды в данном случае принимается также во внимание одновременность и направление замерзания (вскрытия) и равенство уклонов.

Кроме выше описанного подхода для расчета максимальных заторных уровней воды 1 % обеспеченности может быть использовано еще два метода.

В первом методе [Жукова М.А., 1978] расчет максимальных заторных уровней воды основан на условии гидравлического подобия процесса образования заторов на реках. Уровень определяется по формуле

$$H_{з.1\%} = \frac{H_{\bar{Q}_з} - H_{\bar{Q}_{мн}}}{1-\mu} + H_{\bar{Q}_{мн}}, \qquad (10.4)$$

где $H_{\bar{Q}_з}$ и $H_{\bar{Q}_{мн}}$ — уровни, соответствующие в условиях свободной ото льда реки среднему за многолетний период расходу воды при заторе ($\bar{Q}_з$) и среднему многолетнему минимальному 30 — суточному зимнему расходу ($\bar{Q}_{мн}$); μ — параметр, характеризующий относительное стеснение русла реки при заторе льда. Он рассчитывается по уравнению

$$\mu = 0{,}30 + 0{,}21 Fr_{\bar{Q}_{мк}}^{0,5} F^{0,17} + 0{,}25 \lg \frac{I_{\bar{Q}_{мк}}}{8{,}3 Fr_{\bar{Q}_{мк}}^{1,16}}, \qquad (10.5)$$

где $Fr_{\bar{Q}_{мк}}$ — число Фруда, соответствующее среднему многолетнему максимальному расходу воды в период весеннего половодья в условиях свободной ото льда реки, $I_{\bar{Q}_{мк}}$ — уклон водной поверхности при $\bar{Q}_{мк}$, F — площадь водосбора, км^2.

Уровень $H_{\bar{Q}_з}$ устанавливается по кривым связи чисел Фруда $Fr = \frac{V^2}{gh}$ и $Fr' = \frac{V^2}{gB}$ с уровнем через уровень , исходя из условия

$$Fr'_{\bar{Q}_з, V_n} = Fr'_{H_{\bar{Q}_{мк}}, V_{co}}, \qquad (10.6)$$

для участков первого типа,

$$Fr_{\bar{Q}_з, V_n} = Fr_{H_{\bar{Q}_{мк}}, V_{co}}, \qquad (10.7)$$

для участков второго типа и для речных участков третьего типа.

$$Fr_{\bar{Q}_э, V_{мк}} = Fr_{\Pi_{\bar{Q}_{мк}}, V_{ср}}, \qquad (10.8)$$

В уравнениях (10.6)–(10.8) обозначения $V_{ср}$, $V_{мк}$ и $V_п$ показывают, что числа Фруда рассчитываются по средней, максимальной в створе или поверхностной скорости течения воды, при этом $V_п = 0{,}5(V_{ср}+V_{мк})$.

Типы заторных участков следующие:

К первому типу заторных участков относятся глубокие участки рек с относительно небольшими средними скоростями течения воды. Заторные подъемы уровня на этих участках большие, а сами заторы устойчивы. За счет очень быстрого увеличения глубины реки с повышением уровня воды число Фруда изменяется незначительно. Если расширение русла с ростом уровня невелико, то при этом значения числа Фруда Fr´ увеличиваются.

Во вторую группу участков вошли заторные участки, занимающие по перечисленным гидравлическим признакам промежуточное положение между участками первого и третьего типов.

К третьему типу относятся участки, где имеют место малые глубины и значительные скорости течения. Заторы на таких участках характеризуются небольшой повторяемостью и продолжительностью. Заторные подъемы уровня здесь невелики, хотя относительные значения их (параметр μ) не меньше, чем на заторных участках других типов.

Таким образом, судя по гидравлическим особенностям речных участков описанных типов, к первому типу относятся в основном устьевые участки рек, а к третьему — горные и полу горные реки.

Первый метод [Жукова М.А., 1978] может быть применен на реках с четко выраженным весенним половодьем. Недостаток метода заключается в том, что соотношение уровней $H_{\bar{Q}_э}$ и $H_{\bar{Q}_{мк}}$ зависит в основном от гидравлических показателей водного потока в расчетном створе, которые могут быть не характерными для всего заторного участка в целом. Согласно схеме расчетов по первому методу всегда $H_{\bar{Q}_{мк}} > H_{\bar{Q}_э}$. Вместе с тем, в устьевых участках крупных рек эти уровни совпадают. Метод дает существенные ошибки при промежуточном положении участков по их типу. Он не учитывает местные ледовые условия вскрытия и пригоден в основном для тех речных участков, где отсутствует значительная пойма.

Во втором методе [Бузин В.А., 2004] предлагается решение, в котором вклад местных факторов заторообразования в формирование максимального заторного уровня оценивается путем выполнения специальных наблюдений в ходе полевых работ, и расчетным методом. При этом интегральным количественным показателем местных факторов служит коэффициент заторности $\eta_з$. Показателем наполнения русла является площадь поперечного сечения русла ω, связь которой с уровнем устанавливается нивелировкой берегов в расчетном створе.

Для расчета площади поперечного сечения русла (в м^2), соответствующей значению максимального заторного уровня $H_{э,p\%}$ рекомендуется формула

$$\omega_{э,p\%} = 2{,}31 k_p \cdot \eta_p \cdot (\bar{Q}_в \cdot n_p)^{0{,}6} \cdot B_{\bar{Q}в}^{0{,}4}, \qquad (10.9)$$

где k_p — коэффициент перехода от среднего значения площади к значению площади заданной вероятности превышения (табл. 10.3), $\eta_з$ — средний за многолет-

ний период коэффициент заторности речного участка, $\overline{Q}_в$ — средний многолетний расход воды на дату вскрытия реки ($м^3/с$), $n_р$ — коэффициент шероховатости русла, $B_{\overline{Q}_в}$ — ширина реки (м) при расходе $\overline{Q}_в$.

Таблица 10.3. Значения переходного коэффициента $k_п$ в формуле (10.9)

$B_{\overline{Q}_в}$, м	p, %						
	0,1	1	2	3	5	10	25
$\eta_э < 20$							
< 500	1,23	1,08	1,02	0,98	0,94	0,86	0,78
500–1000	1,07	1,02	1,00	1,00	0,97	0,95	0,91
$\eta_э = 20–40$							
< 500	1,34	1,12	1,04	0,98	0,93	0,81	0,62
500–1000	1,10	1,04	1,01	0,97	0,96	0,95	0,92
> 1000	1,04	1,01	1,00	1,00	0,99	0,98	0,96
$\eta_э > 40$							
< 500	1,50	1,20	1,08	0,98	0,94	0,82	0,61

Коэффициент заторности рассчитывается по формуле

$$\eta_э = I_{Q_э}^{-0,3} \frac{\omega_э}{\omega_{Q_э}}. \qquad (10.10)$$

Для этого необходимы только данные измерения уровня на временном гидрологическом посту в расчетном створе и оценки заторного расхода воды $Q_э$. Последний оценивается путем измерения скоростей перемещения льдин и расчета модулей стока на соседних реках и речных участках со свободным ото льда руслом на дату максимального заторного уровня. По значению расхода $Q_э$, определенному таким образом, с летней кривой расходов снимается значение уровня $H_{Q_э}$. Этот уровень может быть определен также методом графической срезки. Значения площади поперечного сечения $\omega_э$ устанавливаются по кривой связи ω и H через уровни $H_э$ и $H_{Q_э}$. Коэффициент заторности рассчитывается по формуле (10.10) в конце каждого весеннего сезона, а по окончании всех полевых работ вычисляется его среднее значение, которое и используется в расчете $\omega_{э,p\%}$. Изменение от года к году значений $\eta_э$ на отдельном речном участке находится в диапазоне от –28 до + 28 % $\overline{\eta}_э$. Поэтому коэффициент заторности будет вычислен тем точнее, чем больше период полевых исследований. Среднее многолетнее значение $\eta_э$ изменяется от одного заторного речного участка к другому в пределах от 16 до 61.

Если по каким-либо причинам полевые исследования провести не удается, то расчет коэффициента заторности может быть выполнен с меньшей точностью по эмпирической формуле

$$\overline{\eta}_э = 66300 \Delta I_{\overline{Q}_в} + 8,70 \frac{F}{B_{\overline{Q}_в}^2} + 19, \qquad (10.11)$$

где $\Delta I_{\overline{Q}_в}$ — разность уклонов водной поверхности в пределах ледосборного участка и ниже расчетного створа при расходе $\overline{Q}_в$ в условиях свободной ото льда реки; F — площадь водосбора реки, $км^2$; B — ширина реки в расчетном створе, м.

Исходные данные, необходимые для расчета по формуле (10.11), берутся с карт и из гидрологических справочников.

При оценке средних многолетних расходов воды на дату вскрытия реки могут встретиться следующие ситуации:

Ситуация 1. Пункт, для которого ведется расчет, находится поблизости от створа стационарных гидрометрических наблюдений. Разница в сроках вскрытия реки не превышает 1–2 суток, Ледовые и гидравлические условия протекания водного потока сходные. Тогда для створа гидрологического поста рассчитывается влекущее касательное напряжение водного потока подо льдом, соответствующее среднему многолетнему расходу при вскрытии

$$\tau_{\bar{Q}_в} = \gamma_в I_{\bar{Q}_в}^{0,3} \left[\bar{q}_в n_л \left(1 - \frac{1}{\alpha^{1,5} + 1} \right) \right]^{0,6}, \qquad (10.12)$$

где $\gamma_в$ — удельный вес воды (кН/м^3), α — отношение коэффициента шероховатости нижней поверхности льда ($n_л$) к коэффициенту шероховатости русла ($n_р$), $\bar{q}_в$ — удельный расход воды (м^2/с). Значение напряжения $\tau_{\bar{Q}в}$ переносится в расчетный створ и по кривой связи τ с Q определяется искомый расход воды. Подобная ситуация чаще всего встречается на небольших и средних реках в районах с плотной гидрометрической сетью.

Ситуация 2. Выше и ниже расчетного створа имеются гидрологические посты, но на большом расстоянии от него. Разница в сроках вскрытия превышает двое суток. Тогда, если есть совместные кратковременные наблюдения (в течение двух – четырех лет) в расчетном створе и в створе гидрологического поста (створе — аналоге), то устанавливается переходный коэффициент

$$\kappa_\tau = \frac{\tau_{\bar{Q}_{в,р}}}{\tau_{\bar{Q}_{в,а}}}, \qquad (10.13)$$

который затем используется для расчета $\tau_{\bar{Q}в}$. Если расчетный створ находится между двумя гидрологическими постами, то $\tau_{\bar{Q}в}$ определяется путем интерполяции значений влекущего касательного напряжения, вычисленных по данным этих постов. Описанная ситуация чаще всего имеет место на больших реках.

Ситуация 3. Расход $\bar{Q}_в$ почему–либо невозможно определить способом аналогии по ближайшим створам гидрометрических наблюдений. В этом случае среднее многолетнее значение расхода воды при вскрытии реки определяется по зависимости, координаты которой приведены далее:

$I_{\bar{Q}мк}$	0,00002	0,00005	0,0001	0,0002	0,0005,
$\frac{\bar{Q}_в}{\bar{Q}_{мк}}$	0,489	0,378	0,301	0,201	0,076 .

Эта зависимость определяется тем обстоятельством, что имеет место закономерное увеличение вниз по течению отношения расхода воды при заторе льда к максимальному расходу весеннего половодья. Подобная картина объясняется тем, что волна половодья, продвигаясь с юга на север, (это совпадает с направлением течения большинства рек на заторных участках) встречает на своем пути все более толстый и прочный ледяной покров, для взлома и транспортировки которого необходима все большая удельная энергия водного потока. Самые боль-

шие относительные расходы воды свойственны равнинным рекам со спокойным течением, вскрытие которых происходит после значительного увеличения расхода воды, а, следовательно, скорости течения. Наименьшая водность при заторах льда отмечается на полу горных реках с большими уклонами и скоростями течения воды, присущими этим рекам.

Точность методов характеризуется ошибками расчета уровней, изменяющимися от 5 до 20 % амплитуды колебаний уровней воды. Ошибки расчета объясняются, прежде всего, не учетом местоположения скопления льда относительно расчетного створа. Следует заметить, что при оценке рассмотренных методов расчета, предполагались известными расходы воды $Q_{мк}$, поэтому при практическом использовании методов имеют место дополнительные ошибки за счет неточности определения этих расходов.

11. Определение расчетных уровней воды за безледоставный период для установления границ водоохранных зон и прибрежных защитных полос

11.1. Основные положения, регламентирующие порядок определения границ водоохранных зон и прибрежных защитных полос

В соответствии с Водным кодексом Российской Федерации (Водный кодекс, 2008) **водоохранными зонами (ВЗ)** являются территории, которые примыкают к береговой линии морей, рек, ручьев, каналов, озер, водохранилищ, и на которых устанавливается специальный режим осуществления хозяйственной и иной деятельности в целях предотвращения загрязнения, засорения, заиления указанных водных объектов и истощения их вод, а также сохранения среды обитания водных биологических ресурсов и других объектов животного и растительного мира.

В границах водоохранных зон устанавливаются **прибрежные защитные полосы (ПЗП)**, на территориях которых вводятся дополнительные ограничения хозяйственной и иной деятельности.

Ширина водоохранной зоны морей, рек, ручьев, каналов, озер, водохранилищ и ширина их прибрежной защитной полосы устанавливаются от соответствующей береговой линии. При наличии ливневой канализации и набережных границы прибрежных защитных полос этих водных объектов совпадают с парапетами набережных, ширина водоохранной зоны на таких территориях устанавливается от парапета набережной. При отсутствии набережной ширина водоохранной зоны, прибрежной защитной полосы измеряется от береговой линии

Ширина водоохранной зоны рек или ручьев устанавливается от их истока для рек или ручьев протяженностью:

1) до десяти километров — в размере пятидесяти метров;

2) от десяти до пятидесяти километров — в размере ста метров;

3) от пятидесяти километров и более — в размере двухсот метров.

Для реки, ручья протяженностью менее десяти километров от истока до устья водоохранная зона совпадает с прибрежной защитной полосой. Радиус водоохранной зоны для истоков реки, ручья устанавливается в размере пятидесяти метров.

Ширина водоохранной зоны озера, водохранилища, за исключением озера, расположенного внутри болота, или озера, водохранилища с акваторией менее 0,5 кв. км, устанавливается в размере пятидесяти метров.

Водоохранные зоны рек, их частей, помещенных в закрытые коллекторы, не устанавливаются.

Ширина прибрежной защитной полосы устанавливается в зависимости от уклона берега водного объекта и составляет тридцать метров для обратного или

нулевого уклона, сорок метров для уклона до трех градусов и пятьдесят метров для уклона три и более градуса.

Для расположенных в границах болот проточных и сточных озер и соответствующих водотоков ширина прибрежной защитной полосы устанавливается в размере пятидесяти метров.

Ширина прибрежной защитной полосы озера, водохранилища, имеющих особо ценное рыбохозяйственное значение (места нереста, нагула, зимовки рыб и других водных биологических ресурсов), устанавливается в размере двухсот метров независимо от уклона прилегающих земель.

В границах водоохранных зон запрещается:

1) использование сточных вод для удобрения почв;

2) размещение кладбищ, скотомогильников, мест захоронения отходов производства и потребления, радиоактивных, химических, взрывчатых, токсичных, отравляющих и ядовитых веществ;

3) осуществление авиационных мер по борьбе с вредителями и болезнями растений;

4) движение и стоянка транспортных средств (кроме специальных транспортных средств), за исключением их движения по дорогам и стоянки на дорогах и в специально оборудованных местах, имеющих твердое покрытие.

В границах водоохранных зон допускаются проектирование, размещение, строительство, реконструкция, ввод в эксплуатацию и эксплуатация хозяйственных и иных объектов при условии оборудования таких объектов сооружениями, обеспечивающими охрану водных объектов от загрязнения, засорения и истощения вод в соответствии с водным законодательством и законодательством в области охраны окружающей среды.

В границах прибрежных защитных полос наряду с установленными для водоохранных зон ограничениями запрещается:

1) распашка земель;

2) размещение отвалов размываемых грунтов;

3) выпас сельскохозяйственных животных и организация для них летних лагерей, ванн.

Наряду с водоохранными зонами и прибрежными защитными полосами «Водным кодексом» определяется береговая полоса. **Береговая полоса** — полоса земли вдоль береговой линии водного объекта, предназначенная для общего пользования. Ширина береговой полосы водных объектов общего пользования составляет двадцать метров, за исключением береговой полосы каналов, а также рек и ручьев, протяженность которых от истока до устья не более чем десять километров. Ширина береговой полосы каналов, а также рек и ручьев, протяженность которых от истока до устья не более чем десять километров, составляет пять метров.

Каждый гражданин вправе пользоваться (без использования механических транспортных средств) береговой полосой водных объектов общего пользования для передвижения и пребывания около них, в том числе для осуществления любительского и спортивного рыболовства и причаливания плавучих средств.

В соответствии с «Земельным кодексом Российской Федерации» запрещается приватизация земельных участков в пределах береговой полосы, установленной в соответствии с «Водным кодексом РФ».

Надежное установление границ береговых полос (БП), прибрежных защитных полос (ПЗП) и водоохранных зон (ВЗ) имеет важнейшее значение для обеспечения государственного регулирования хозяйственной и иной деятельности в прибрежных территориях и юридического обоснования решения вопросов землепользования хозяйствующими субъектами и гражданами. При этом «реперо́м», от которого устанавливаются ширины БП, ПЗП и ВЗ является береговая линия водного объекта.

11.2. Методика определения береговой линии водных объектов при отсутствии данных наблюдений

В соответствии с «Водным кодексом РФ» границей реки, ручья, канала, озера, обводненного карьера является береговая линия, определяемая по среднемноголетнему уровню воды в период, когда они не покрыты льдом.

Граница (береговая линия) водохранилища определяется по нормальному подпорному уровню воды (НПУ).

До настоящего времени вопрос установления границы водных объектов (береговой линии) несмотря на то, что «Водный кодекс РФ» введен в действие с 1 января 2007 г., остается открытым. Это объясняется тем обстоятельством, что в практике гидрологических расчетов такая характеристика, как среднемноголетний уровень воды за период, когда они не покрыты льдом, который собственно и является границей водного объекта, не применялась. Соответственно, и в нормативных документах [Свод, 2004], регламентирующих расчеты основных гидрологических характеристик, отсутствуют методы его определения. В связи с этим необходимо разработать методику гидрологических расчетов и определения планового положения береговой линии на водных объектах при отсутствии данных режимных гидрометрических наблюдений.

В случае, когда исследуемая река является в гидрологическом отношении полностью неизученной, т.е. на ней не проводилось наблюдений за водным и ледовым режимами, расчеты выполняются с использованием данных наблюдений по реке-аналогу. Аналог подбирается исходя из условий однородности формирования стока, ледового режима, близкой степени озерности, заболоченности и лесистости. По данным о стоке реки-аналога определяется среднемноголетний расход (слой, модуль стока) за безледоставный период и далее, с учетом соотношения площадей водосборов рассматриваемой реки и реки-аналога, а также региональных зависимостей расхода воды рек от площади водосбора определяется средний многолетний расход воды на заданном участке за период свободного русла. Для определения среднего многолетнего уровня воды необходимо установить кривую связи расходов и уровней воды $Q = f(H)$ в расчетном створе. Для этой цели в расчетном створе исследуемого участка путем проведения полевых гидрологических, геодезических и гидроморфологических работ определяется поперечный профиль, продольный уклон водной поверхности, расходы и уровни воды в период наблюдений.

С использованием полученных данных расчет кривой $Q = f(H)$ в выбранных створах производится по уравнению Шези–Маннинга:

$$Q = \omega C\sqrt{h_{ср} I} = \omega 1/n h_{ср}^{2/3}\sqrt{I}, \qquad (11.1)$$

где Q — расход воды; ω — площадь поперечного сечения; C — коэффициент Шези; $h_{ср.}$ — средняя глубина потока, которая в условиях речных русел используется вместо гидравлического радиуса; I — уклон водной поверхности, n — коэффициент шероховатости.

Далее по рассчитанному среднемноголетнему расходу воды для расчетного створа по зависимости $Q = f(H)$ определяется средний многолетний уровень воды в безледоставный период. *Данные по стоку реки-аналога могут быть использованы также для определения соотношения между средним многолетним расходом воды за период без ледостава и традиционно используемыми в гидрологии его характеристиками, например, среднегодовым расходом воды.* При этом принципиально технология расчетов не меняется.

Рассмотренный выше общий методический подход к определению границы (береговой линии) рек при отсутствии данных наблюдений может уточняться в процессе работ с учетом конкретных особенностей участков рек, для которых требуется определить ВЗ и ПЗП, и их гидрологической изученности, например, наличия данных по постам, которые в настоящее время являются закрытыми.

Установление береговой линии водохранилищ определяется по НПУ. В зависимости от типа водохранилища, характера регулирования стока, его морфометрических особенностей, наличия уровенных наблюдений необходимо построить профиль водной поверхности водохранилища при положении его уровня у плотины, равного НПУ, т.е. должна быть обоснована кривая подпора.

Если в пределах рассматриваемого участка реки отсутствует действующий гидрологический пост, однако он имеется выше или ниже по течению, то расчет среднего уровня за период без ледостава производится для этого поста аналогичным образом, и далее на основе картографических материалов или путем полевых работ выполняется переход от уровня в створе наблюдений к уровням на рассматриваемом участке.

12. Определение зон затопления для уровней воды различной обеспеченности

При картографировании природных явлений невозможно обходиться без географических информационных систем (ГИС) [Бурда Н. Ю.и др., 1998,]. В любой ГИС должны быть предусмотрены три основные функции: база исходных данных, алгоритм решения конкретной задачи, представление результатов расчета. Применительно к задаче картографирования наводнений эти функции можно интерпретировать в следующем виде:

— создание базы исходных данных, включающей как архивные материалы, так и программное обеспечение для их хранения, поиска, дополнения, исправления и предварительной обработки;

— наличие методики определения характеристик затопления на основе комплексного использования авиационной, космической, наземной гидрометрической и картографической информации;

— представление результатов в виде картосхем разливов и таблиц значений характеристик затопления (уровень воды, площадь и локализация затопленных земель).

База данных о наводнениях формируется из следующих основных видов информации:

— общегеографические карты разных масштабов;

— региональные тематические атласы (областные, краевые, республиканские);

— крупномасштабные карты почв и растительности на пойменных территориях;

— административные карты с указанием видов хозяйственных объектов.

— топографические карты масштаба 1:100 000 – 1: 50 000, в зависимости от ширины основного русла реки и размера поймы;

— векторные топографические карты масштаба 1:25000 – 1:2000 на участки застроенной поймы и возможным затоплением этих участков в периоды половодья редкой повторяемости;

— оперативные авиационные и космические снимки территорий в цифровом виде;

— архивные оцифрованные авиационные и космические снимки за предыдущие годы при разной степени затопления поймы;

— архивы среднесуточных или срочных уровней воды в пунктах наблюдений в пределах выбранных участков за многолетний период;

— архивы наивысших уровней и расходов воды в пунктах наблюдений в пределах выбранных участков за многолетний период приведенные к многолетнему периоду;

— архивы обеспеченных значений наивысших уровней и максимальных расходов воды в пунктах наблюдений в пределах выбранных участков за многолетний период;

— продольные профили водной поверхности по данным наблюдений на водомерных постах рассматриваемой территории и другой информации по про-

дольным профилям, включая карты наиболее крупных масштабов и другие источники;

Кроме того, база данных должна предусматривать следующие возможности: совмещение (объединение) различных видов информации на одном географическом пространстве, например, гидрографической, административной и почвенной карт; замена одной информации на другую в выбранной пространственной области, например, замена административной карты малого масштаба на более детальный план крупного масштаба в пределах города и т.д.

Методика оценки затопления пойм, реализуемая с помощью ГИС (рис. 12.1), предназначена для определения следующих характеристик:

— площадь затопленных земель при заданном значении наблюденного уровня воды для принятия оперативных решений, или уровня различной обеспеченности при строительном проектировании и решения многих других вопросов использования и охраны затопляемых площадей пойменных земель;

— ориентировочное значение глубины и объема воды на пойме при наблюденном уровне воды или уровне различной обеспеченности,

— продолжительность затопления (в днях) выбранных территорий,

— общий и дифференцированный ущерб от затопления для различных объектов (жилые и административные здания и постройки, различные виды коммуникаций, промышленные и сельскохозяйственные объекты и т.д.).

Технология картографирования затоплений состоит из следующих операций:

— ввод всех необходимых видов информации в ПК для определения характеристик затопления в течение одного паводка или половодья, а также обеспе-



Рис. 12.1. Общая схема базы данных для картографирования наводнений

ченных их значений, и преобразование всех пространственных данных в единую картографическую проекцию;

— дешифрирование по (авиационным и, или космическим) снимкам затопленной части поймы на основе использования съемок в нескольких спектральных диапазонах, для получения в конечном итоге картосхемы затопленных земель;

— определение по картосхеме гидрологических характеристик затопления (объем, уровень воды, площадь разлива) с использованием цифровой модели рельефа либо на основе многолетних корреляций наземных и космических данных;

— интерполяция картосхем затопления для уровней различной обеспеченности на основе цифровой модели рельефа (с учетом фазы половодья и тенденции изменения уровня воды в русле);

— определение обобщенных гидрологических характеристик затопления за весь период наводнения;

— оценка ущерба от затопления.

Реализация методики пространственной интерполяции с использованием принятой ГИС должна обеспечивать следующие функции:

— построение регрессионных зависимостей между информацией в различных форматах;

— арифметические операции с файлами в растровой структуре (поэлементное сложение, вычитание и т.д.);

— многомерную классификацию на основе нескольких видов информации (например, космическая информация в нескольких спектральных диапазонах) с выделением пространственно распределенных однородных классов;

— построение и анализ одномерных и многомерных распределений различных характеристик наводнений;

— последовательную объектную классификацию, путем вычитания из одной пространственной информации объектов других видов, например, из исходного спутникового изображения вычитание заведомо затопленных (гидрография) и незатопленных (участки, расположенные выше уровня затопления) частей поймы;

— определение областей затопления рельефа с учетом заданных различных значений уровня воды в русле, включая их обеспеченные значения;

— определение интегральных характеристик с учетом весов для каждого элемента растрового формата, например, определение объема затопления всей поймы путем суммирования глубин затопления в каждой ячейке, которые находятся как разность между уровнем воды и отметкой рельефа;

— интерполяция растровых данных в зависимости от задаваемой интерполяционной функции (например, картосхем затопления с учетом изменения уровня воды в русле и фазы паводка);

— определение значения гидрологических характеристик для оконтуренной части области, если известна величина для всей области (например, определение выделенной площади затопления в пределах всего участка поймы, оценка ущерба для части затопленного населенного пункта, если известна общая стоимость ущерба и т.д.).

Вся обработка картографического и аэрокосмического материала проводится на компьютере с применением стандартных программ, например: Photoshop – CS2, MapInfo – 8, Surfer – 8 [Энди Андерсон, 2008; Электронный учебник; Golden Software Surfer].

Методологию и технологию картографирования кратко можно представить в следующем виде.

В первую очередь берется готовая или специально подготавливается цифровая векторная карта на предполагаемую территорию возможного разлива реки или озера. Формируются следующие слои векторной карты:

— реки и озера, острова,

— гидрологические посты и станции,

— урезы воды и отдельные точки с отметками поверхности,

— зеркало водной поверхности при разных отметках (если имеются материалы съёмок при разных уровнях воды),

— рельеф (горизонтали в диапазоне возможного затопления — от межени до отметки заведомо превышающей заданный уровень воды 25%, 10%, 5%, 1%, 0,5%, и, наконец, 0,1 % и даже меньше (0,01%) процентов обеспеченности),

— лесная и кустарниковая растительность,

— населенные пункты (квартальная застройка или отдельные строения),

— авто- и железные дороги.

Необходимо отметить, что в каждом конкретном случае не все перечисленные слои могут быть востребованы, но иногда придется сформировать и дополнительные слои. При векторизации линии уреза необходимо учитывать значения отметок уровня воды.

Преимущество отдаётся материалам аэрокосмических съемок [Усачев В. Ф, 1972], когда удаётся использовать съёмки во всём диапазоне возможного затопления, особенно при наиболее высоких значениях уровня воды. Далее создаются картосхемы затопленных территорий при разных горизонтах воды на дни фактических съёмок. Попутно возникают трудности как с дешифрированием границ водной поверхности (в камышах, кустарниках, различной влаголюбивой растительностью), так и с назначением границ хозяйственных объектов. В частности, нет объективных критериев, позволяющих точно определить положение устьев и истока водных объектов. При цифровом картографировании это очень важно. Поэтому приходится идти на некоторые условности при картографировании границ затопления.

Следует заметить, что публикуемые в справочниках гидрологической изученности и справочниках основных гидрологических характеристик данные следовало бы приводить вместе с картой, по которой они получены (или указывать хотя бы исходные библиографические сведения о них). Только тогда можно говорить о динамике водных объектов в годовом и многолетнем разрезе. Именно поэтому возникает определенное недоверие к традиционным сведениям о площадных и линейных характеристиках, поскольку в них есть очень большой разброс, и не только по причине изменения уровня воды.

Материалы аэрокосмических съёмок при разных уровнях воды к началу работы чаще всего отсутствуют. В таком случае предлагается пойти на использование приёмов имитационного моделирования картографического или топографического материала.

Суть такой методики состоит в том, что границы затопления при разных значениях уровня воды заменяются интерполированными горизонталями. В данном разделе при интерполировании горизонталей используется так называемый метод Кригинга. Математическая основа и некоторые вопросы методики данно-

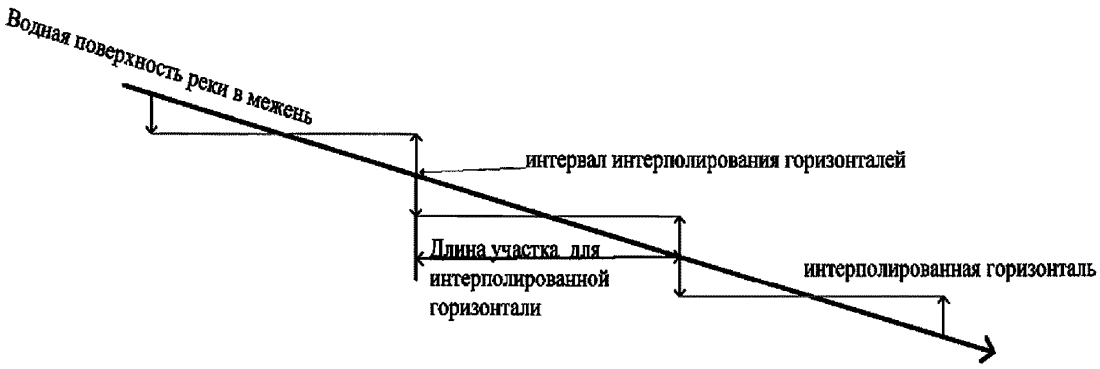

Рис. 12.2. Схема замены наклонной водной поверхности реки в ступенчатый каскад

го метода изложены, с его обоснованием применительно к решению гидрологических задач, в Приложении Д настоящих рекомендаций. Если выбрать незначительный по длине участок реки и принять уровень воды постоянным на этом участке, тогда с достаточной надежностью можно отождествить имеющиеся на карте горизонтали с границами затопления (рис. 12.2).

Длина выбираемого участка зависит от уклона воды и шага, с которым наведены горизонтали на карте или плане местности, т.е. от масштаба имеющейся карты. На картах масштаба 1:25000, как правило, сплошные горизонтали наведены через 5,0 м и пунктирные через 2,5 м; на планах масштаба 1:2000 — сплошные через 1,0 м и пунктирные — через 0,5 м. В общем случае, когда известен уклон водной поверхности расчетного уровня воды заданной обеспеченности, или уровня воды определенного паводка или половодья, тогда можно существенно уточнить и даже расширить наши представления о зонах затопления на больших территориях.

Приложение А
Примеры

А.1. Установление зависимостей параметров распределения годового стока от факторов его обуславливающих

В настоящем примере рассматривается влияние на параметры годового стока (среднее, коэффициенты вариации, асимметрии и автокорреляции) таких факторов как площадь водосбора, залесенность, заболоченность, озерность, а также рассматривается взаимосвязь между параметрами распределения.

Настоящие примеры носят иллюстративный характер и не могут быть непосредственно без предварительного анализа и дополнения исходной гидрологической информации использованы в практике гидрологических расчетов.

Для этих целей была использована гидрометрическая информация и информация по физико-географическим характеристикам водосборов (залесенность, заболоченность, озерность) для районов Севера и Северо-запада Европейской территории России (ЕТР).

Методика построения этих зависимостей следующая [Пространственно-временные, 1988]. Амплитуда колебаний независимой переменной X (залесенность, заболоченность, озерность) разбивалась на несколько интервалов, для которых рассчитывалось ее среднее значение. Для каждого интервала определялись условные параметры распределения зависимой переменной $У$ (среднее, коэффициенты вариации, асимметрии и автокорреляции) для заданных градаций независимой переменной. Таким образом устанавливалась связь условных средних значений зависимой переменной $У$ и независимой переменной X.

Рассматриваемый район включает бассейны рек Балтийского моря, Ладожского и Онежского озер, бассейны рек Онеги, Северной Двины, Мезени и Печеры, относится к зоне избыточного и достаточного увлажнения, характеризуется большим количеством озер и заболоченных территорий. На формирование микроклиматических особенностей сказываются факторы подстилающей поверхности, в частности леса, преимущественно елово-лиственные.

В таблице А.1 приведена оценка параметров распределения годового стока рек Севера и Северо-Запада ЕТР, на основе которой строились и анализировались соответствующие зависимости. Необходимо отметить, что полученные зависимости параметров распределения годового стока от различных факторов в данных примерах являются обобщением по достаточно большому числу водосборов и требуют при расчетах в каждом случае детального анализа и привлечения гидрометрической информации за все годы наблюдения, включая самые последние. Подобные зависимости могут рассчитываться только для естественного стока, не искаженного хозяйственной деятельностью.

Зависимости $\overline{q}=f(A)$ и $C_v=f(A)$, представленные на рисунке А.1 и А.2 (таблица А.1) являются попыткой установить значения предельной минимальной площади водосбора, при которой нивелируется влияние не климатических факторов.

Таблица А.1. Оценка параметров распределения годового стока по градациям площадей рек Севера и Северо-Запада ЕТР

ΔA	N	$\bar{A}$	σ_A	C_{vA}	C_{sA}	$\bar{q}$	$\sigma_{\bar{q}}$	$Cv_{\bar{q}}$	$Cs_{\bar{q}}$	$\overline{C}_v$	σ_{C_v}	C_{vC_v}	C_{sC_v}	$\overline{C}_s$	σ_{C_s}	C_{vC_s}	C_{sC_s}	$\overline{r}(1)$	σ_r	C_{vr}	C_{sr}
0–100	68	34	31	0,92	0,57	8,88	3,72	0,42	0,74	0,34	0,10	0,30	0,11	0,53	0,61	1,14	1,32	0,19	0,25	1,33	–0,08
100–200	26	147	29	0,20	0,41	8,87	2,65	0,30	–0,47	0,36	0,23	0,65	3,47	0,51	1,05	2,05	3,13	0,06	0,27	4,59	0,11
200–300	32	254	32	0,13	–0,02	9,11	3,13	0,34	0,70	0,31	0,11	0,34	2,32	0,43	0,63	1,46	1,02	0,14	0,21	1,50	0,21
300–400	23	349	33	0,09	0,22	9,73	3,12	0,32	1,17	0,27	0,06	0,24	0,61	0,31	0,56	1,81	–0,16	0,07	0,24	3,33	0,52
400–500	22	448	25	0,06	–0,33	9,68	2,41	0,25	0,70	0,29	0,09	0,33	0,86	0,52	0,48	0,92	0,33	0,10	0,28	2,85	0,75
500–600	42	632	75	0,12	0,12	9,31	1,53	0,17	–0,63	0,30	0,13	0,45	4,48	0,45	0,89	1,98	3,38	0,11	0,18	1,62	–0,48
750–1000	35	874	77	0,09	–0,11	9,63	2,16	0,22	0,56	0,27	0,06	0,21	–0,25	0,31	0,45	1,45	0,12	0,10	0,20	2,11	–0,52
1000–1250	31	1123	78	0,07	0,12	9,50	2,47	0,26	–0,06	0,27	0,08	0,28	–0,01	0,38	0,44	1,16	0,04	0,08	0,24	2,99	–1,20
1250–1500	23	1374	82	0,06	0,05	9,37	4,35	0,46	3,57	0,28	0,06	0,22	–0,56	0,45	0,43	0,95	0,51	0,08	0,23	3,02	–0,69
1500–2000	34	1725	146	0,09	0,10	10,3	3,66	0,36	3,76	0,25	0,06	0,25	–0,30	0,42	0,61	1,45	–0,18	0,09	0,21	2,50	–0,52
2000–2500	25	2232	150	0,07	0,23	10,2	3,13	0,31	1,24	0,23	0,06	0,29	0,27	0,28	0,52	1,82	1,08	0,12	0,22	1,92	0,61
2500–3000	15	2847	115	0,04	–1,10	9,69	2,66	0,27	0,64	0,23	0,07	0,29	0,74	0,33	0,47	1,44	0,58	0,02	0,19	7,82	–0,35
3000–3500	10	3206	185	0,06	0,66	8,45	1,89	0,22	0,12	0,24	0,06	0,24	–0,04	0,10	0,48	4,66	0,18	0,16	0,19	1,18	–1,33
3500–4000	10	3726	205	0,06	0,25	11,2	4,56	0,41	2,66	0,22	0,05	0,24	0,73	0,28	0,73	2,57	–0,77	0,09	0,23	2,44	0,58
4000–4500	11	4217	147	0,04	–0,28	12,0	6,05	0,50	3,00	0,20	0,04	0,22	0,28	0,07	0,41	6,28	–0,62	0,00	0,23	282	–0,09
4500–5000	12	4819	166	0,03	–1,15	11,2	4,04	0,36	3,12	0,19	0,04	0,22	0,80	0,16	0,48	3,00	–0,22	0,00	0,18	175	0,06
5000–5500	6	5207	134	0,03	1,88	6,28	3,78	0,60	1,14	0,33	0,09	0,27	0,81	0,69	0,51	0,73	–0,43	0,33	0,22	0,67	0,32
5500–15000	62	8925	2994	0,34	0,54	9,66	4,08	0,42	1,83	0,23	0,07	0,30	0,79	0,26	0,47	1,84	–0,42	0,11	0,22	2,02	–0,29
15000–25000	25	19044	3055	0,16	0,25	8,78	1,86	0,21	–0,20	0,21	0,05	0,25	–0,04	0,44	0,64	1,47	–1,16	0,21	0,21	1,02	–0,67
25000–35000	11	29218	3313	0,11	0,83	10,6	3,51	0,33	1,86	0,21	0,04	0,20	0,33	0,31	0,47	1,49	–0,74	0,15	0,13	0,90	–0,32

Анализ этих зависимостей показывает, что в зоне избыточного увлажнения величина среднего многолетнего модуля стока уменьшается при площадях менее 1000 км^2. Показателем уменьшения среднего стока рек с площадями менее 1000 км^2, возможно, является неполное дренирование подземных вод в пределах своих бассейнов.

Зависимость коэффициентов вариации C_v от площади водосбора характеризуется его уменьшением с увеличением площадей водосбора в данном случае до площадей около 4000 км^2.

Рассмотрим зависимость коэффициентов вариации C_v от водности для исследуемого района, т.е. от модулей среднего годового стока $\bar{q}$ л/с км^2 (Рисунок А.3). Изменение для зоны достаточного увлажнения изменяется от 0,40 до 0,20 при увеличении среднего многолетнего стока от 8,8 л/с км^2 до 12 л/с км^2, т.е. коэффициенты вариации уменьшаются с увеличением водности.

На рисунок А.4 представлена зависимость коэффициента асимметрии C_s от водности района $\bar{q}$ л/с км^2. С увеличением среднего годового стока уменьшается коэффициент асимметрии.

Рассмотрим влияние на годовой сток таких факторов, как залесенность и заболоченность.

Влияние леса на параметры годового стока выражается в том, что с одной стороны он увеличивает испарение через транспирацию, поглощая влагу из почвы; осадки задерживаются на кронах деревьев и увеличивается испарение этих осадков. С другой стороны, растительный покров уменьшает испарение с почвы. Кроме того, лес активно участвует в перераспределении поверхностного и подземного стока вследствие изменения водопроницаемости и шероховатости поверхности водосборов. При построении зависимости $q=f(f_{лес.})$ не было возможным учесть расположение лесов на водосборах, а учитывалось только их количество в процентном отношении к площади водосборов.

Анализ рисунка А5 (таблица А.2) показывает, что с увеличением залесенности водность увеличивается во всем диапазоне. Зависимость не является линейной, угол наклона линии до 50% выше, далее эта зависимость более пологая.

Анализ зависимости коэффициента вариации C_v от залесенности водосборов (Рисунок А.6) показывает, что с увеличением залесенности водосбора значения C_v уменьшаются, что говорит о невелирующем эффекте леса, т.е. в многоводные годы сток накапливается в виде подпочвенной влаги, а в маловодные годы она отдается.

На рисунке А7 представлена зависимость коэффициентов асимметрии от залесенности водосборов. Можно сказать, что для данного района установить такую зависимость не представилось возможным. Это связано с точностью определения коэффициентов асимметрии, которая невелика.

Анализ зависимости характеризующей влияние болот на водность и изменчивость годового стока (Таблица А.3 и рисунки А.8, А.9) показывает, что с увеличением заболоченности средние многолетние модули стока уменьшаются, коэффициенты вариации увеличиваются. Влияние болот неоднозначно. С одной стороны они являются аккумуляторами влаги, конденсируют ее в микропонижениях, растительность на болотах способствует некоторому увеличению осадков по сравнению с открытыми территориями, с другой стороны с заболоченных территорий может происходить более интенсивное испарение по сравнению с открытыми территориями.

Таблица А.2. Оценка параметров распределения годового стока по градациям средних многолетних значений модулей стока рек Севера и Северо-Запада ЕТР

$\Delta\bar{q}$	N	$\bar{q}$	$\sigma_{\bar{q}}$	$Cv_{\bar{q}}$	$Cs_{\bar{q}}$	$\bar{C}_v$	σ_{C_v}	$C_{v_{C_v}}$	$C_{s_{C_v}}$	$\bar{C}_s$	σ_{C_s}	$C_{v_{C_s}}$	$C_{s_{C_s}}$	$\bar{r}(1)$	σ_r	C_{vr}	C_{sr}
2–3	3	2,63	0,23	0,09	–1,36	0,49	0,22	0,44	1,29	0,54	0,48	0,88	1,60	0,46	0,30	0,66	–1,10
3–4	3	3,48	0,27	0,08	–1,39	0,40	0,07	0,17	1,24	0,43	0,65	1,52	1,71	0,28	0,49	1,75	–1,39
5–6	30	5,57	0,26	0,05	–0,28	0,34	0,07	0,21	0,43	0,45	0,40	0,88	1,00	0,27	0,23	0,85	0,15
6–7	40	6,49	0,28	0,04	0,02	0,32	0,06	0,18	0,83	0,30	0,51	1,69	–0,84	0,21	0,18	0,87	–1,80
7–8	56	7,56	0,28	0,04	–0,62	0,30	0,07	0,22	0,94	0,32	0,62	1,94	0,10	0,14	0,22	1,59	–0,47
8–9	100	8,53	0,31	0,04	0,12	0,27	0,07	0,26	0,62	0,37	0,54	1,45	–0,34	0,10	0,25	2,39	–0,31
9–10	98	9,49	0,31	0,03	–0,08	0,25	0,07	0,28	0,95	0,37	0,52	1,43	0,17	0,12	0,20	1,67	–0,10
10–15	169	11,32	1,11	0,10	0,10	0,24	0,13	0,53	5,42	0,42	0,73	1,76	3,30	0,06	0,21	3,53	–0,19
15–20	22	16,99	1,62	0,10	0,50	0,18	0,04	0,20	1,10	0,27	0,13	1,58	–0,20	0,01	0,23	19,6	0,48
20–25	3	23,54	0,14	0,01	–19,4	0,20	0,07	0,38	1,70	0,59	0,26	0,44	–1,05	0,14	0,39	2,78	1,72

Таблица А.3. Оценка параметров распределения по градациям коэффициента вариации годового стока рек Севера и Северо-Запада ЕТР

ΔCv	N	$\bar{C}_v$	σ_{C_v}	$C_{v_{C_v}}$	$C_{s_{C_v}}$	$\bar{C}_s$	σ_{C_s}	$C_{v_{C_s}}$	$C_{s_{C_s}}$	$\bar{r}(1)$	σ_r	C_{vr}	C_{sr}
0,1–0,2	137	0,17	0,02	0,13	–0,56	0,23	0,48	2,12	0,08	0,03	0,25	8,85	0,23
0,2–0,3	242	0,25	0,03	0,11	–0,29	0,30	0,48	1,60	–0,28	0,12	0,20	1,75	–0,27
0,3–0,4	125	0,34	0,03	0,08	0,29	0,52	0,51	1,00	0,06	0,16	0,21	1,29	–0,45
0,4–0,5	19	0,45	0,03	0,07	0,49	0,92	0,81	0,89	1,16	0,25	0,25	1,02	–0,10
0,5–0,6	7	0,54	0,02	0,03	0,99	0,82	0,53	0,65	–0,17	0,25	0,21	0,82	1,27

Таблица А.4. Оценка параметров распределения по градациям залесенности рек Севера и Северо-запада ЕТР

$\Delta f_{лес}$	$\Delta\bar{f}_{лес}$	N	$\bar{q}$	$\sigma_{\bar{q}}$	$Cs_{\bar{q}}$	$\bar{C}_v$	σ_{C_v}	$C_{s_{C_v}}$	$\bar{C}_s$	σ_{C_s}	$C_{s_{C_s}}$	$\bar{r}(1)$	σ_r	C_{sr}
0–5	3,17	6	10,50	1,58	0,03	0,26	0,09	0,04	0,20	0,35	–0,27	0,16	0,24	0,34
5–10	8,43	7	10,61	5,57	0,61	0,30	0,10	–0,62	0,31	0,38	–0,69	0,08	0,21	–0,77
20–25	23,29	7	6,43	2,64	0,46	0,37	0,17	1,82	0,38	0,20	–0,11	0,13	0,31	1,07
25–40	33,63	38	7,37	3,71	2,76	0,34	0,08	0,31	0,47	0,51	0,46	0,21	0,22	0,12
40–55	49,91	35	9,01	4,42	3,43	0,30	0,07	–0,61	0,33	0,42	1,31	0,16	0,23	–0,45
55–70	63,1	104	9,40	4,18	2,78	0,28	0,07	1,02	0,48	0,55	0,42	0,21	0,21	–0,48
70–85	78,42	151	9,75	2,17	1,09	0,29	0,13	5,35	0,42	0,71	3,51	0,10	0,19	–0,19
85–100	91,84	147	10,27	2,21	1,36	0,22	0,07	1,68	0,30	0,61	0,69	1,26	1,66	3,53

Таблица А.5. Оценка параметров распределения по градациям заболоченности рек Севера и Северо-запада ЕТР

$\Delta f_б$	N	$\Delta\bar{f}_б$	$\sigma_{f_б}$	$C_{v_{f_б}}$	$C_{sf_б}$	$\bar{q}$	$\sigma_{\bar{q}}$	$Cv_{\bar{q}}$	$Cs_{\bar{q}}$	$\bar{C}_v$	σ_{C_v}	$C_{v_{C_v}}$	$C_{s_{C_v}}$	$\bar{C}_s$	σ_{C_s}	$C_{v_{C_s}}$	$C_{s_{C_s}}$	$\bar{r}(1)$	σ_r	C_{vr}	C_{sr}
10–20	92	14,9	2,81	0,19	0,39	9,72	2,78	0,29	3,30	0,27	0,11	0,40	4,10	0,41	0,65	1,58	4,16	0,12	0,21	1,87	–0,54
20–30	32	25,1	2,58	0,10	–0,30	9,37	2,63	0,29	0,27	0,29	0,08	0,27	1,08	0,35	0,36	1,01	0,33	0,06	0,18	2,76	–0,48
30–40	13	36,5	3,43	0,09	–0,67	9,00	2,66	0,30	–1,31	0,31	0,15	0,49	1,98	0,45	0,78	1,73	0,89	0,08	0,29	3,44	0,84
40–50	6	44,2	3,43	0,08	1,03	8,44	2,77	0,33	–1,74	0,28	0,09	0,34	–0,28	0,49	0,77	1,59	2,20	–0,08	0,16	–1,85	0,08
50–60	3	55,3	2,08	0,04	–1,42	9,41	0,80	0,09	–0,86	0,29	0,06	0,20	–1,57	0,33	0,31	0,96	–1,48	–0,07	0,28	–4,29	–1,43

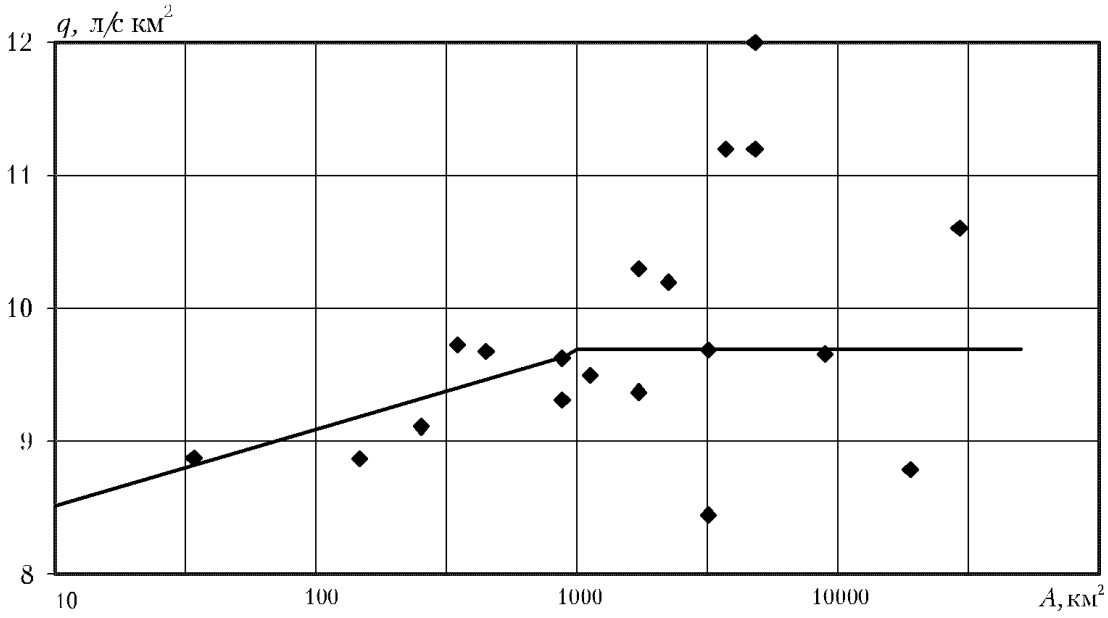

Рис. А.1. Зависимость средних многолетних модулей годового стока от площадей водосборов рек Северо-запада и Севера России

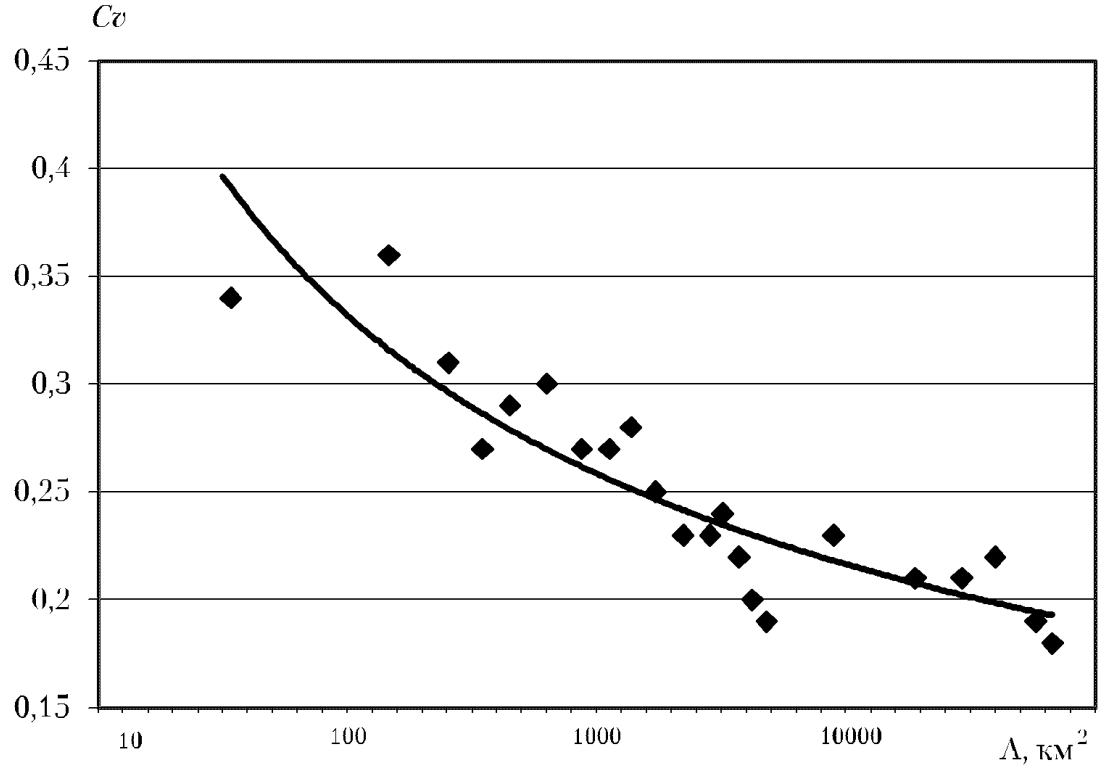

Рис. А.2. Зависимость коэффициентов вариации годового стока от площадей водосборов рек Северо-запада и Севера России

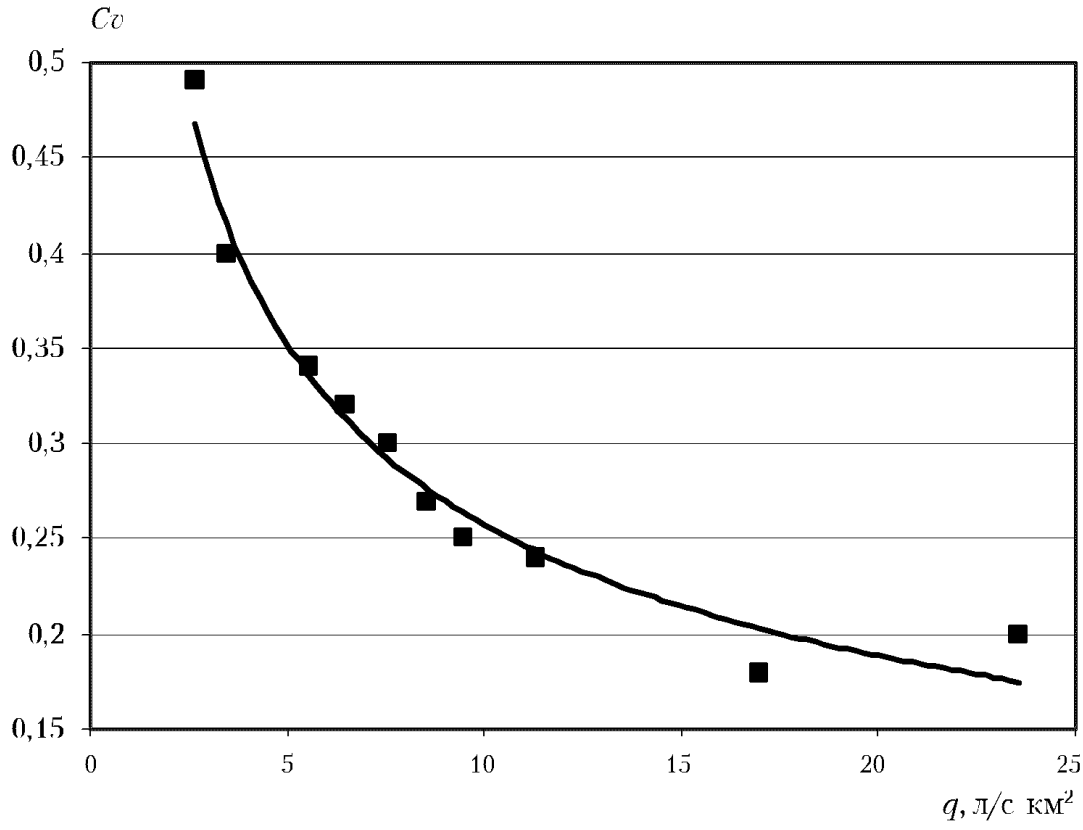

Рис. А.3. Зависимость коэффициентов вариации от средних многолетних значений модулей годового стока рек Северо-запада и Севера ЕТР

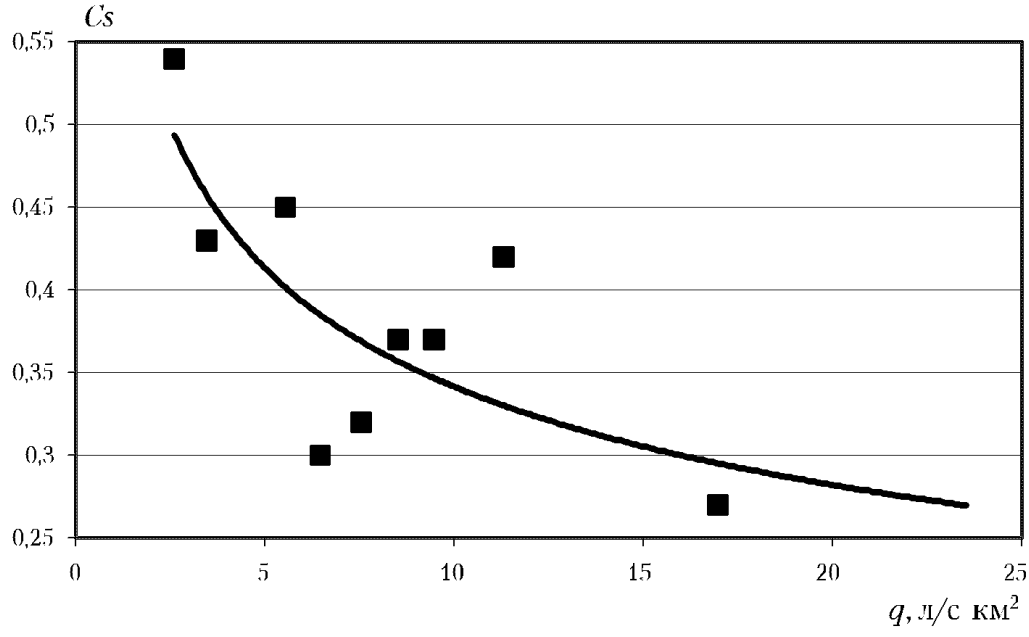

Рис. А.4. Зависимость коэффициентов асимметрии от средних многолетних значений модулей годового стока рек Северо-запада и Севера ЕТР

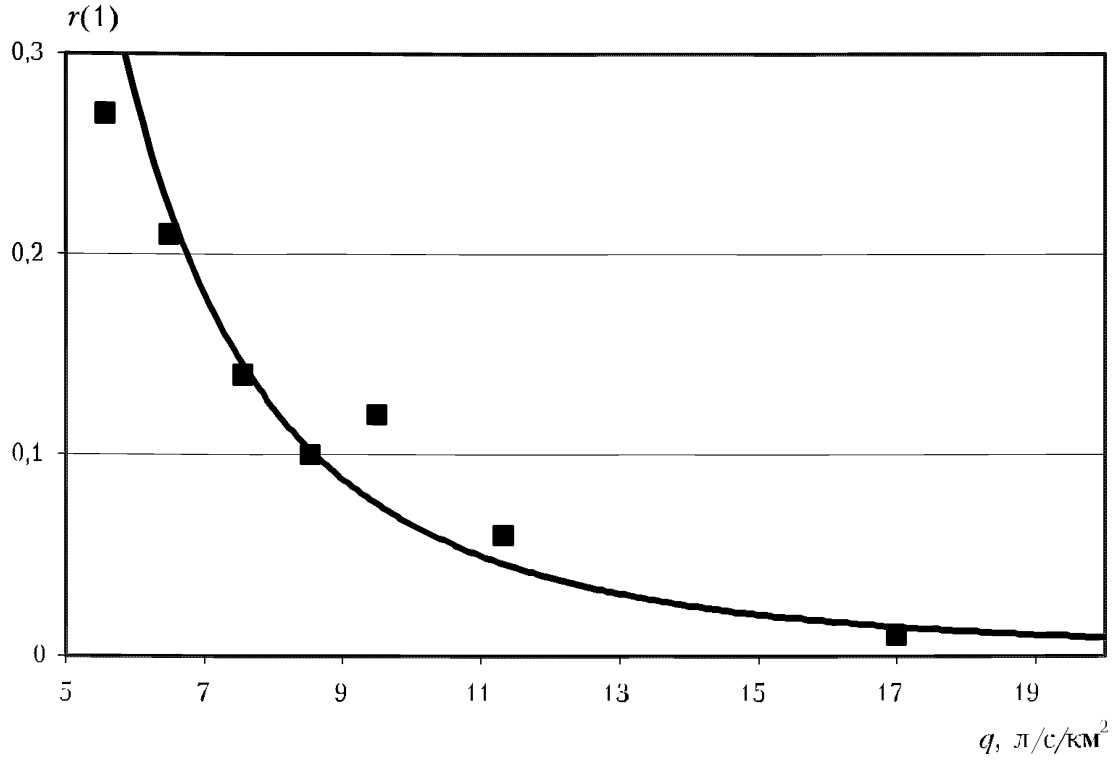

Рис. А.5. Зависимость коэффициентов автокорреляции от средних многолетних значений модулей годового стока рек Северо-запада и Севера ЕТР

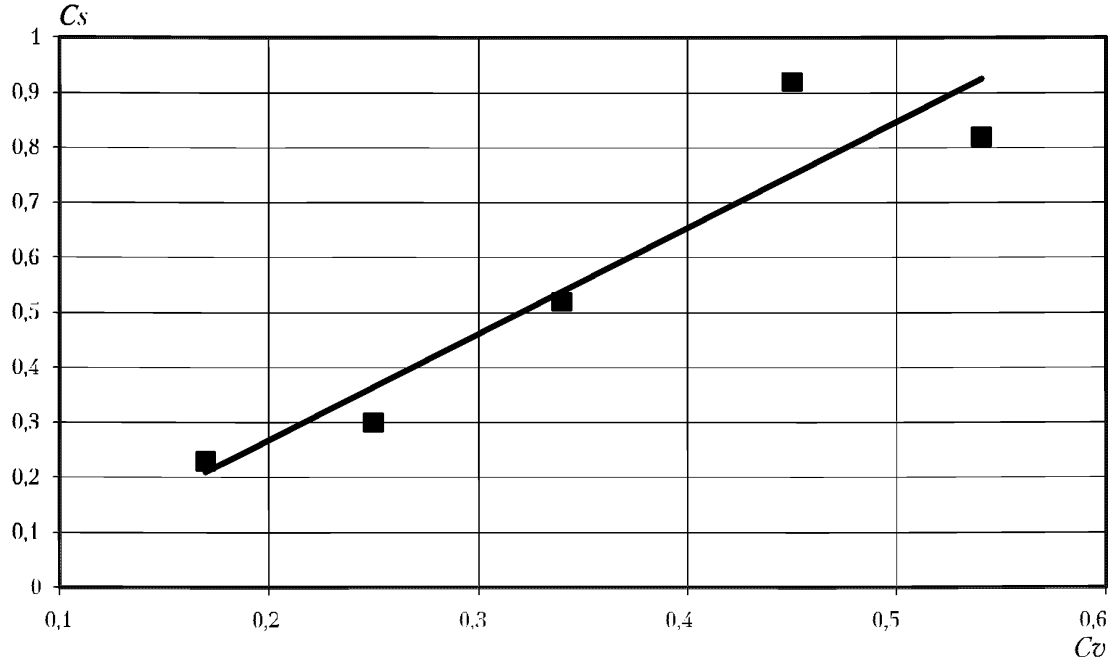

Рис. А.6. Зависимость коэффициентов асимметрии от коэффициентов вариации годового стока рек Северо-запада и Севера ЕТР

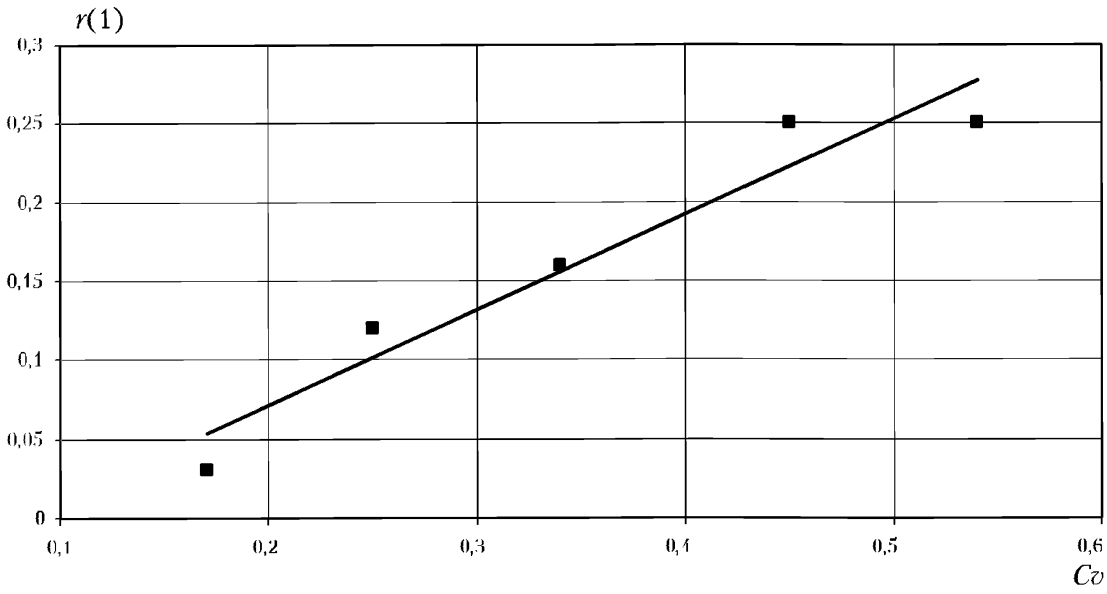

Рис. А.7. Зависимость коэффициентов автокорреляции от коэффициентов вариации годового стока рек Северо-запада и Севера ЕТР

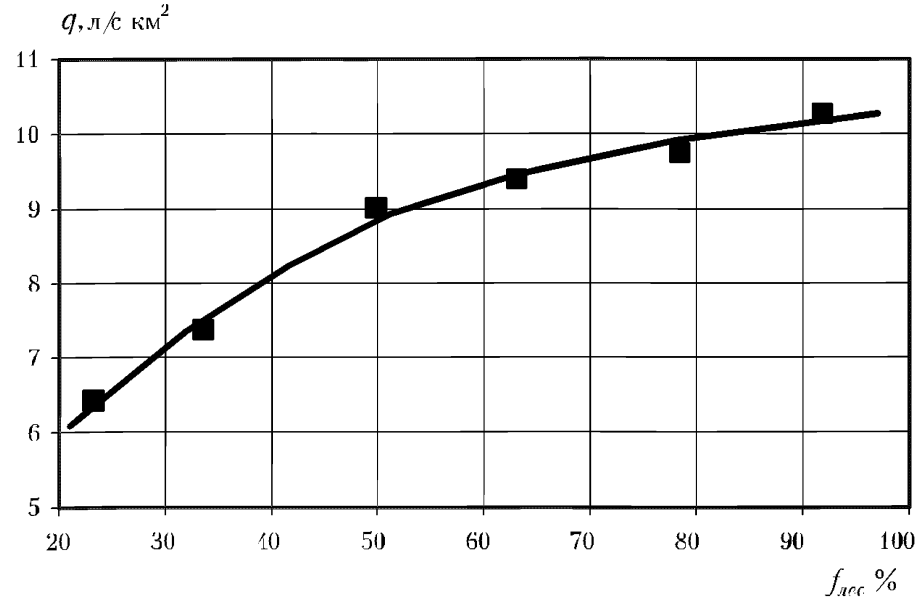

Рис. А.8. Зависимость средних многолетних модулей годового стока от залесенности водосборов рек Северо-запада и Севера ЕТР

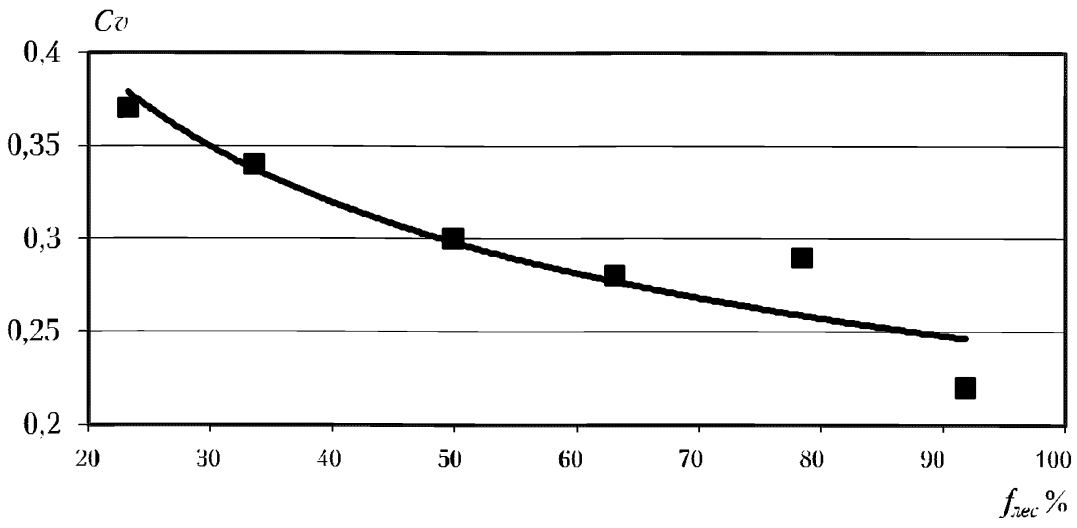

Рис. А.9. Зависимость коэффициентов вариации годового стока от залесенности водосборов рек Северо-запада и Севера ЕТР

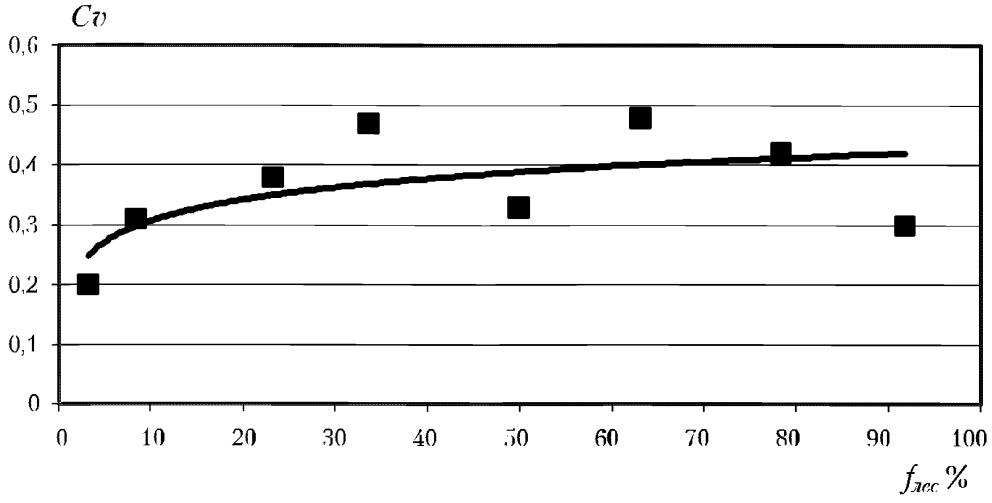

Рис. А.10. Зависимость коэффициентов асимметрии от залесенности водосборов рек Севера и Северо-запада ЕТР

Необходимо отметить, что полученные зависимости носят скорее исследовательский и методический характер, и при практических гидрологических расчетах и расчет подобных зависимостей должен базироваться на исходной гидрометрической информации за весь период наблюдений, включая последние годы наблюдений, а также современной гидроморфологической информации по бассейнам рек.

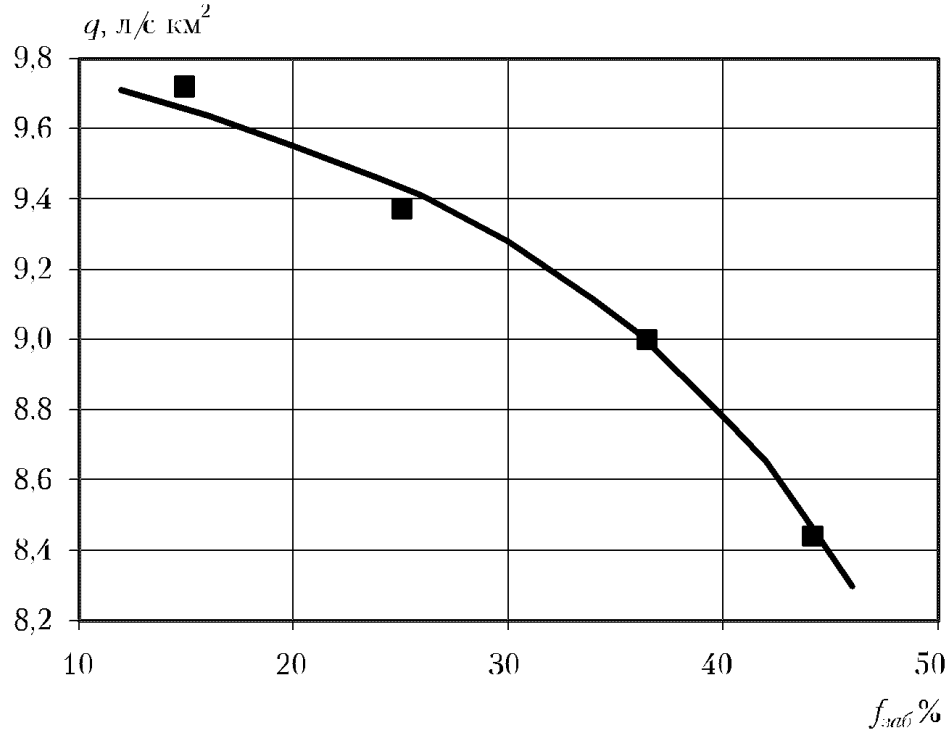

Рис. А.11. Зависимость средних многолетних модулей годового стока от заболоченности водосборов рек Севера и Северо-запада ЕТР

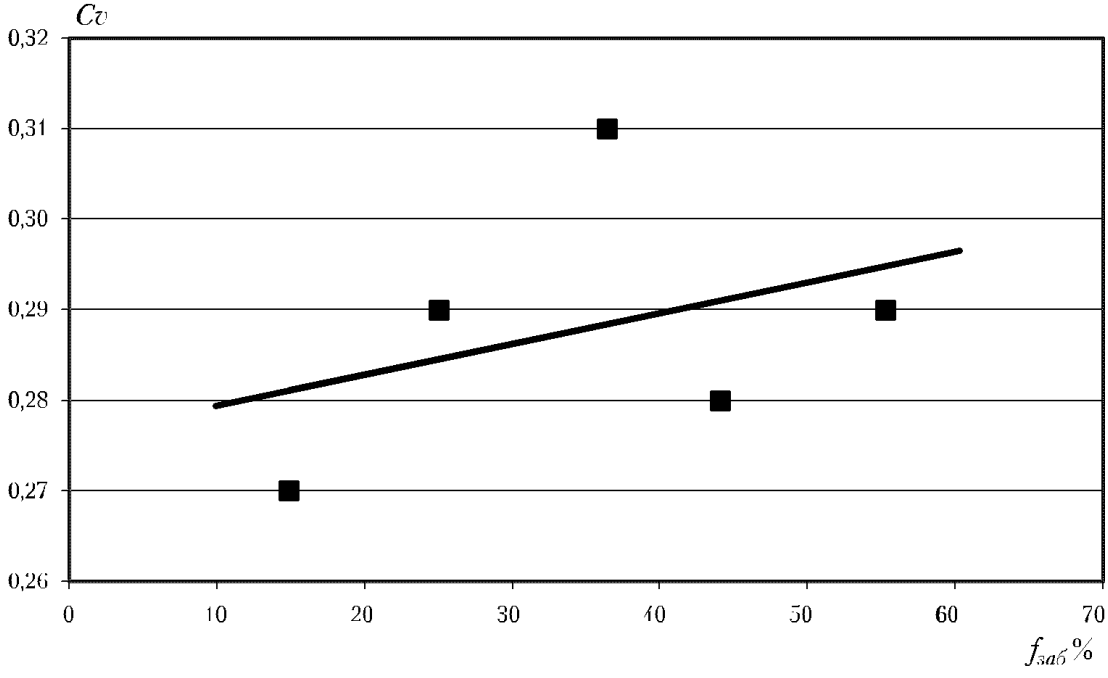

Рис. А.12. Зависимость коэффициентов вариации Cv от заболоченности водосборов рек Севера и Северо-запада ЕТР

А.2. Расчет годового стока и его параметров распределения по годичным картам

Методика апробирована на годовом стоке рек Верхней Оки. На карту масштаба 1:2,5 млн. были нанесены значения годового стока, приведенные к многолетнему периоду, по всем постам этого района с 1882 по 1988 годы. За каждый год были построены карты годового стока. Методика была апробирована для двух пунктов (р. Орлица — с. Б. Рог, F=96 км^2, р. Ока — г. Калуга, F=54900 км^2), которые были исключены при построении карт. Для р. Орлица — с. Б. Рог были восстановлены значения годового стока с 1947 по 1988 год. Относительные погрешности расчета стока за каждый год изменялись от 0,2 до 35,3%. По ряду восстановленных погодичных значений стока рассчитаны параметры распределения ряда (среднее значение, коэффициент вариации), Относительная погрешность расчета этих параметров соответственно равна 7,3% и 12,0%. Таким же образом восстановлены годичные значения и рассчитаны параметры распределения годового стока р. Ока — г. Калуга, сток по которому восстановлен с 1882 по 1988 год. Погрешности восстановления годичных значений стока изменяются от 0,3 до 37,4%, а погрешности расчета среднего значения и коэффициента вариации соответственно равны 5,1% и 11,6%. Так как коэффициент асимметрии по ряду считается с большими погрешностями, отношение коэффициента асимметрий к коэффициенту вариации определяется по рекам-аналогам.

А.3. Расчет годового стока по трем постам наблюдений на основе пространственной интерполяции

Рассмотрим численный пример интерполяции по трем точкам, алгоритм которого реализован на персональном компьютере.

В бассейне р.Туры выбраны три пункта наблюдений: р. Юрья — д. Шумкова, р. Тагил — д. Малыгина, р. Синячиха — с. Ясашная с условныыи координатами соответственно X_1, — 103,400 Y_1 = 101,300; X_2 = 102,000; Y_2 =103,800; X_3=102,700 $У_3$ = 99,200, которые являются аналогами при последующих расчетах.

Пункт наблюдений и пункты — аналоги выбраны с таким расчетом, чтобы пункт наблюдений находился внутри треугольника, образованного пунктами — аналогами. Эти условия необходимы для получения достаточно точных характеристик при пространственной интерполяции, используемой в методике.

В качестве расчетного выбран пункт р. Выя — с. Соликами Вила, продолжительность наблюдении в котором равна 25. лет. В пунктах — аналогах число лет соответственно равно 14, 41, 21. Так как настоящая работа выполнялась для проверки методики, при выборе расчетного пункта и пунктов-аналогов играла роль не продолжительность наблюдений, а их пространственное расположение.

Пространственная интерполяция осуществлялась в створе р. Выя — с. Соликами Вила с центром тяжести водосбора с условными координатами X=102,700 и У =101,400, в котором имелись наблюдения за годовым стоком реки, что позволило оценить качество произведенной интерполяции. Интерполированные значения стока неплохо согласуются с наблюденными данными.

Среднее значение, рассчитанное по интерполируемому ряду, равно 4,90 л/с км^2 по наблюденному ряду равно 5,05 л/с км^2 . Погрешность расчета составила около 3%, что не требует дополнительных пояснений. Коэффициент вариации по интерполируемым значениям оказался ниже коэффициента вариации исходных данных примерно на 30%.

Таким образом, приведенные расчеты свидетельствуют о том, что пространственная интерполяция годичных значений стока — перспективная область исследований, которая предусматривает достаточное программное обеспечение, позволяющее выполнять исследования и анализ получаемой в результате интерполяции информации.

Перечисленные методы расчета применимы для естественных условий формирования стока. В случаях, когда известны количественные изменения годового стека под влиянием хозяйственной деятельности, например, заборы или сбросы за каждый год, сток необходимо привести к естественным условиям, а затем использовать восстановленные значения стока при построении карт или эмпирических зависимостей.

А.4. Расчет рядов годового стока методом оптимальной линейной интерполяции

В практике гидрологических расчетов часто возникает необходимость получения данных по стоку при отсутствии наблюдений. Эта задача может быть решена на базе метода множественной линейной корреляции с привлечением аппарата оптимальной линейной интерполяции. [Алексеев Г.А., 1971; Лобанова А.Г., 1973] В качестве примера рассмотрим интерполяцию между тремя пунктами наблюдений (р. Ухлясть — п. Радьков, р. Вихра — с. Куровичи, р. Остер — с. Ходунь) в точку с имеющимися данными (р. Сож — г. Славгород). последние данные использованы лишь для сопоставления восстановленных данных с наблюденными.

Проверка однородности годового стока указанных пунктов произведена с использованием критерия Фишера для дисперсий и критерия Стьдента для средних значением с уровнем значимости 5 %.

Убедившись в однородности исходных данных, определяем среднее и дисперсию для р. Сож — г. Славгород.

$$\bar{q}_0 = \frac{\sum_1^n q_i n_i}{\sum_1^n n_i} = \frac{q_1 n + q_2 n_2 + ... + q_i n_i}{n_1 + n_2 + ... + n_i} = 5{,}74 \text{ л/с км}^2,$$

$$\sigma_0^2 = \frac{\sum_1^k \sigma_i^2}{k} + \frac{\sum_1^k (q_i - \bar{q}_0)^2}{k} = 1{,}72 \text{ л/с км}^2,$$

Используя пространственную корреляционную функцию, среднее значение и дисперсию для данного района, составляем уравнение множественной линейной регрессии:

$$q_0 = 0{,}239q_1 + 0{,}418q_2 + 0{,}313q_3 = 0{,}173$$

Все коэффициенты регрессии в данном уравнении превышают их удвоенную среднюю квадратическую погрешность.

Множественный коэффициент корреляции равен R=0,938, ошибка интерполяции в искомую точку равна $\sigma_{y_0} = \sqrt{1-R^2} = 0{,}347$

По полученному уравнению рассчитан годовой сток р. Сож у г. Славгорода. На рисунке А.13 показан совмещенный график восстановленных и наблюденных значений годового стока.

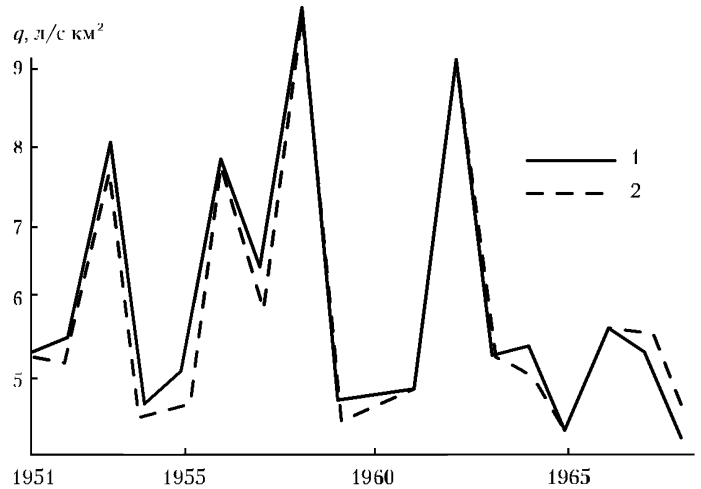

Рис. А.13. Хронологический график хода годового стока
р. Сож — г.Славгород по 1 — наблюденным данным, 2 — по восстановленным данным

Колебания годового стока по восстановленным и наблюденным данным близки.

Таким образом, возможно применение методики восстановления с применением аппарата множественной линейной регрессии для восстановления значений стока за конкретные годы.

А.5. Расчет максимальных, средних годовых, минимальных летних и зимних расходов и уровней воды по интерполяции по длине реки при отсутствии наблюдений в пункте исследования р. Обь — д. Медведево

В качестве примера расчета перечисленных характеристик рассматривается определение расчетных параметров и характеристик уровней и расходов воды на участке подводного перехода нефтепровода (ППН) Александровское – Анжеро – Судженск (ААС) через р. Обь у д. Медведево.

Стационарные гидрометрические наблюдения в этом створе не проводились, имеются лишь единичные измерения уровней и расходов воды, выполненные в 1986 и 1994 годах.

Для определения расчетных гидрологических характеристик на исследуемом участке р. Оби у д.Медведево, где проходит трасса нефтепровода, были использованы наблюдения за максимальными, средними годовыми, минимальными летними и зимними уровнями и расходами воды по гидрометрическим постам, имеющим наиболее длительные наблюдения, сведения по которым приведены в таблице А.6.

Таблица А.6. Сведения о гидрологических постах

Код поста по ГВК	Река-пункт	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Отметка нуля графика, м БС	Наблюдения за уровнем (Н), стоком (Q)	Период наблюдения
10021	р. Обь — г. Колпашево	2422	486 000	52,87	H/Q	1914–1993
10023	р. Обь — д. Прохоркино	2024	738 000	38,33	H/Q	1959–1993
10024	р. Обь — с. Александровское	1830	765 000	32,36	H	1894–1993
	р. Обь — д. Медведево	1780	769 000		Единичные измерения	1986, 1994
10025	р. Обь — г. Нижневартовск	1710	853 000	29,98	H	1972–1993
10026	р. Обь — г. Сургут	1502	928 000	26,02	H	1893–1993
10031	р. Обь — с. Белогорье	1152	2 160 000	16,07	H/Q	1919–1962
10041	р. Обь — г. Новосибирск	2963	252 000	-	H/Q	1897–1962
10011	р. Обь — Новосибирская ГЭС	2986	232 000	-	Q	1958–1987
10010	р. Обь — г. Камень-на Оби	3168	216 000	109,57	H/Q	1894–1987
10006	р. Обь — г. Барнаул	3430	169 000	127,89	H/Q	1894–1987
10331	р. Чулым — пгт. Батурино (пгт. Коммунарка)	136	131 000	71,25	H/Q	1936, 1938–1987
10252	р. Томь — г.Томск	68	58 700	-	H/Q	1918–1987

Необходимо отметить, что водный режим исследуемого участка р. Обь носит сложный характер, основной его фазой является весеннее половодье, в период которого проходит 60-90% годового стока, а также наблюдаются максимальные расходы и уровни воды.

После прохождения половодья устанавливается летне — осенняя межень (с июня по октябрь). Зимняя межень на реках рассматриваемого района устанавливается в конце октября — начале ноября и продолжается до начала подъема половодья в конце апреля — начале мая.

«Уровенный режим в общих чертах согласуется с режимом речного стока. Соответствие между уровнями и расходами нарушается в период весеннего и осеннего ледохода, а также в период ледостава, когда изменение уровней не всегда зависит от колебаний водности воды». [Ресурсы, 1972]

Наиболее близко расположенными к д. Медведево постами являются: уровенный пост в с. Александровское и гидрометрический створ (расходный и уровенный пост) в д. Прохоркино, находящиеся соответственно в 50 км и в

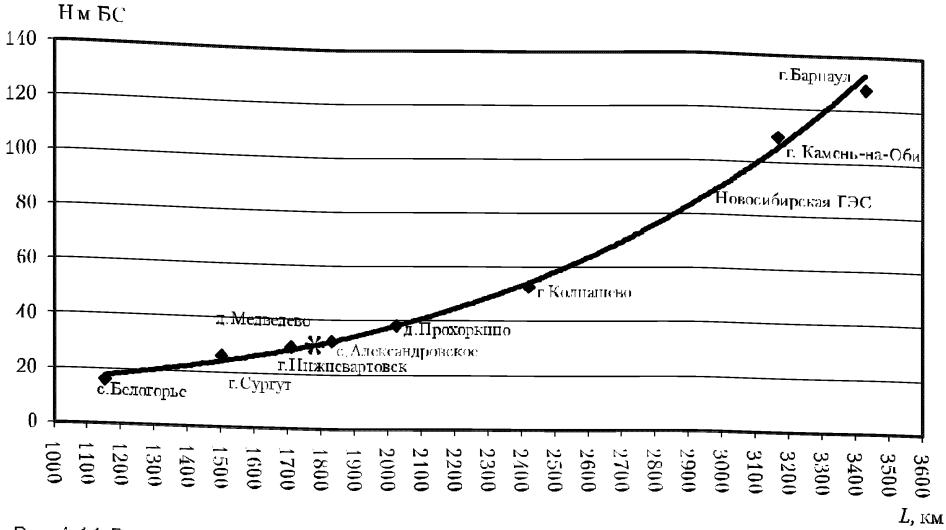

Рис. А.14. Расположение пунктов наблюдения по р. Обь с учетом высоты пункта наблюдений в БС
✻ — место нахождения д. Медведево

244 км выше по течению р. Оби, а также пост в г. Нижневартовске, в 69 км ниже перехода.

В таблице А.6 даны сведения о водомерных постах и гидрометрических створах, расположенных в большем отдалении от д. Медведево, но необходимых для анализа исходной гидрометрической информации в исследуемом районе, для приведения рядов гидрологических наблюдений к многолетнему периоду и для более надежного решения поставленных задач. На рисунке показано расположение постов по р. Обь в зависимости от высоты водомерных постов в БС.

Сведения об уровнях и расходах воды до 1987 г. собраны из режимных и справочных гидрологических изданий, а за 1988-1993 годы получены из Сибречпроекта (г. Новосибирск).

А 5.1. Анализ исходной гидрометрической информации

Для восстановления рядов уровней и расходов воды (средних годовых, максимальных, минимальных летних и зимних) в п. Медведево собрана и проанализирована исходная гидрометрическая информация по постам: д. Прохоркино, с. Александровское, г. Нижневартовск и г. Сургут. Наиболее длительный ряд наблюдений за уровнями воды имеется по г. Сургут (1894–1993 гг.).

По всем пунктам наблюдений построены и проанализированы хронологические графики этих характеристик.

В 1956 г. у г. Новосибирска сооружена ГЭС. В результате подпора реки Оби 18-метровой плотиной создано Новосибирское водохранилище.

В справочнике [Ресурсы, 1972] указывается, что «плотина Новосибирской ГЭС в период половодья не оказывает существенного влияния на уроненный режим р. Оби, а в меженный период регулирующее ее действие прослеживается на участке от нижнего бьефа до с. Кругликово».

Проведен анализ влияния Новосибирской ГЭС на уровенный и стоковый режим в районе д.Медведево. Установлено, что хотя ГЭС и оказывает влияние на срезку максимальных весенних и увеличение зимних расходов воды, но это влияние практически не сказывается в рассматриваемом пункте Медведево, что соответствует выводам [Ресурсы, 1972].

А 5.2. Приведение рядов расходов и уровней воды к многолетнему периоду в пунктах гидрометрических наблюдений

Для восстановления рядов стока воды (максимального, среднего годового, минимального зимнего и летнего) в пункте Медведево осуществлено приведение к многолетнему периоду рядов в пунктах: г. Колпашево, д. Прохоркино, с. Белогорье по методике, рекомендуемой в Методических рекомендациях [Рекомендации, 1979; Методические, 2007] и Своде правил [Свод, 2004] с привлечением пунктов-аналогов г. Колпашево и с. Белогорье. Были восстановлены значения стока за каждый год за пределами наблюдений по всем характеристикам стока. Средние квадратические погрешности восстановления значений стока за каждый год не превышают 5–10%. Наиболее низкая точность восстановления значений стока характерна для минимальных зимних расходов воды.

Подобным образом были приведены к многолетнему периоду и уровенные ряды (средние годовые, максимальные и минимальные за зимний и летний периоды) по аналогам : с. Александровское, г. Нижневартовск и г. Сургут, которые в дальнейшем использованы для восстановления уровней в д. Медведево.

Точность восстановления годовых значений уровней достаточно велика, и средняя квадратическая погрешность восстановленных значений в основном не превышает 5–10%.

А 5.3. Анализ однородности и стационарности стоковых и уровенных рядов

Для дальнейшего использования в расчетах уровней и расходов воды в исследуемом пункте д. Медведево с привлечением рядов-аналогов был проведен анализ однородности и стационарности этих рядов-аналогов согласно рекомендаций [Рекомендации, 1984; Свод, 2004]. Анализ однородности был осуществлен для четырех характеристик стока и уровней (максимальных, средних годовых и минимальных зимних и летних значений) в пунктах на р.Оби: г. Колпашево, д. Прохоркино, с. Белогорье (для анализа данных по расходам воды) и д. Прохоркино, д. Александровское, г. Нижневартовск и г. Сургут (для анализа данных по уровням воды) по рядам, приведенным к многолетнему периоду.

Анализ однородности и стационарности проводился на основе статистических критериев, обобщенных для таких особенностей гидрологической информации, как наличие асимметрии и внутрирядной связанности [Рекомендации, 1984; Свод, 2004].

Для применения обобщенных статистических критериев были определены значения коэффициентов автокорреляции ($r(1)$) и асимметрии (C_s) путем осреднения, их значения равны: $r(1)$=0,37, C_s= 0,27 – для годового стока, $r(1)$=0,37,

C_s= 1,59 — для максимальных расходов воды весеннего половодья, $r(1)$=0,0, C_s= 0,49 — для минимальных расходов летней межени и $r(1)$=0,47, C_s= 0,66 — для минимальных расходов зимней межени. Таким образом, результаты оценки однородности позволили сделать вывод об однородности практически всех характеристик расходов воды, в небольшом числе случаев неоднородность обуславливается естественными причинами.

Анализ стационарности многолетних рядов четырех разных характеристик расходов воды осуществлялся по критериям Стьюдента и Фишера. При этом, стационарность средних значений двух частей временного ряда определялась по критерию Фишера в соответствии с рекомендациями [Рекомендации, 1984; Свод, 2004]. В связи с тем, что основной причиной, которая может привести к нестационарности, является регулирование стока водохранилищем Новосибирской ГЭС с 1957 г. разделение ряда на две подвыборки осуществлялась по этой дате, т.е. первая подвыборка формировалась с начала наблюдений по 1956 г., а вторая — с 1957 г. по 1993 г. Оценка стационарности средних и дисперсий по двум частям временных рядов осуществлялась для тех же четырех выбранных стоковых характеристик для трех рядов наблюдений по р. Оби и при заданном уровне значимости α =5%.

Выявлено уменьшение максимальных расходов воды и их дисперсии, начиная с 50-х годов и соответствующее увеличение минимального зимнего стока, т.е. проявляется регулирующее влияние Новосибирской ГЭС.

Установлено, что хотя ГЭС и оказывает влияние на срезку максимальных весенних и увеличение минимальных зимних расходов воды, но это влияние практически не сказывается в рассматриваемом пункте Медведево, что соответствует выводам, приведенным в [Ресурсах, 1972]

Результаты оценки стационарности свидетельствуют, что ряды средних годовых и минимальных летних расходов воды можно принять стационарными с высокой степенью достоверности.

А 5.4. Восстановление рядов стока и расчет параметров и кривых распределения расходов воды на участке подводного перехода (р. Обь — д. Медведево)

Восстановление расходов воды в створе р. Обь — д.Медведево осуществлялось путем интерполяции расходов воды по длине реки по данным за каждый год наблюдений или по восстановленным значениям стока за годы, когда наблюдения отсутствовали, по створам р. Обь — г. Колпашево, р. Обь-д. Прохоркино и р. Обь — с. Белогорье.

Алгоритм интерполяции достаточно прост. По имеющимся данным по расходам воды строятся или рассчитываются зависимости расходов воды (максимальных, средних годовых, минимальных) от приращения площадей A водосбора по длине реки Оби.

За начальную точку отсчета брался створ г. Колпашево. Приращение площадей водосбора от г. Колпашево до д. Прохоркино составило ΔA = 252 000 км^2, до д. Медведево — ΔA = 283 000 км^2 до с. Белогорье — ΔA= 2 204 000 км^2.

При восстановлении значений расходов воды в пункте д. Медведево за каждый год рассматривалось два варианта. В одном из них проводилась интерпо-

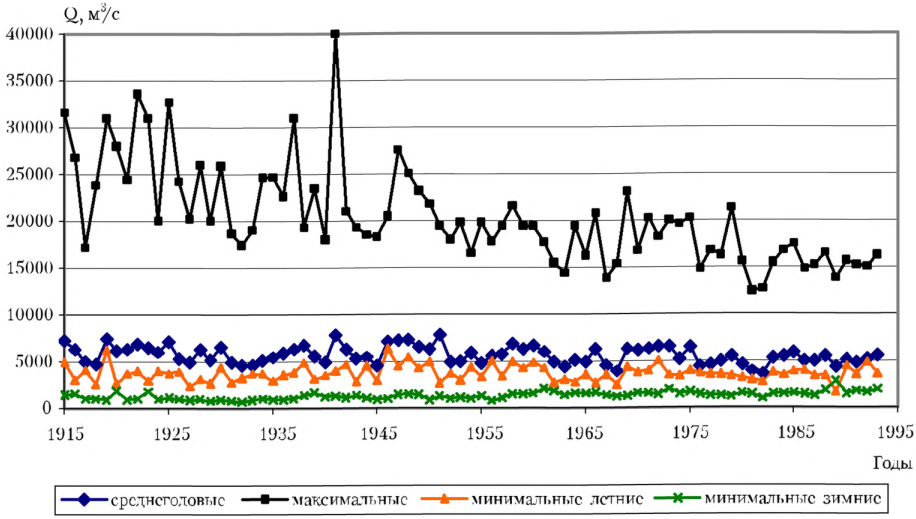

Рисунок А.15 — Хронологические графики хода расходов воды д.Медведево

ляция между значениями расходов воды в д. Прокоркино и с. Белогорье. В другом варианте проводилась экстраполяция значений расходов воды по створам г. Колпашево и д. Прохоркино в пункт д. Медведево.

Анализ результатов показал, что целесообразно при восстановлении стока в д. Медведево использовать экстраполяцию т.к. при интерполяции с привлечением стока в п. Белогорье получаются завышенные значения расходов воды в связи с тем, что Белогорье расположено ниже впадения реки Иртыш, которая приносит значительный дополнительный сток.

В таблице А.7 даны расходы воды (средние годовые, максимальные, минимальные за летний период и зимний период) в д. Медведево, рассчитанные по экстраполяции с учетом данных по г. Колпашево и д. Прохоркино, а на рисунке А.15 приводятся хронологические графики расходов воды.

По этим рядам рассчитаны параметры и кривые распределения. Параметры кривых распределения определялись методом моментов по рядам, а также по групповым (обобщенным) оценкам этих параметров. Значения параметров C_v, C_s, r(1) определялись согласно СП [Свод, 2004]. В таблице А.8 даны параметры распределения максимального, среднего годового, минимального летнего и зимнего стока р. Оби — д. Медведево, рассчитанные по индивидуальным и по принятым обобщенным параметрам C_s/C_v и r(1).

На рисунках А.16–А.19 — изображены кривые обеспеченности средних годовых, максимальных, минимальных летних и зимних расходов воды р. Объ — д. Медведево (Значения расходов по оси уменьшены в 100 раз)), а в таблице А.9 приведены значения расходов воды различной обеспеченности (квантили распределения), которые могут быть использованы в дальнейших расчетах.

Таблица А.7 — Расходы воды в д.Медведево, рассчитанные по экстраполяции с учетом данных по г. Колпашево и д. Прохоркино ($м^3/с$)

год	Среднегодовой	Максимальный	Минимальный летний	Минимальный зимний	год	Среднегодовой	Максимальный	Минимальный летний	Минимальный зимний
1915	7200	31600	4910	1430	1955	4800	19800	3330	1310
1916	6300	26800	3000	1550	1956	5600	17800	5020	810
1917	5000	17200	4050	1040	1957	5700	19400	3350	1110
1918	4700	23800	2550	1040	1958	6800	21600	4960	1460
1919	7400	31000	6250	940	1959	6200	19400	4240	1470
1920	6100	28000	2650	1820	1960	6600	19400	4860	1550
1921	6300	24400	3630	932	1961	6000	17700	4240	2060
1922	6800	33600	3960	1050	1962	4900	15500	2680	1760
1923	6400	31000	2900	1770	1963	4400	14400	3050	1360
1924	6000	20000	3920	1000	1964	5100	19400	2740	1580
1925	7100	32700	3700	1150	1965	4900	16300	3540	1560
1926	5300	24200	3900	1000	1966	6200	20800	2710	1640
1927	4900	20200	2330	856	1967	4500	13900	3570	1380
1928	6200	26000	3080	962	1968	3900	15400	2440	1180
1929	5200	20000	2700	810	1969	6300	23100	4350	1250
1930	6500	25900	4350	910	1970	6100	16800	3840	1580
1931	4900	18700	2750	779	1971	6300	20300	3980	1560
1932	4600	17400	3230	703	1972	6500	18200	5010	1430
1933	4600	19000	3650	862	1973	6500	20000	3480	2000
1934	5100	24600	3680	1030	1974	5200	19600	3440	1480
1935	5400	24700	2900	893	1975	6400	20300	3930	1710
1936	5800	22600	3550	917	1976	4400	14800	3630	1400
1937	6300	31000	3750	1010	1977	4600	16800	3520	1340
1938	6700	19300	4840	1360	1978	5000	16300	3560	1290
1939	5600	23500	3100	1670	1979	5500	21300	3450	1210
1940	4900	18000	3460	1220	1980	4600	15600	3200	1550
1941	7800	40000	3950	1310	1981	3900	12400	2960	1430
1942	6200	21000	4690	1160	1982	3600	12700	2720	968
1943	5300	19300	2830	1380	1983	5300	15500	3830	1500
1944	5400	18500	4540	1110	1984	5500	16800	3480	1500
1945	4500	18300	2920	917	1985	5800	17500	3860	1520
1946	7100	20500	6340	1050	1986	5000	14800	3970	1400
1947	7200	27600	4460	1410	1987	5000	15200	3360	1280
1948	7300	25100	5400	1470	1988	5500	16500	3440	1810
1949	6500	23200	4210	1410	1989	4300	13800	1630	2790
1950	6200	21800	4950	869	1990	5100	15700	4450	1460
1951	7800	19400	2660	1240	1991	4800	15200	3540	1750
1952	4900	18000	3710	1010	1992	5200	15100	4840	1680
1953	5000	19800	2950	1160	1993	5600	16300	3620	1920
1954	5800	16500	4320	1040					

Таблица А.8. Параметры распределения стока р. Обь — д. Медведево

Параметры ряда	Среднегодовой	Максимальный	Минимальный летний	Минимальный зимний
Длина восстановленного ряда	79	79	79	79
Среднее	5 640	20 500	3 700	1 320
Коэффициент вариации C_v	0,17	0,26	0,23	0,27
Коэффициент асимметрии C_s	0,24/0,33	1,25/1,31	0,63/0,70	0,93/0,81
Соотношение C_s/C_v	1,41/2,00	4,81/5,00	2,74/3,00	3,44/3,00
Коэффициент автокорреляции $r(1)$	0,37	0,47	0,12	0,51

Таблица А.9. Квантили и параметры распределения стоковых рядов р. Обь — д. Медведево

P %	Q сред. год.	Q макс.	Q мин. лет.	Q мин. зим.
0,01	99,1	615	85,2	34,3
0,05	93,0	523	76,9	30,5
0,1	90,4	488	73,5	28,9
0,5	84,0	405	65,1	25,2
1	80,8	376	61,6	23,7
5	72,8	302	52,6	19,7
10	68,7	271	48,3	17,9
20	64,0	243	43,8	16,0
25	62,5	232	42,1	15,2
30	60,8	222	40,7	14,7
40	58,3	207	38,1	13,6
50	55,9	195	36,1	12,7
60	53,6	184	35,5	12,1
70	51,1	172	32,0	11,1
75	49,8	167	30,9	10,7
80	48,4	160	29,8	10,2
90	44,8	146	26,9	9,07
95	42,0	137	24,8	8,23
97	39,0	127	22,6	7,40
99	37,0	121	21,3	6,91
99.5	35,4	115	20,1	6,44
99.9	32,0	106	17,9	5,61
Среднее Cv Cs/Cv	56,4 0,17 2,00	205 0,26 5,00	37,0 0,23 3,00	13,2 0,27 3,00

Примечание: Значения расходов воды уменьшены в 100 раз.

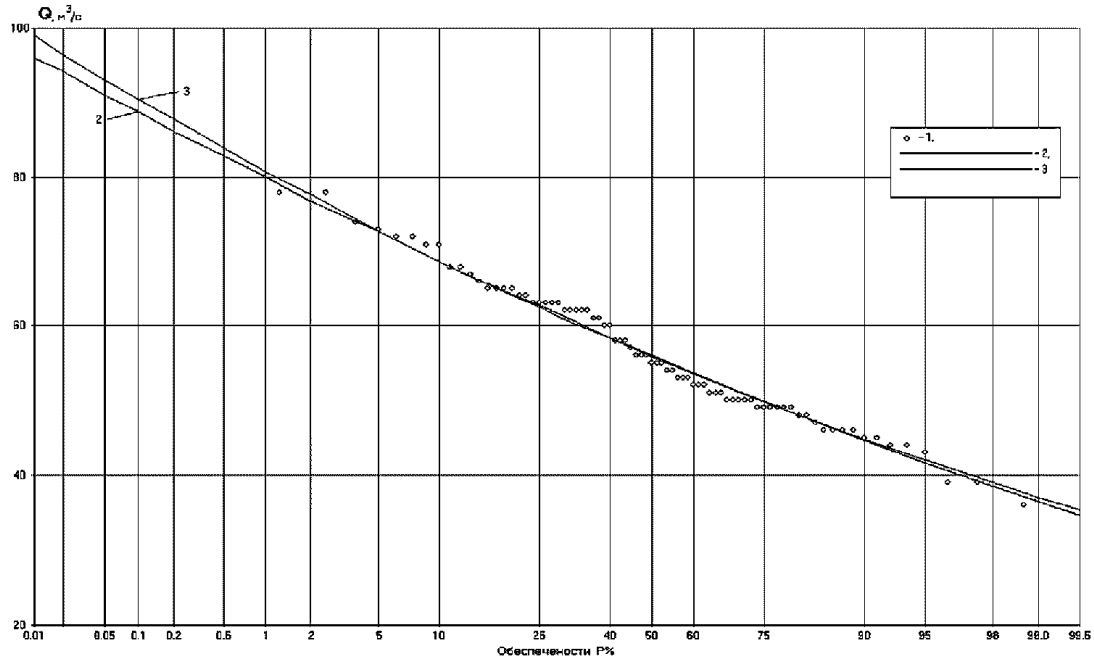

Рис. А.16. Кривые обеспеченности средних годовых расходов воды р. Обь — д. Медведево
1 — эмпирические точки, 2 — кривая обеспеченности по параметрам, рассчитанным по ряду, 3 — кривая обеспеченности по параметрам, обобщенным по району

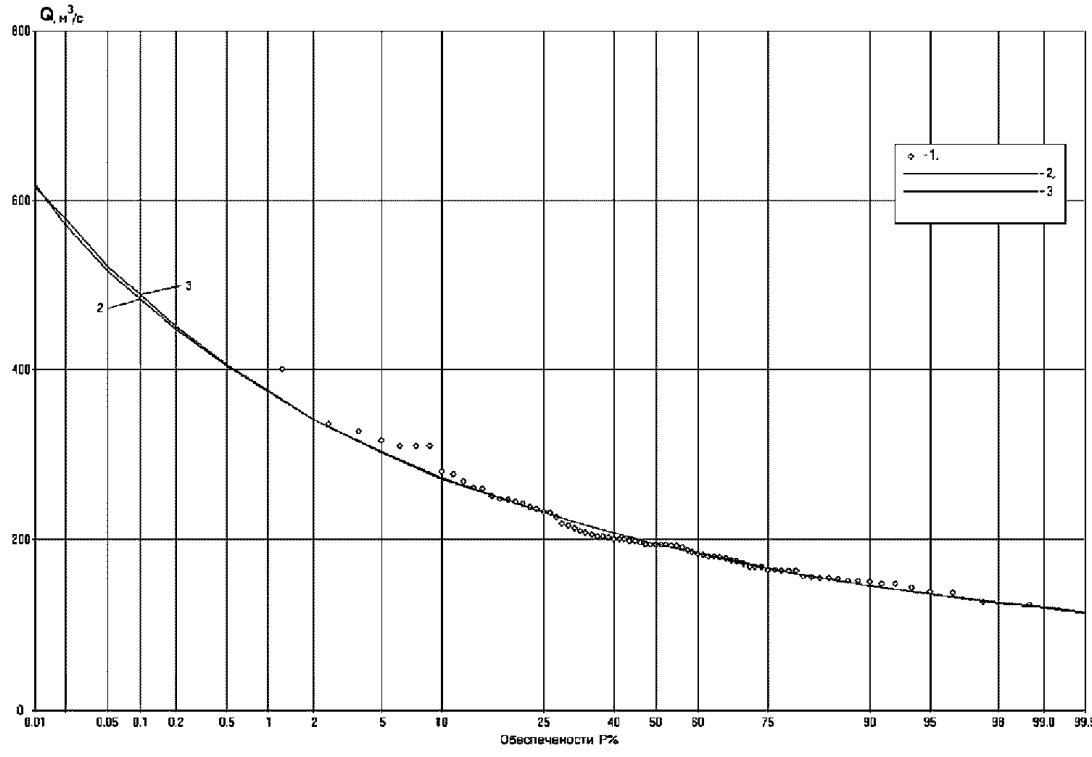

Рис. А.17. Кривая обеспеченности максимальных расходов воды о. Обь — д. Медведево
1 — эмпирические точки, 2 — кривая обеспеченности по параметрам, рассчитанным по ряду, 3 — кривая обеспеченности по параметрам, обобщенным по району

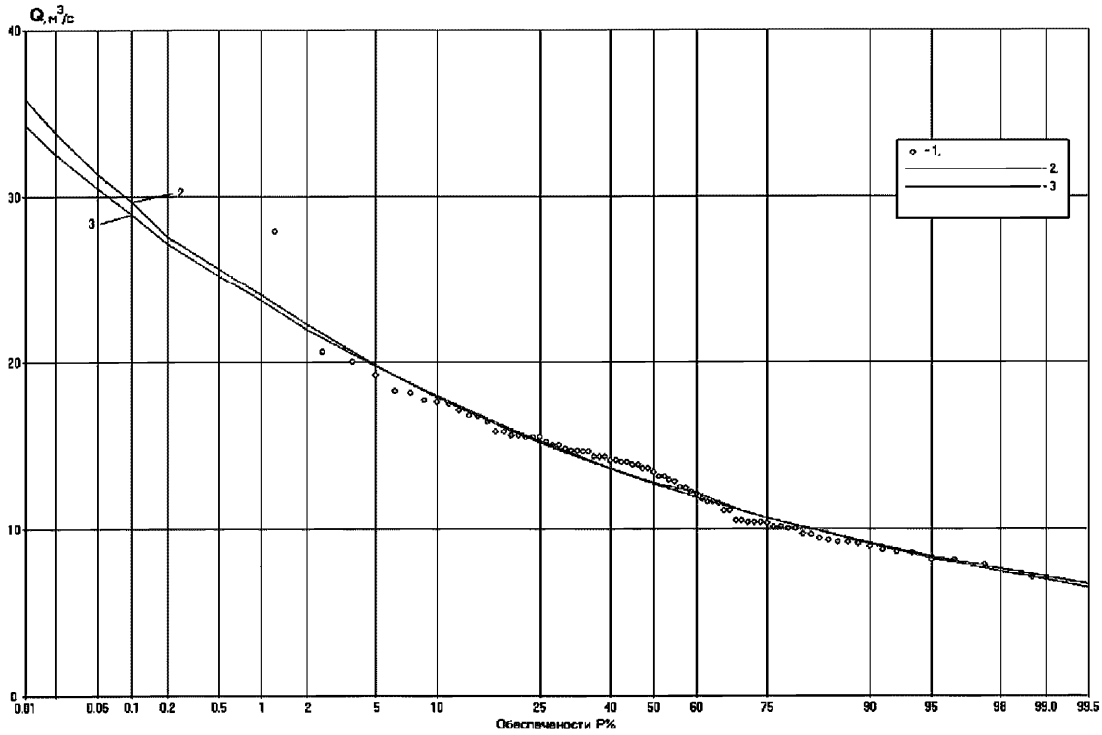

Рис. А.18. Кривая обеспеченности минимального зимнего стока р. Обь — д. Медведево
1 — эмпирические точки, 2 — кривая обеспеченности по параметрам, рассчитанным по ряду,
3 — кривая обеспеченности по параметрам, обобщенным по району

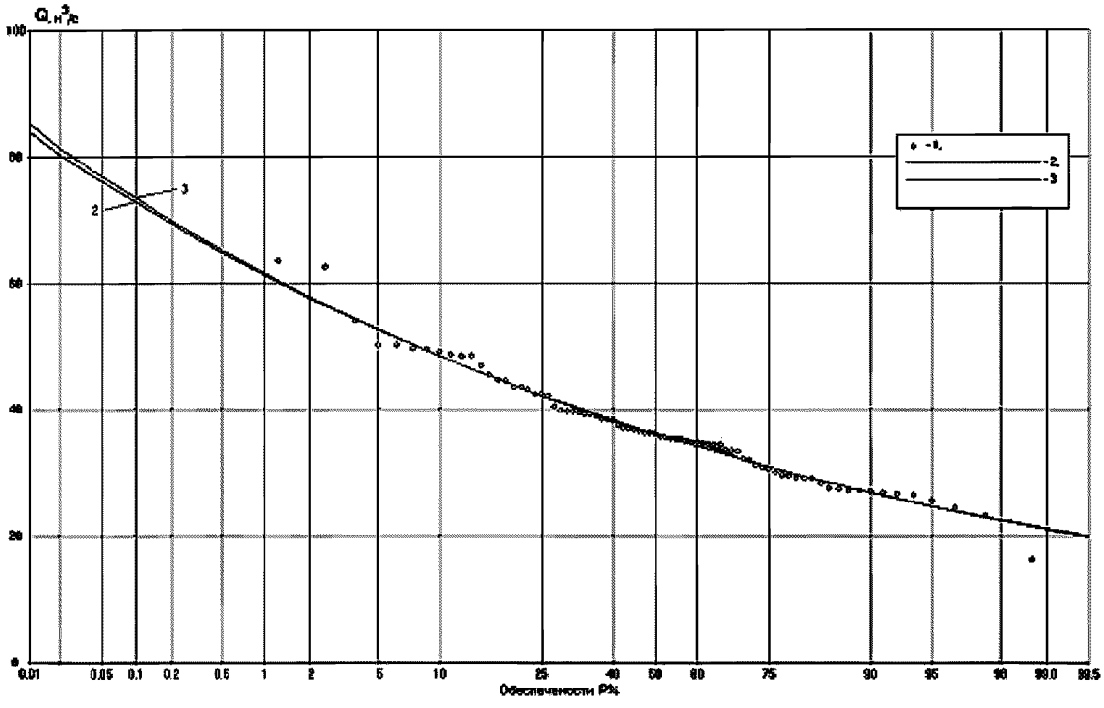

Рис. А.19. Кривая обеспеченности минимального летнего стока р. Обь — д. Медведево
1 — эмпирические точки, 2 — кривая обеспеченности по параметрам, рассчитанным по ряду,
3 — кривая обеспеченности по параметрам, обобщенным по району

А.5.5. Расчеты уровней воды

Расчеты уровенных рядов в створе. Медведево производилисьс привлечением рядов — аналогов: р. Обь — д. Прохоркино, р. Обь — с. Александровское, р. Обь — г. Нижневартовск и р. Обь — г. Сургут, приведенным к многолетнему периоду.

По методике, изложенной в предыдущем разделе и согласно СП [Свод, 2004], по перечисленным рядам были восстановлены максимальные, средние годовые, минимальные летние и зимние уровни воды по рекам-аналогам. Анализ восстановленных данных показал, что средняя квадратическая погрешность восстановленных значений уровней не превышает 5–10%.

Приведенные к многолетнему периоду ряды были проанализированы на однородность и стационарность с помощью статистических критериев Диксона, Смирнова-Граббса, Стьюдента и Фишера, обобщенных на условиях асимметричности распределений и внутрирядной связанности временных рядов [Рекомендации, 1984; Свод, 2004].

Осредненные значения коэффициентов автокорреляции $r(1)$ и асимметрии Cs, полученные путем обобщения по четырем рядам каждой характеристики и необходимые при использовании обобщенных критериев, равны: $r(1)=0{,}35$ — для рядов среднегодовых уровней воды, $r(1)=0{,}17$ — для рядов максимальных уровней воды весеннего половодья, $r(1)=0{,}05$ — для минимальных летних и $r(1)=0{,}64$ — для минимальных зимних уровней воды; $Cs=0$ для всех характеристик.

В результате анализа однородности был сделан вывод, что ряды всех характеристик уровней являются однородными и могут быть использованы для получения расчетных характеристик уровней в исследуемом створе д. Медведево.

Анализ стационарности также проводился по обобщенным критериям Стьюдента и Фишера и при разделении временных рядов на подвыборки по дате введения в действие Новосибирской ГЭС. После проверки стационарности по статистическим критериям получены те же результаты, что и для расходов воды: стационарность среднегодовых и минимальных летних и нестационарность максимальных весенних и минимальных зимних уровней воды. При этом было установлено, что нестационарность характеризуется уменьшением весенних и увеличением зимних уровней воды, а влияние Новосибирской ГЭС ослабевает по мере удаления от плотины.

Количественная оценка влияния Новосибирской ГЭС в исследуемом створе д. Медведево составляет не более 8–10%. В целом сделан вывод, что ряды наблюдений за уровнями воды соответствуют естественным условиям и могут быть использованы для восстановления данных в пункте проектирования Медведево и расчета уровней заданной обеспеченности.

Восстановление значений уровней воды в створе р. Обь — д. Медведево осуществлялось путем интерполяции восстановленных или наблюденных значений уровней по длине реки за каждый год с привлечением данных в створах д. Прохоркино, с. Александровское, г. Нижневартовск, г. Сургут. Рассчитанные по интерполяции данные по уровням воды в пункте Медведево представлены на рисунке А.20 — и в таблице А.10 — в м БС.

По данным наблюдений за уровнями рассчитывались зависимости уровней воды (средних годовых, максимальных, минимальных за летний и зимний перио-

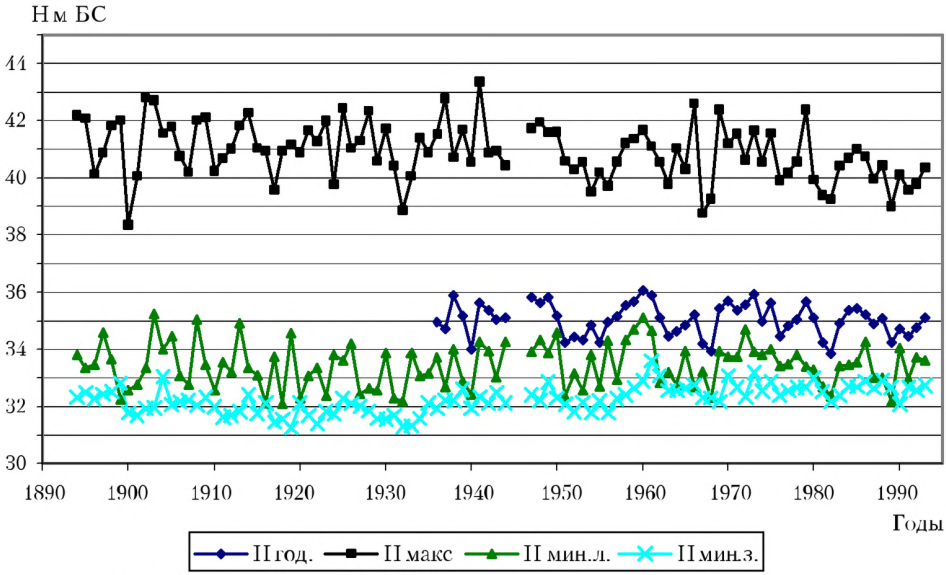

Рис. А.20. Хронологический график хода уровней воды р. Обь — д.Медведево

Таблица А.10 — Уровни воды в д. Медведево, рассчитанные по интерполяции

год	Н ср.год	Н макс.	Н мин. лет.	Н мин. зим.	год	Н ср.год	Н макс.	Н мин. лет.	Н мин. зим.
1894		42,20	33,82	32,33	1943	35,05	40,94	33,01	32,50
1895		42,10	33,35	32,50	1944	35,12	40,44	34,28	32,12
1896		40,14	33,45	32,29	1947	35,82	41,74	33,90	32,41
1897		40,88	34,61	32,43	1948	35,64	41,96	34,32	32,22
1898		41,82	33,65	32,52	1949	35,85	41,60	33,89	32,87
1899		42,03	32,26	32,82	1950	35,17	41,61	34,59	32,30
1900		38,35	32,59	31,77	1951	34,24	40,59	32,34	32,08
1901		40,08	32,76	31,69	1952	34,42	40,29	33,18	31,82
1902		42,80	33,35	31,93	1953	34,33	40,55	32,57	32,14
1903		42,71	35,26	31,96	1954	34,83	39,50	33,80	31,77
1904		41,58	33,99	33,03	1955	34,23	40,20	32,71	32,20
1905		41,78	34,47	32,07	1956	34,96	39,72	34,30	31,78
1906		40,76	33,05	32,16	1957	35,14	40,58	32,92	32,28
1907		40,21	32,75	32,23	1958	35,54	41,23	34,33	32,42
1908		42,03	35,05	32,03	1959	35,66	41,38	34,69	32,65
1909		42,12	33,46	32,33	1960	36,05	41,68	35,12	32,91
1910		40,24	32,57	32,00	1961	35,90	41,12	34,67	33,60
1911		40,67	33,53	31,62	1962	35,10	40,54	32,85	33,08
1912		41,02	33,20	31,69	1963	34,45	39,80	33,19	32,57
1913		41,84	34,93	31,83	1964	34,62	41,04	32,76	32,57
1914		42,29	33,35	32,41	1965	34,85	40,32	33,94	32,63
1915		41,06	33,09	31,75	1966	35,22	42,62	32,70	32,75
1916		40,94	32,13	32,12	1967	34,22	38,78	33,24	32,31
1917		39,58	33,74	31,45	1968	33,92	39,27	32,30	32,31
1918		40,94	32,09	31,57	1969	35,44	42,40	33,93	32,17
1919		41,19	34,56	31,26	1970	35,68	41,20	33,76	33,08

1920		40,90	32,29	32,12	1971	35,36	41,54	33,73	32,67
1921		41,65	33,06	31,69	1972	35,55	40,64	34,68	32,35
1922		41,29	33,34	31,39	1973	35,93	41,66	33,91	33,19
1923		42,01	32,38	31,82	1974	34,97	40,55	33,82	32,55
1924		39,77	33,82	31,73	1975	35,63	41,57	34,01	32,87
1925		42,43	33,61	32,27	1976	34,44	39,92	33,41	32,38
1926		41,05	34,21	32,10	1977	34,81	40,19	33,48	32,57
1927		41,32	32,44	32,01	1978	35,05	40,58	33,80	32,67
1928		42,35	32,65	31,84	1979	35,67	42,39	33,39	32,67
1929		40,59	32,56	31,58	1980	35,11	39,95	33,30	33,00
1930		41,72	33,86	31,56	1981	34,23	39,39	32,70	32,51
1931		40,42	32,29	31,70	1982	33,85	39,25	32,36	32,16
1932		38,85	32,17	31,30	1983	34,91	40,41	33,42	32,38
1933		40,07	33,87	31,32	1984	35,37	40,71	33,46	32,72
1934		41,40	33,06	31,58	1985	35,44	41,01	33,56	32,70
1935		40,90	33,17	32,12	1986	35,20	40,74	34,28	32,88
1936	34,94	41,53	33,72	31,94	1987	34,88	39,97	33,00	32,64
1937	34,72	42,79	32,69	32,23	1988	35,09	40,44	33,00	32,91
1938	35,88	40,72	34,01	32,21	1989	34,23	39,01	32,20	32,67
1939	35,18	41,70	32,89	32,61	1990	34,72	40,12	34,04	32,08
1940	34,01	40,56	32,41	31,94	1991	34,44	39,58	32,96	32,70
1941	35,64	43,38	34,25	32,34	1992	34,76	39,78	33,72	32,58
1942	35,36	40,88	33,93	32,10	1993	35,11	40,35	33,61	32,74

Таблица А.11. Квантили и параметры распределения уровней р. Обь – д. Медведево

P %	*H* сред.год.	*H* макс.	*H* мин. лет.	*H* мин. зим.
0,01	37,68	44,98	37,14	34,22
0,05	37,40	44,56	36,75	34,01
0,1	37,19	44,23	36,46	33,86
0,5	36,84	43,69	35,97	33,60
1	36,71	43,48	35,78	33,49
5	36,22	42,73	35,10	33,13
10	35,94	42,31	34,71	32,92
20	35,59	41,77	34,22	32,67
25	35,52	41,66	34,12	32,61
30	35,38	41,45	33,93	32,51
40	35,17	41,13	33,64	32,36
50	35,03	40,90	33,43	32,25
60	34,85	40,63	33,19	32,12
70	34,66	40,35	32,93	31,98
75	34,56	40,18	32,78	31,90
80	34,44	40,00	32,62	31,81
90	34,14	39,54	32,20	31,59
95	33,89	39,17	31,86	31,41
97	33,73	38,92	31,63	31,29
99	33,44	38,47	31,23	31,07
99,5	33,27	38,21	30,99	30,95
99,9	32,94	37,70	30,52	30,70
Среднее	35,03	40,91	33,44	32,25
Cv	0,02	0,03	0,03	0,02
Cs/Cv	0,01	0,01	0,01	0,01

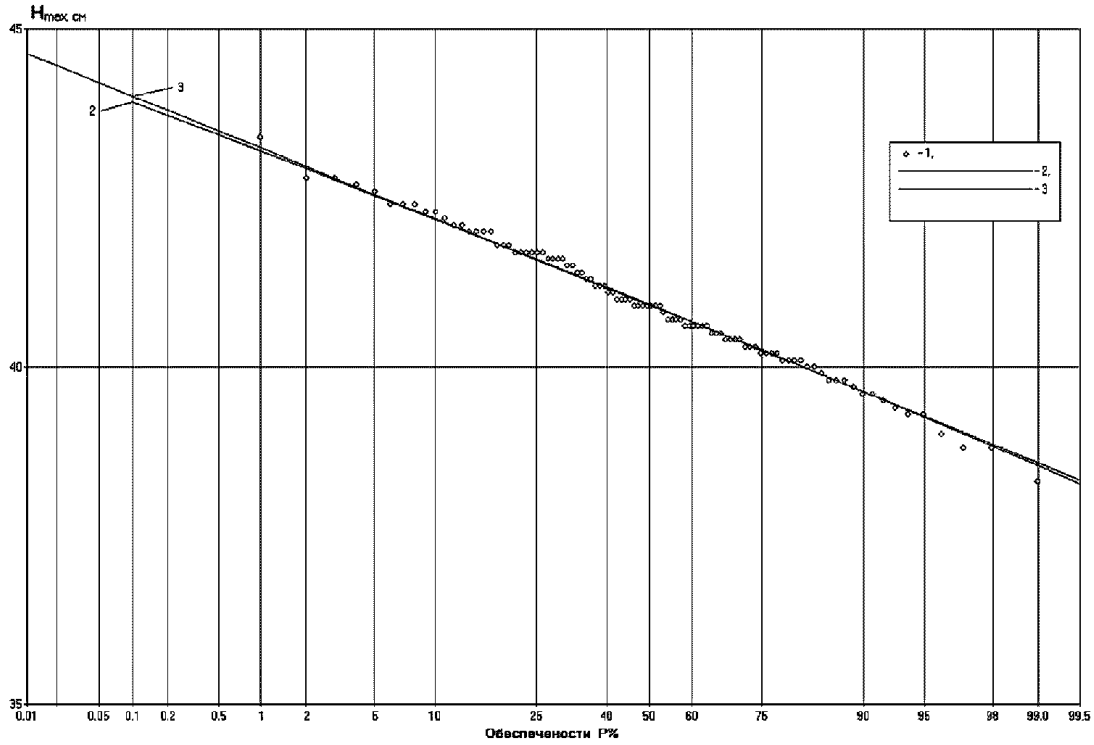

Рис. А.21. Кривая обеспеченности максимальных уровней воды р. Обь — д. Медведево
1 — эмпирические точки, 2 — кривая обеспеченности, рассчитанная по параметрам ряда,
3 — кривая обеспеченности при C_S/C_V=0,01

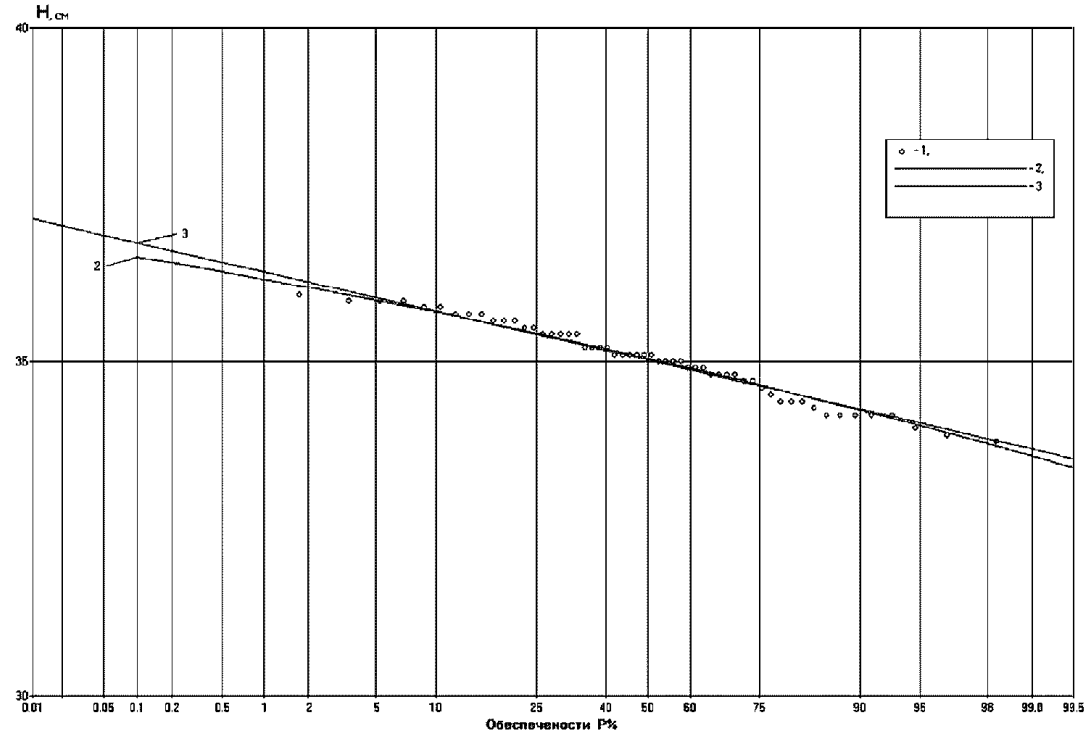

Рис. А.22. Кривая обеспеченности среднегодовых уровней р. Обь — д.Медведево
1 — эмпирические точки, 2 — кривая обеспеченности по параметрам, рассчитанным по ряду,
3 — кривая обеспеченности при C_S/C_V=0,01

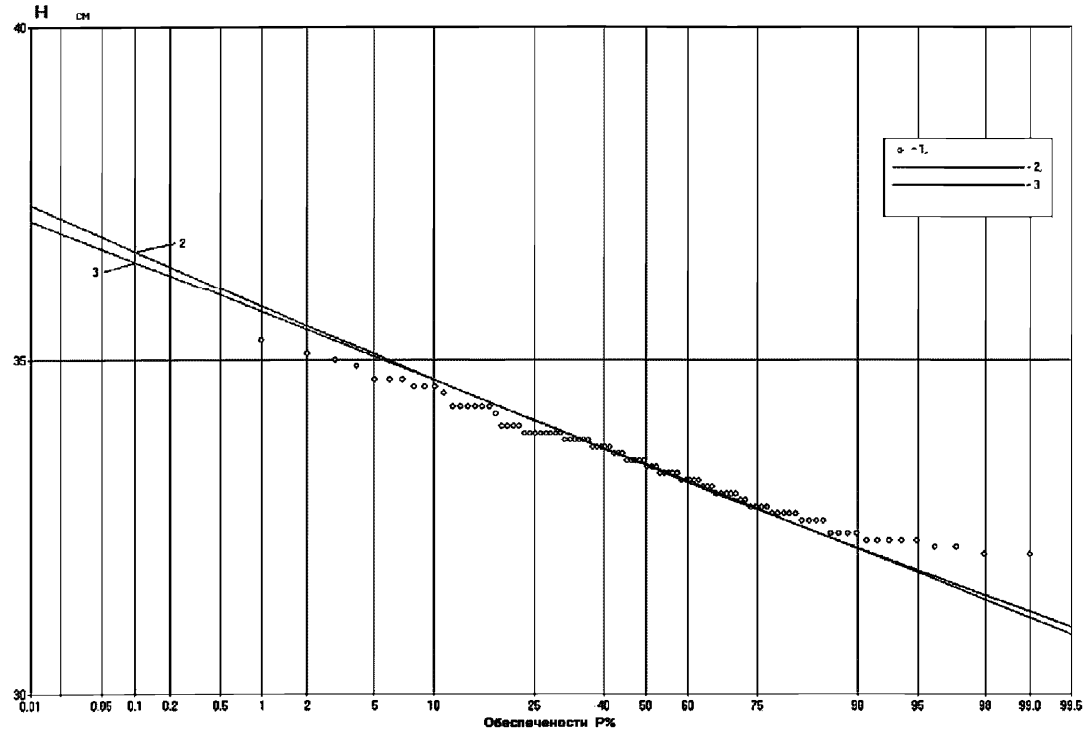

Рис. А.23. Кривая обеспеченности минимальных летних уровней воды р. Обь — д. Медведево
1 — эмпирические точки, 2 — кривая обеспеченности, рассчитанная по параметрам ряда,
3 — кривая обеспеченности при C_s/C_v =0,01

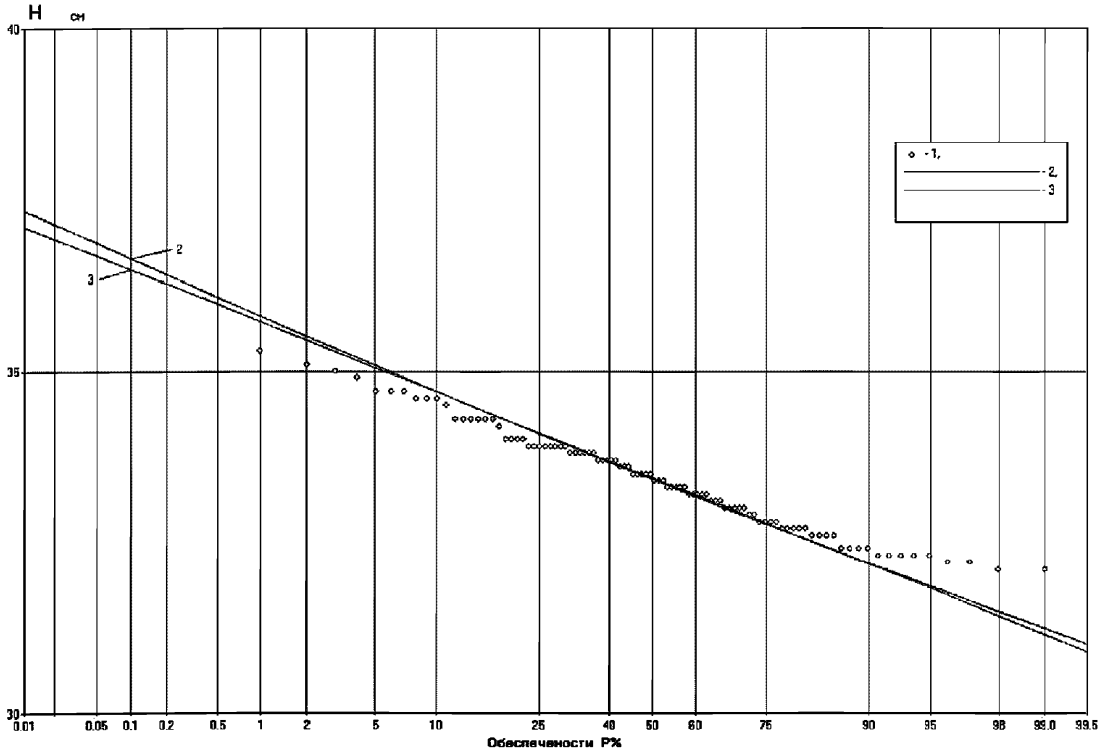

Рис. А.24. Кривая обеспеченности минимальных зимних уровней воды р. Обь — д. Медведево
1 — эмпирические точки, 2 — кривая обеспеченности, рассчитанная по параметрам ряда,
3 — кривая обеспеченности при C_s/C_v =0,01

ды) от расстояния по длине реки от начальной точки отсчета, за которую принят створ Прохоркино. Расстояния между створом Прохоркино до с. Александровское равно 194 км, до д.Медведево — 244 км, до Нижневартовска — 313 км, до г. Сургута — 522 км. Интерполяция проводилась между створами Александровское и Нижневартовск, остальные створы были привлечены для анализа вида зависимостей.

В таблице А.11 даны расчетные уровни заданной обеспеченности, которые могут быть использованы в дальнейших расчетах, на рисунках А.21–А.24 представлены кривые обеспеченности соответствующих уровней воды р. Обь — д. Медведево

А.6. Расчет годового стока в виде суммы сезонных составляющих по стокоформирующим факторам при отсутствии данных гидрометрических наблюдений*

Выбрано 45 водосборов в районе Северного Края с широким диапазоном площадей от 179 до 220000 км^2 и с высотами, варьирующими от 68 до 290 м. Кроме этого, 5 водосборов оставлены для проверки методики на независимом материале. Прежде всего, для всех выбранных водосборов были определены даты начала сезонов, слои стока за сезоны и осуществлено обобщение предполагаемых стокоформирующих факторов по водосбору и за каждый сезон. Далее, для каждого водосбора находились регрессионные зависимости для определения слоев стока за каждый сезон. Затем определялось наиболее эффективное уравнение для каждого сезона и водосбора и результаты обобщались по территории для установления территориально общего уравнения. В результате расчетов были получены следующие уравнения с общей структурой для территории Северного края:

а) сезон весеннего половодья:

$$Y = b_1 X_{тв} + b_2 X_{вес} + b_3 X_{л-о\,i-1} + b_0, \text{ с } Rcp.=0{,}75,$$

где $X_{тв}$ — твердые осадки; $X_{вес}$ — осадки за половодье; $X_{л-о\,i-1}$ — осадки за предыдущий летне-осенний период; $R_{ср.}$ — средний коэффициент множественной корреляции для всех водосборов рассматриваемого района,

или

$$Y = a_1 S + a_2 X_{вес} + a_3 U_{осен} + a_0, \text{ с } Rcp.=0{,}82,$$

где S — максимальные снегозапасы, $U_{осен}$ — предзимнее увлажнение почвы.

б) летне-осенний сезон:

$$Y = b_1 X^3_{л-о} + b_2 X^2_{л-о} D + b_0, \text{ с } Rcp.=0{,}77,$$

где D — средний дефицит влажности за летне-осенний период;

в) период зимней межени:

$$Y = b_1 X^2_{л-о} + b_2 n + b_3 X_{л-о} T_{зим} + b_0, \text{ с } Rcp.=0{,}60,$$

* По данным В.А. Лобанова.

где n — продолжительность зимней межени (в днях); $T_{зим}$ — средняя температура воздуха за зимнюю межень.

Даты начала и окончания однородных сезонов, их продолжительности, также как и коэффициенты уравнений были обобщены по территории различными способами: построение изолиний, осреднение в однородных районах и зависимости с определяющими территориальными факторами, например, зависимости продолжительности половодья от площади водосбора, полученные для трех однородных районов на территории. В результате интерполяции и экстраполяции дат сезонов и коэффициентов уравнений на поверочные водосборы, были рассчитаны слои стока за каждый сезон и год в виде суммы сезонных слоев. В качестве примера сравнение рассчитанных и фактических слоев сезонного и годового стока для р. Вага — с. Усть-Сюма показано на рисунке А25. Как видно на рисунке, рассчитанные слои стока практически полностью отражают динамику колебаний наблюденного стока, имея наибольшие совпадения для годового стока, как интегральной характеристики и наименьшие — для сезона зимней межени. В результате независимой оценки по 5 поверочным водосборам были определе-

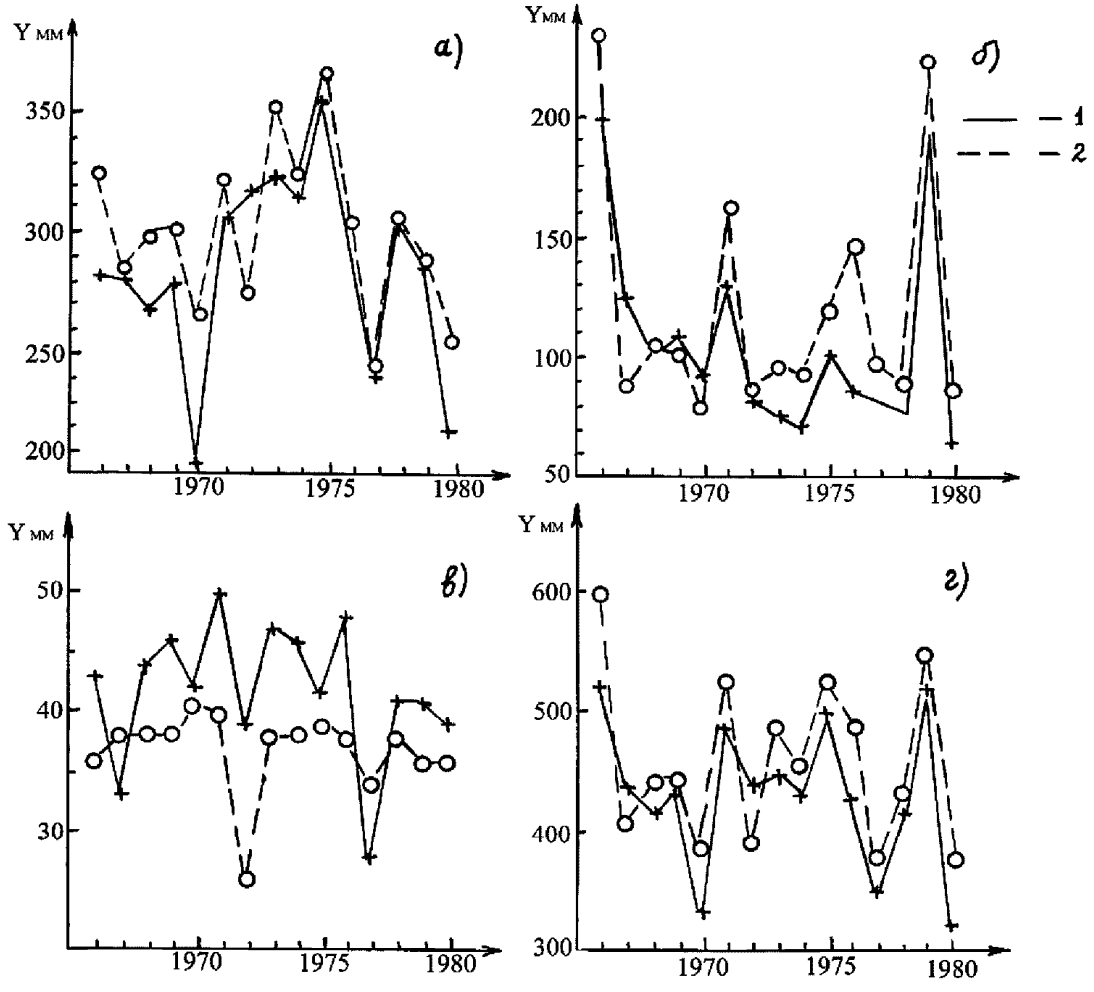

Рис. А.25. Сравнение фактических (1) и рассчитанных (2) слоев стока р.Вага — с. Усть-Сюма для: а) весеннего половодья, б) летне-осеннего сезона, в) сезона зимней межени, г) годового стока

ны относительные стандартные погрешности: $\Delta\varepsilon = 24–48$ % для периода весеннего половодья, $\Delta\varepsilon = 20–24$ % для летне-осеннего сезона, $\Delta\varepsilon = 13–33$ % для сезона зимней межени и $\Delta\varepsilon = 8–14$ % для годового стока.

А.7. Расчет внутригодового распределения стока методом среднего распределения стока за годы характерной градации водности

Требуется выполнить расчет внутригодового распределения стока методом среднего распределения стока за годы характерной градации водности реки Луги у ст. Толмачево для маловодного года ($P = 90$ %), $A = 6350$ км^2, период наблюдений 1951–1981 гг.

Согласно исследованиям внутригодового режима, принимаем: за основные сезоны –весну (апрель-июнь), лето-осень (июль-ноябрь), зиму (декабрь-март); за лимитирующий период — лето-осень-зиму; за лимитирующий сезон — зиму (см. рисунок.7.1).

Производится перевод среднемесячных расходов воды в объемы стока с учетом различия в числе дней не високосных и високосных лет и в числе секунд в разные месяцы года.

Рассчитываются годовые объемы стока по водохозяйственным годам (таблица А.11).

По ряду годовых объемов стока определяются среднее значение и коэффициент вариации ($W_{ср} = 1250$ млн. м^3, $Cv = 0{,}29$); отношение $Cs/Cv = 2$ (среднее по району исследований). Расчетный объем годового стока принимается по аналитической кривой Крицкого-Менкеля $W_{90\%} = 821$ млн. м^3.

Производится ранжирование данных в таблице А.11 по столбцу объемов годового стока. После ранжирования для каждой строки рассчитывается эмпирическая обеспеченность по формуле согласно [Свод, 2004].

Выбирается маловодная группа лет ($P > 66{,}7$ %). По этой группе рассчитываются средние значения объемов стока за каждый месяц и за водохозяйственный год (таблица А.12).

Среднемесячные значения стока выражаются в процентах от среднего объема годового стока для маловодной группы.

Переход к расчетному внутригодовому распределению стока для года обеспеченности $P = 90$ % производится перемножением относительной доли месячного стока на $W_{90\%}$ (таблица А.13). Расчетные среднемесячные расходы воды рассчитываются делением месячного объема стока на число секунд в конкретном месяце.

Таблица А.11– Месячные и годовые объемы стока воды реки Луга — ст. Толмачево

№ п/п	в/х год	Месячные и годовой объемы стока, млн. м^3												
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	год
1	1951-52	616,9	187,2	59,1	50,1	38,0	29,3	31,3	29,3	58,1	60,3	45,4	36,2	1241,1
2	1952-53	292,9	206,2	61,4	37,0	35,4	53,1	32,4	30,3	103,4	91,6	54,4	58,9	1057,1
3	1953-54	603,9	137,1	85,8	71,2	84,6	154,5	225,5	142,6	165,3	41,8	41,6	50,6	1804,6
4	1954-55	214,1	160,4	65,3	33,5	31,3	36,0	68,0	127,0	100,4	64,8	67,0	54,9	1022,9
5	1955-56	97,7	709,8	161,7	58,9	35,9	29,5	49,8	55,5	43,4	99,1	27,1	27,3	1395,8
6	1956-57	131,2	771,4	66,6	35,9	43,4	47,2	51,2	40,4	62,7	46,3	54,7	50,4	1401,2
7	1957-58	414,7	409,8	100,6	53,0	58,4	164,9	262,5	166,1	88,1	31,1	57,6	54,9	1861,7
8	1958-59	236,1	535,7	94,1	52,8	60,8	48,7	67,5	97,7	56,5	62,1	48,6	78,7	1439,4
9	1959-60	676,5	209,5	61,4	46,9	37,5	37,8	48,2	43,0	31,3	31,1	27,1	30,0	1280,3
10	1960-61	331,8	224,7	45,9	43,4	36,4	46,1	47,4	61,2	176,5	117,0	70,6	187,0	1388,1
11	1961-62	321,4	168,7	62,7	43,4	76,3	107,3	72,9	65,6	79,3	69,4	57,8	49,8	1174,6
12	1962-63	567,6	294,6	118,2	150,5	79,0	175,5	137,9	178,1	178,6	56,8	42,8	49,3	2029,0
13	1963-64	272,2	242,9	51,3	30,8	30,8	34,2	50,4	68,9	45,5	34,6	25,3	26,2	913,2
14	1964-65	172,1	154,5	61,2	30,5	25,2	24,6	27,6	34,5	43,1	35,6	30,5	41,5	681,0
15	1965-66	238,2	236,2	56,0	28,1	33,5	31,1	32,4	29,5	32,9	28,1	26,6	39,9	812,7
16	1966-67	339,6	744,6	83,2	52,0	58,1	60,7	98,8	86,1	59,7	38,0	32,7	115,4	1768,8
17	1967-68	440,6	263,3	70,8	42,9	32,1	36,8	36,4	61,2	56,0	39,9	37,8	73,1	1190,9
18	1968-69	536,5	172,5	61,9	49,6	44,2	38,6	65,4	138,2	56,5	45,3	32,4	36,4	1277,5
19	1969-70	282,5	458,0	113,5	35,9	30,3	32,9	42,3	47,7	56,5	32,7	29,0	35,1	1196,5
20	1970-71	303,3	247,5	43,0	34,8	37,5	41,7	62,1	122,6	105,3	68,6	98,5	69,1	1234,0
21	1971-72	606,5	188,0	77,2	50,4	34,0	32,4	41,0	43,3	40,2	32,1	27,6	39,6	1212,3
22	1972-73	258,2	139,8	47,7	25,7	20,4	21,5	31,6	34,0	39,9	24,4	19,8	35,6	698,6
23	1973-74	93,3	73,9	33,4	22,0	19,0	25,9	35,9	45,9	43,9	45,0	37,0	43,1	518,4
24	1974-75	172,6	205,4	96,4	95,9	212,4	81,4	77,7	143,9	159,6	243,7	106,9	135,8	1731,8
25	1975-76	419,9	118,4	47,2	35,1	30,8	25,1	32,9	30,8	34,6	38,3	30,8	33,7	877,7
26	1976-77	267,0	249,9	97,5	97,2	48,7	50,8	46,1	54,4	75,0	48,7	31,7	47,9	1115,0
27	1977-78	388,8	214,3	57,3	40,2	45,5	36,8	71,8	113,0	85,7	45,3	34,1	57,0	1189,8
28	1978-79	430,3	174,6	48,7	60,5	93,2	132,7	125,3	155,5	122,7	56,0	43,8	52,8	1496,2
29	1979-80	305,9	286,6	48,5	42,9	49,3	48,7	54,6	60,4	115,7	52,8	41,3	43,9	1150,6
30	1980-81	254,8	281,2	58,1	50,4	58,1	63,2	81,2	136,3	157,0	104,7	62,7	74,5	1382,1
	Среднее	342,9	282,2	71,2	50,0	50,7	58,3	70,3	81,4	82,5	59,5	44,8	57,6	1251,4

Таблица А.12. Расчет внутригодового распределения стока по месяцам в/х года для маловодной группы лет; р. Луга — ст. Толмачево (метод среднего распределения стока за годы характерной градации водности)

№ п/п	*P* %	в/х год	Месячные и годовой объемы стока, млн. м^3												
			IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	год
21	67,74	1979–80	305,86	286,59	48,47	42,85	49,28	48,73	54,64	60,39	115,71	52,76	41,34	43.93	1150.55
22	70,97	1976–77	266,98	249,89	97,46	97,23	48,75	50,80	46,07	54,43	75,00	48,75	31,69	47.94	1114.98
23	74,19	1952–53	292,90	206,24	61,43	36,96	35,35	53,14	32,41	30,33	103,39	91,60	54,43	58.92	1057.10
24	77,42	1954–55	214,10	160,44	65,32	33,48	31,34	36,03	68,03	127,01	100,44	64,82	67,01	54.91	1022.92
25	80,65	1963–64	272,16	242,93	51,32	30,80	30,80	34,21	50,35	68,95	45,53	34,55	25,31	26.25	913.17
26	83,87	1975–76	419,90	118,39	47,17	35,09	30,80	25,14	32,94	30,84	34,55	38,30	30,82	33.75	877.70
27	87,10	1965–66	238,20	236,23	55,99	28,12	33,48	31,10	32,41	29,55	32,94	28,12	26,61	39.91	812.68
28	90,32	1972–73	258,16	139,81	47,69	25,71	20,36	21,51	31,61	33,96	39,91	24,37	19,84	35.62	698.55
29	93,55	1964–65	172,11	154,54	61,17	30,53	25,18	24,62	27,59	34,47	43,12	35,62	30,48	41.52	680.96
30	96,77	1973–74	93,31	73,92	33,44	21,96	19,02	25,92	35,89	45,88	43,93	45,00	37,01	43.12	518.40
Среднее			253,37	186,90	56,95	38,27	32,44	35,12	41,19	51,58	63,45	46,39	36,45	42,59	884,70
В % от годового			28,6	21,1	6,4	4,3	3,7	4,0	4,7	5,8	7,2	5,2	4,1	4,8	100

Таблица А.13 — Расчетное внутригодовое распределение стока для маловодного года обеспеченности *P* = 90 %; р. Луга — ст. Толмачево (метод среднего распределения стока за годы характерной градации водности)

Единица измерения	Месячный сток												Годовой сток
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
%	28,6	21,1	6,4	4,3	3,7	4,0	4,7	5,8	7,2	5,2	4,1	4,8	100
млн. м^3	235	173	52,8	35,5	30,1	32,6	38,2	47,9	58,9	43,0	33,8	39,5	821
м^3/с	90,7	64,8	20,4	13,3	11,2	12,6	14,3	18,5	22,0	16,1	13,9	14,8	26,0

А.8. Расчет внутригодового распределения стока методом реального года

Требуется выполнить расчет внутригодового распределения стока методом реального года реки Луги у ст. Толмачево для маловодного года (P = 90 %), A = 6350 км^2, период наблюдений 1951–1981 гг.

Согласно исследованиям внутригодового режима, принимаем: за основные сезоны –весну (апрель-июнь), лето-осень (июль-ноябрь), зиму (декабрь-март); за лимитирующий период — лето-осень-зиму; за лимитирующий сезон — зиму (см. рисунок 7.1).

Производится перевод среднемесячных расходов воды в объемы стока с учетом различия в числе дней не високосных и високосных лет и в числе секунд в разные месяцы года (таблица А.11).

Определяются ежегодные объемы стока за водохозяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон (таблица А.14).

Каждый из полученных рядов ранжируется (с указанием в/х года) и для каждого члена ранжированного ряда определяется его эмпирическая обеспеченность (таблица А.15).

Для каждого из рядов отбираются годы маловодной группы лет (P > 66,7 %). Как видно из таблицы А8, в маловодную группу для ВГ, ЛП и ЛС попали следующие водохозяйственные годы: 1963–64, 1964–65, 1965–66, 1972–73, 1973–74, 1975–76. С целью объективного выбора расчетного года-модели для всех перечисленных лет по формуле (7.1) рассчитывается критерий ΔP (таблица А.16).

Так как наименьшее значение критерия (ΔP = 21) наблюдается для 1965–66 водохозяйственного года, то его месячные объемы стока выражаются в процентах от объема годового стока и принимаются в качестве модели относительного внутригодового распределения.

Расчетный объем годового стока ($W_{90\%}$) определяется так же, как в примере А.7.

Переход к расчетному внутригодовому распределению стока для года обеспеченности P = 90 % производится перемножением относительной доли месячного стока на $W_{90\%}$ (таблица А.17).

Расчетные среднемесячные расходы воды вычисляются делением месячного объема стока на число секунд в конкретном месяце.

Таблица А.14. Объемы стока за водохозяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон; р. Луга — ст. Толмачево

№ п/п	Водохозяйственный год	Объем стока, млн. м^3		
		Год IV–III	**Лимитирующий период VII–III**	**Лимитирующий сезон XII–III**
1	1951–52	1241,14	377,93	199,90
2	1952–53	1057,10	496,53	308,34
3	1953–54	1804,58	977,72	299,27
4	1954–55	1022,92	583,06	287,18
5	1955–56	1395,76	426,52	196,87
6	1956–57	1401,24	432,09	214,04
7	1957–58	1861,66	936,58	231,67
8	1958–59	1439,43	573,53	246,02
9	1959–60	1280,31	332,92	119,47
10	1960–61	1388,05	785,68	551,15
11	1961–62	1174,63	621,75	256,29
12	1962–63	2029,03	1048,56	327,53
13	1963–64	913,17	346,76	131,64
14	1964–65	680,96	293,14	150,74
15	1965–66	812,68	282,25	127,59
16	1966–67	1768,83	601,48	245,86
17	1967–68	1190,93	416,24	206,84
18	1968–69	1277,48	506,49	170,62
19	1969–70	1196,46	342,39	153,31
20	1970–71	1233,96	640,18	341,39
21	1971–72	1212,35	340,55	139,52
22	1972–73	698,55	252,88	119,74
23	1973–74	518,40	317,73	169,06
24	1974–75	1731,78	1257,29	646,09
25	1975–76	877,70	292,24	137,42
26	1976–77	1114,98	500,65	203,38
27	1977–78	1189,80	529,44	222,13
28	1978–79	1496,15	842,52	275,20
29	1979–80	1150,55	509,64	253,74
30	1980–81	1382,10	788,01	398,80

Таблица А.15. Ранжированные объемы стока за водохзяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон; р. Луга — ст. Толмачево (метод реального года)

№ п/п	*P* %	Год IV–III		Лимитирующий период VII–III		Лимитирующий сезон XII–III	
		в/х год	Объем стока, млн. м^3	в/х год	Объем стока, млн. м^3	в/х год	Объем стока, млн. м^3
1	3,23	1962–63	2029,03	1974–75	1257,29	1974–75	646,09
2	6,45	1957–58	1861,66	1962–63	1048,56	1960–61	551,15
3	9,68	1953–54	1804,58	1953–54	977,72	1980–81	398,80
4	12,90	1966–67	1768,83	1957–58	936,58	1970–71	341,39
5	16,13	1974–75	1731,78	1978–79	842,52	1962–63	327,53
6	19,35	1978–79	1496,15	1980–81	788,01	1952–53	308,34
7	22,58	1958–59	1439,43	1960–61	785,68	1953–54	299,27
8	25,81	1956–57	1401,24	1970–71	640,18	1954–55	287,18
9	29,03	1955–56	1395,76	1961–62	621,75	1978–79	275,20
10	32,26	1960–61	1388,05	1966–67	601,48	1961–62	256,29
11	35,48	1980–81	1382,10	1954–55	583,06	1979–80	253,74
12	38,71	1959–60	1280,31	1958–59	573,53	1958–59	246,02
13	41,94	1968–69	1277,48	1977–78	529,44	1966–67	245,86
14	45,16	1951–52	1241,14	1979–80	509,64	1957–58	231,67
15	48,39	1970–71	1233,96	1968–69	506,49	1977–78	222,13
16	51,61	1971–72	1212,35	1976–77	500,65	1956–57	214,04
17	54,84	1969–70	1196,46	1952–53	496,53	1967–68	206,84
18	58,06	1967–68	1190,93	1956–57	432,09	1976–77	203,38
19	61,29	1977–78	1189,80	1955–56	426,52	1951–52	199,90
20	64,52	1961–62	1174,63	1967–68	416,24	1955–56	196,87
Маловодная группа							
21	67,74	1979–80	1150,55	1951–52	377,93	1968–69	170,62
22	70,97	1976–77	1114,98	1963–64	346,76	1973–74	169,06
23	74,19	1952–53	1057,10	1969–70	342,39	1969–70	153,31
24	77,42	1954–55	1022,92	1971–72	340,55	1964–65	150,74
25	80,65	1963–64	913,17	1959–60	332,92	1971–72	139,52
26	83,87	1975–76	877,70	1973–74	317,73	1975–76	137,42
27	87,10	1965–66	812,68	1964–65	293,14	1963–64	131,64
28	90,32	1972–73	698,55	1975–76	292,24	1965–66	127,59
29	93,55	1964–65	680,96	1965–66	282,25	1972–73	119,74
30	96,77	1973–74	518,40	1972–73	252,88	1959–60	119,47

Таблица А.16 — Расчет критерия ΔP по маловодной группе лет; р. Луга — ст. Толмачево (метод реального года)

Водохозяйственный год	Обеспеченность, P %			ΔP
	Год	Лимитирующий период	Лимитирующий сезон	
1963-64	80,6	71,0	87,1	458
1964-65	93,5	87,1	77,4	179
1965-66	87,1	93,5	90,3	21
1972-73	90,3	96,8	93,5	59
1973-74	96,8	83,9	71,0	446
1975-76	83,9	90,3	83,9	75

Таблица А.17 — Расчетное внутригодовое распределение стока для маловодного года обеспеченности P = 90 %; р. Луга — ст. Толмачево (метод реального года)

Единица измерения	Месячный сток												Годовой сток
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
млн. м^3 1965-66 г.	238,20	236,23	55,99	28,12	33,48	31,10	32,41	29,55	32,94	28,12	26,61	39,91	812,68
%	29,3	29,1	6,9	3,5	4,1	3,8	4,0	3,6	4,1	3,5	3,3	4,9	100
млн. м^3	240,6	238,7	56,6	28,4	33,8	31,4	32,7	29,9	33,3	28,4	26,9	40,3	821
м^3/с	92,8	89,1	21,8	10,6	12,6	12,1	12,2	11,5	12,4	10,6	11,0	15,1	26,0

А.9. Расчет внутригодового распределения стока методом компоновки

Требуется выполнить расчет внутригодового распределения стока методом компоновки реки Луги у ст. Толмачево для маловодного года (P = 90 %), A = 6350 км^2, период наблюдений 1951–1981 гг.

Согласно исследованиям внутригодового режима, принимаем: за основные сезоны: весну (апрель-июнь), лето-осень (июль-ноябрь), зиму (декабрь-март); за лимитирующий период — лето-осень-зиму; за лимитирующий сезон — зиму (Рисунок 7.1)

Производится перевод среднемесячных расходов воды в объемы стока с учетом различия в числе дней не високосных и високосных лет и в числе секунд в разные месяцы года (таблица А. 11).

Определяются ежегодные объемы стока за водохозяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон (таблица А.14).

Для каждого из трех рядов по аналитическим кривым определяются объемы стока обеспеченностью P = 90 %: $W_{ВГ,90\%}$ = 821 млн. м^3, $W_{ЛП,90\%}$ = 263 млн. м^3, $W_{ЛС,90\%}$ = 108 млн. м^3.

Расчетные объемы стока за нелимитирующий период ($W_{НЛП}$) и нелимитирующий сезон ($W_{НЛС}$) определяются по остаточному принципу:

$$W_{НЛП} = W_{ВГ,90\%} - W_{ЛП,90\%} = 821–263 = 558 \text{ млн. м}^3;$$
$$W_{НЛС} = W_{ЛП,90\%} - W_{ЛС,90\%} = 263–108 = 155 \text{ млн. м}^3.$$

Таким образом, получено внутригодовое распределение стока по сезонам для маловодного года обеспеченности P = 90 %:

Весна – $W_{НЛП}$ = 558 млн. м^3;
Лето-осень – $W_{НЛС}$ = 155 млн. м^3
Зима – $W_{ЛС,90\%}$ = 108 млн. м^3
Год – $W_{ВГ,90\%}$ = 821 млн. м^3

Для внутрисезонной компоновки определяются ежегодные объемы стока для трех сезонов: весны (НЛП), лета-осени (НЛС) и зимы (ЛС).

Каждый из полученных рядов ранжируется (с указанием в/х года) и для каждого члена ранжированного ряда определяется его эмпирическая обеспеченность по формуле $P=P_1 n_1/(n_1+n_2)$, (таблица А.18). Затем для каждого сезона отбираются годы маловодной группы ($P > 66{,}7$ %).

Для внутрисезонной компоновки сезона «Весна» используются годы маловодной группы, определенные по таблице А.18 Для каждого отобранного года месячные объемы стока располагаются в убывающем порядке с указанием календарных месяцев, к которым они относятся (ранжирование по строке) (таблица А.19). По каждому столбцу таблицы рассчитывается средний объем месячного стока и указывается месяц, наиболее часто встречающийся в этом столбце. Полученные месячные объемы стока выражаются в долях от среднего объема стока за сезон и принимаются в качестве модели относительного внутрисезонного распределения стока. Внутрисезонная компоновка сезона «Зима» производится аналогичным образом (таблица А.20).

Таблица А.18 — Ранжированные сезонные объемы речного стока;
р. Луга — ст. Толмачево (метод компоновки)

№ п/п	P %	Весна НЛП – IV-VI		Лето-осень НЛС – VII-XI		Зима ЛС – XII-III	
		в/х год	Объем стока, млн. м^3	в/х год	Объем стока, млн. м^3	в/х год	Объем стока, млн. м^3
1	3,23	1966–67	1167,4	1962-63	721,03	1974–75	646,1
2	6,45	1962–63	980,5	1957-58	704,90	1960–61	551,1
3	9,68	1955–56	969,2	1953-54	678,45	1980–81	398,8
4	12,90	1956–57	969,1	1974-75	611,20	1970–71	341,4
5	16,13	1959–60	947,4	1978-79	567,32	1962–63	327,5
6	19,35	1957–58	925,1	1980-81	389,21	1952–53	308,3
7	22,58	1971–72	871,8	1961-62	365,46	1953–54	299,3
8	25,81	1958–59	865,9	1966-67	355,62	1954–55	287,2
9	29,03	1951–52	863,2	1968-69	335,87	1978–79	275,2
10	32,26	1969–70	854,1	1958-59	327,51	1961–62	256,3
11	35,48	1953–54	826,9	1977-78	307,31	1979–80	253,7
12	38,71	1967–68	774,7	1970-71	298,79	1958–59	246,0
13	41,94	1968–69	771,0	1976-77	297,28	1966–67	245,9
14	45,16	1977–78	660,4	1954-55	295,89	1957–58	231,7
15	48,39	1978–79	653,6	1979-80	255,90	1977–78	222,1
16	51,61	1979–80	640,9	1960-61	234,53	1956–57	214,0
17	54,84	1976–77	614,3	1955-56	229,65	1967–68	206,8
18	58,06	1960–61	602,4	1956-57	218,05	1976–77	203,4
19	61,29	1980–81	594,1	1963-64	215,12	1951–52	199,9
20	64,52	1970–71	593,8	1959-60	213,45	1955–56	196,9
Маловодная группа							
21	67,74	1975–76	585,5	1967-68	209,40	1968–69	170,6
22	70,97	1963–64	566,4	1971-72	201,04	1973–74	169,1
23	74,19	1952–53	560,6	1969-70	189,09	1969–70	153,3
24	77,42	1961–62	552,9	1952-53	188,19	1964–65	150,7
25	80,65	1965–66	530,4	1951-52	178,04	1971–72	139,5
26	83,87	1974–75	474,5	1975-76	154,82	1975–76	137,4
27	87,10	1972–73	445,7	1965-66	154,66	1963–64	131,6
28	90,32	1954–55	439,9	1973-74	148,67	1965–66	127,6
29	93,55	1964–65	387,8	1964-65	142,40	1972–73	119,7
30	96,77	1973–74	200,7	1972-73	133,14	1959–60	119,5

Сезон «Лето-Осень» является составным, и для него месячные расходы для каждого года располагаются в порядке убывания отдельно для каждого из составляющих его сезонов (таблица А.21).

Переход к расчетному внутрисезонному распределению стока производится перемножением относительных долей месячного стока на расчетный объем сезонного стока (таблица А.22).

По результатам вычислений заполняется таблица расчетного распределения стока по месяцам и сезонам для водохозяйственного года обеспеченности $P = 90$ % (таблица А.23).

Сопоставление результатов расчета внутригодового распределения стока р. Луга ст.Толмачево для года обеспеченностью 90% представлено на рисунке А.26.

Таблица А.19. Расчет внутрисезонного распределения стока для сезона «Весна» по маловодной группе лет ($P > 66{,}7$ %); р. Луга — ст. Толмачево (метод компоновки)

№ п/п	P %	в/х год	Сумма за сезон, млн. м^3	1		2		3	
				млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц
21	67,74	1975–76	585,5	419,9	IV	118,4	V	47.2	VI
22	70,97	1963–64	566,4	272,2	IV	242,9	V	51.3	VI
23	74,19	1952–53	560,6	292,9	IV	206,2	V	61.4	VI
24	77,42	1961–62	552,9	321,4	IV	168,7	V	62.7	VI
25	80,65	1965–66	530,4	238,2	IV	236,2	V	56.0	VI
26	83,87	1974–75	474,5	205,4	V	172,6	IV	96.4	VI
27	87,10	1972–73	445,7	258,2	IV	139,8	V	47.7	VI
28	90,32	1954–55	439,9	214,1	IV	160,4	V	65.3	VI
29	93,55	1964–65	387,8	172,1	IV	154,5	V	61.2	VI
30	96,77	1973–74	200,7	93,3	IV	73,9	V	33.4	VI
Среднее			474,4	248,8	IV–9 V–1	167,4	V–9 IV–1	58,3	VI–10
Принятое распределение, в % от сезонного стока			100	52,4	IV	35,3	V	12,3	VI

Таблица А.20. Расчет внутрисезонного распределения стока для сезона «Зима» по маловодной группе лет ($P > 66{,}7$ %); р. Луга — ст. Толмачево (метод компоновки)

№ п/п	P %	в/х год	Сумма за сезон, млн. м^3	1		2		3		4	
				млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц
21	67,74	1968–69	170,6	56,5	XII	45,3	I	36,4	III	32.4	II
22	70,97	1973–74	169,1	45,0	I	43,9	XII	43,1	III	37.0	II
23	74,19	1969–70	153,3	56,5	XII	35,1	III	32,7	I	29.0	II
24	77,42	1964–65	150,7	43,1	XII	41,5	III	35,6	I	30.5	II
25	80,65	1971–72	139,5	40,2	XII	39,6	III	32,1	I	27.6	II
26	83,87	1975–76	137,4	38,3	I	34,6	XII	33,7	III	30.8	II
27	87,10	1963–64	131,6	45,5	XII	34,6	I	26,2	III	25.3	II
28	90,32	1965–66	127,6	39,9	III	32,9	XII	28,1	I	26.6	II
29	93,55	1972–73	119,7	39,9	XII	35,6	III	24,4	I	19.8	II
30	96,77	1959–60	119,5	31,3	XII	31,1	I	30,0	III	27.1	II
Среднее			141,9	43,6	XII–7 I–2 III–1	37,4	III–4 I–3 XII–3	32,2	I–5 III–5	28,6	II–10
Принятое распределение, в % от сезонного стока			100	30,7	XII	26,4	III	22,7	I	20,2	II

Таблица А.21. Расчет внутрисезонного распределения стока для составного сезона «лето-осень» по маловодной группе лет (P > 66,7 %); р. Луга — ст. Толмачево (метод компоновки)

№ п/п	P %	в/х год	Сумма за сезон, млн. м^3	ЛЕТО				ОСЕНЬ					
				1		2		1		2		3	
				млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц	млн. м^3	месяц
21	67,74	1967–68	209,40	42,85	VII	32,14	VIII	61,17	XI	36,81	IX	36.43	X
22	70,97	1971–72	201,04	50,35	VII	34,02	VIII	43,29	XI	40,98	X	32.40	IX
23	74,19	1969–70	189,09	35,89	VII	30,27	VIII	47,69	XI	42,32	X	32.92	IX
24	77,42	1952–53	188,19	36,96	VII	35,35	VIII	53,14	IX	32,41	X	30.33	XI
25	80,65	1951–52	178,04	50,09	VII	38,03	VIII	31,34	X	29,29	IX	29.29	XI
26	83,87	1975–76	154,82	35,09	VII	30,80	VIII	32,94	X	30,84	XI	25.14	IX
27	87,10	1965–66	154,66	33,48	VIII	28,12	VII	32,41	X	31,10	IX	29.55	XI
28	90,32	1973–74	148,67	21,96	VII	19,02	VIII	45,88	XI	35,89	X	25.92	IX
29	93,55	1964–65	142,40	30,53	VII	25,18	VIII	34,47	XI	27,59	X	24.62	IX
30	96,77	1972–73	133,14	25,71	VII	20,36	VIII	33,96	XI	31,61	X	21.51	IX
Среднее			169,94	36,29	VII–9 VIII–1	29,33	VIII–9 VII–1	41,63	XI–6 X–3 IX–1	33,88	X–6 IX–3 XI–1	28,81	IX–6 XI–3 X–1
Принятое распределение, в % от сезонного стока			100	21,4	VII	17,3	VIII	24,5	XI	19,9	X	17,0	IX

Таблица А.22. Расчетное внутрисезонное распределения стока для маловодной группы лет ($P > 66{,}7$ %); р. Луга — ст. Толмачево (метод компоновки)

Размерность	ВЕСНА				ЛЕТО–ОСЕНЬ						ЗИМА				
	IV	**V**	**VI**	**За сезон**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**За сезон**	**XII**	**I**	**II**	**III**	**За сезон**
в %	52,4	35,3	12,3	100	21,4	17,3	17,0	19,9	24,5	100	30,7	22,7	20,2	26,4	100
млн. м^3	293	197	69	558	33,1	26,7	26,3	30,9	38,0	155	33,2	24,5	21,8	28,5	108

Таблица А.23. Расчетное распределение стока по месяцам и сезонам для водохозяйственного года обеспеченности $P = 90$ % р. Луга — ст. Толмачево (метод компоновки)

Единица измерения	Месячный сток												Годовой сток	Сезонный сток		
	IV	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**	**XI**	**XII**	**I**	**II**	**III**		**весна**	**лето-осень**	**зима**
млн. м^3	293	197	69	33,1	26,7	26,3	30,9	38,0	33,2	24,5	21,8	28,5	821	558	155	108
м^3/с	113	73.5	26.4	12.4	10.0	10.1	11.5	14.6	12.4	9.2	8.9	10.6	26.0			
в %	35.6	24.0	8.3	4.0	3.3	3.2	3.8	4.6	4.0	3.0	2.7	3.5	100	68	19	13

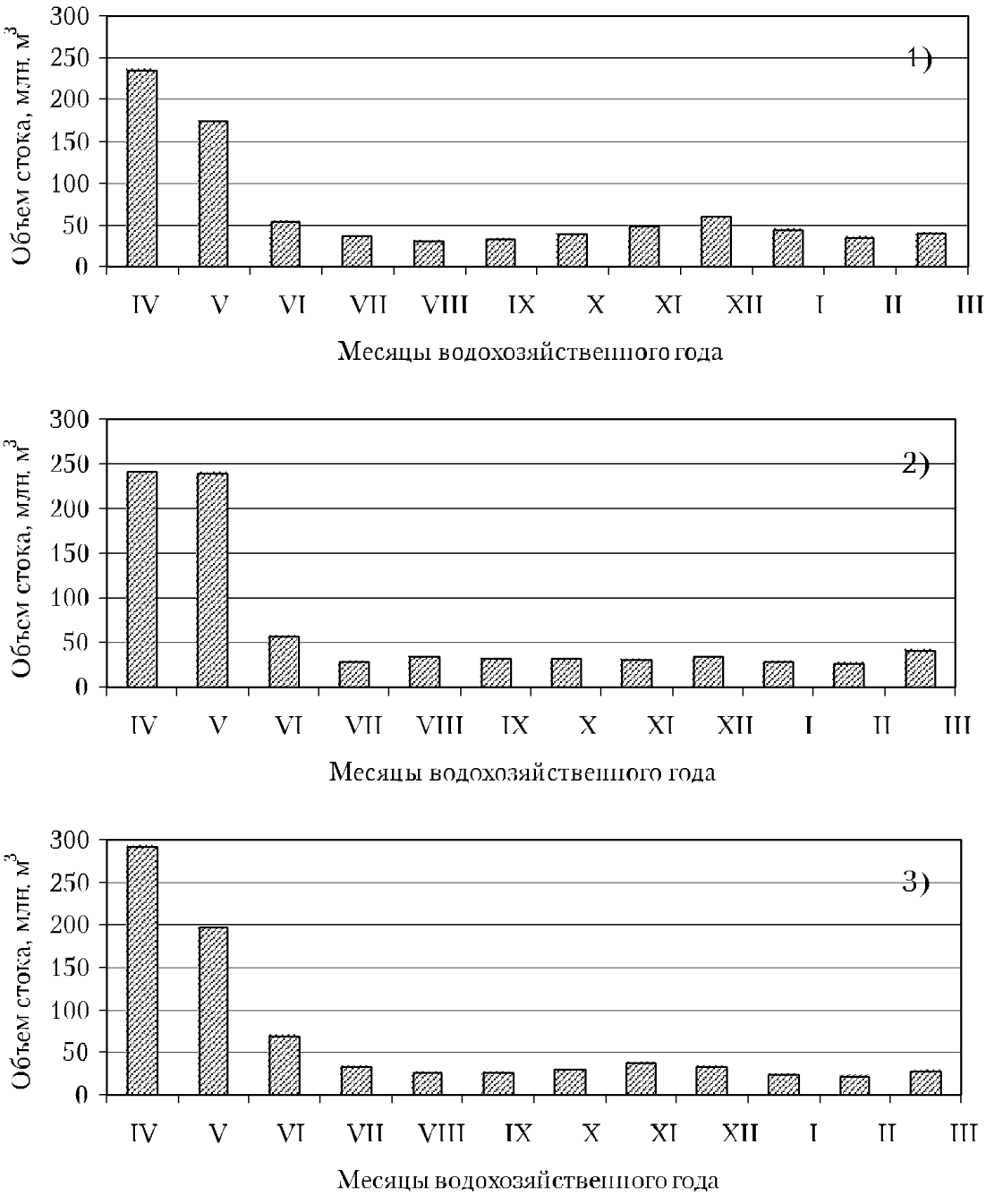

Рис. А.26. Расчетное внутригодовое распределение стока реки Луга — ст. Толмачево для года обеспеченностью $P = 90$ %; 1 — метод среднего распределения стока за годы характерной градации водности, 2 — метод реального года, 3 — метод компоновки

А.10. Расчет внутригодового распределения стока методом компоновки для лет маловодной и очень маловодной градаций водности

Расчет внутригодового распределения стока методом компоновки производится в соответствии с требованиями, изложенными СП [Свод, 2004]. Ниже дается пример расчета этим методом для р. Унжа — г. Макарьев за расчетный 67-летний период стоковых измерений для лет маловодной и очень маловодной градаций водности. В таблицах А.24–А.25 приводятся результаты расчета, характерные для отдельных его этапов.

В таблице А.24 даны результаты расчета сумм месячного стока воды ($\Sigma Q_{iмес}$) за водохозяйственный год, лимитирующие период, сезон и месяц для конкретных маловодных и очень маловодных лет.

Данные таблицы А.25 демонстрируют расчет абсолютного (в объемных единицах) и относительного (в % от объема стока за ВГ) распределения речного стока по водохозяйственным периодам и сезонам в годы маловодной и очень маловодной градаций (групп) водности.

В таблице А.26 приведен расчет внутрисезонного распределения речного стока ($\Sigma Q_{i\,мес}$) по месяцам ($Q_{i\,мес}$) на примере лимитирующего сезона. Аналогичным образом выполняются расчеты внутрисезонного распределения стока для других водохозяйственных периодов, в частности для нелимитирующих периода (НП) и сезона (НС). Результаты расчета внутрисезонного относительного (в % от сезонного) распределения месячного речного стока для маловодной группы водности сезонов даны в таблице А.27

Данные таблицы А.28 демонстрируют результаты расчета абсолютного (в 10^3 м^3) и относительного (в % от годового) внутригодового распределения месячного и сезонного стока для маловодного (75%-ной вероятности превышения) и для очень маловодного (95%-ной обеспеченности) водохозяйственных лет. В основу расчета положены относительные (в % от объема стока за ВГ) данные о межсезонном (таблица А.25) и внутрисезонном распределениях стока (данные таблиц А.26 и А.27), а также аналогичные данные для НП и НС и для других градаций водности, в частности, для группы очень маловодных лет. Этот расчет выполнен умножением относительных значений месячного стока, выраженных в % от объема стока соответствующего сезона (таблица А.24, на долю (%, деленный на 100) стока данного сезона в годовом (таблица А.25). Значения стока за водохозяйственный год 75 и 95%-ной вероятности превышения, использованные в таблице А.28, определены по соответствующей кривой обеспеченности.

Таблица А.24. Расчет сумм месячного стока воды ($\Sigma Q_{i\,мес}$) за водохозяйственный год, лимитирующие период, сезон и месяц для конкретных маловодных и очень маловодных лет

№ в порядке убывания	P,%	Водохозяйственный год (ВГ), IV–III			Лимитирующий период (ЛП), VII–III			Лимитирующий сезон (ЛС), XII–III			Лимитирующий месяц (ЛМ)		
		ВГ	$\Sigma Q_{i\,мес}$	$К_{вг}$	ЛП	$\Sigma Q_{i\,мес}$	$К_{лп}$	ЛС	$\Sigma Q_{i\,мес}$	$К_{лс}$	ЛМ	$\Sigma Q_{i\,мес}$	$К_{лм}$
46	67,8	1950–51	1548	0,82	1947–48	449	0,66	1916–17	141	0,80	1960–61	28,1	0,88
47	69,3	1948–49	1526	0,80	1943–44	445	0,66	1943–44	135	0,77	1955–56	27,8	0,86
48	70,8	1933–34	1522	0,80	1932–33	442	0,65	1939–40	132	0,75	1947–48	27,7	0,85
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
57	84,1	1930–31	1414	0,74	1933–34	370	0,55	1906–07	119	0,68	1937–38	25,6	0,79
58	85,6	1951–52	1357	0,72	1941–42	366	0,54	1907–08	117	0,67	1911–12	24,6	0,75
59	87,2	1907–08	1340	0,71	1937–38	364	0,54	1908–09	117	0,67	1910–11	24,5	0,76
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
64	94,5	1910–11	1205	0,64	1901–02	265	0,39	1941–42	89,4	0,51	1951–52	19,7	0,61
65	96,0	1960–61	1191	0,63	1944–45	265	0,39	1951–52	86,8	0,49	1944–45	18,5	0,57
66	97,5	1897–98	1156	0,61	1949–50	253	0,37	1944–45	83,2	0,47	1938–39	17,6	0,54
67	99,0	1937–38	955	0,50	1951–52	247	0,37	1949–50	77,0	0,44	1949–50	15,6	0,48
$\bar{Q}$ за все 67 лет			1896			676			176			32,5	
То же , в % от объема стока за ВГ			100			35,6			9,3			1,7	

Таблица А.25. Расчет абсолютного (в объемных единицах) и относительного (в % от объема стока за ВГ) межсезонного распределения речного стока в годы маловодной и очень маловодной градаций (групп) водности

Водохозяйственные периоды и сезоны	Месяцы	Средние многолетние значения		Группа водности (градация вероятностей превышения) стока за ВГ			
				маловодная		очень маловодная	
		$\Sigma Q_{i\,мес}$	в % от объема стока за ВГ	$\Sigma Q_{i\,мес}$	в % от объема стока за ВГ	$\Sigma Q_{i\,мес}$	в % от объема стока за ВГ
ВГ	IV–III	1896	100	1460	100	1155	100
НП	IV–VI	1220	64,4	1049	71,9	878	76,0
ЛП	VII–III	676	35,6	411	28,1	277	24,0
НС	VII–XI	500	26,3	283	19,3	182	15,8
ЛС	XII–III	176	9,3	128	8,8	94,8	8,2
Вариант расчета с учетом стока лимитирующего месяца (минимального месячного стока) заданной вероятности превышения (75% и 95%)							
ЛМ	II	32,5	1,7	26,5	1,8	20,0	1,7
Остальные месяцы ЛС	XII–I, III	143	7,6	102	7,0	74,8	6,5

Таблица А.26. Расчет внутрисезонного распределения речного стока ($\Sigma Q_{i\,мес}$) по месяцам ($Q_{i\,мес}$) на примере лимитирующего сезона

№ в порядке убывания сезонного стока	Лимитирующий сезон (ЛС)									
	ЛС	$\Sigma Q_{i\,мес}$ за ЛС	1		2		3		4	
			$Q_{i\,мес}$	месяц	$Q_{i\,мес}$	месяц	$Q_{i\,мес}$	месяц	$Q_{i\,мес}$	месяц
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
46	1916–17	140,5	38,6	XII	37,5	III	33,6	I	30,8	II
47	1943–44	135,1	34,8	I	34,6	II	33,8	XII	31,9	III
48	1939–40	132,3	56,8	XII	29,4	I	23,2	III	22,9	II
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
51	1912–13	127,9	37,2	XII	34,3	I	28,2	III	28,2	II
52	1946–47	126,1	42,3	XII	28,4	II	28,0	I	27,4	III
53	1955–56	125,1	39,1	XII	29,2	I	29,0	III	27,8	II
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
58	1907–08	117,4	32,5	III	30,1	II	28,0	I	26,8	XII
59	1908–09	117,2	32,0	III	28,9	XII	28,8	II	27,5	I
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
64	1941–42	89,4	25,7	XII	23,6	I	20,1	II	20,0	III
65	1951–52	86,8	24,1	II	22,3	I	20,7	XII	19,7	III
66	1944–45	83,2	25,2	III	20,0	II	19,5	I	18,5	XII
67	1949–50	77,0	24,5	XII	20,0	III	16,9	I	15,6	II
Итого по группе		2549	779	XII–15 I–1 II–1 III–5	630	XII–1 I–8 II–6 III–7	588	XII–2 I–9 II–5 III–6	553	XII–4 I–4 II–10 III–4
Принятое распределение в % от сезонного стока		100	30,6	XII	24,7	III	23,0	I	21,7	II

Таблица А.27. Внутрисезонное относительное (в % от сезонного) распределение месячного речного стока для маловодной группы водности сезонов

Нелимитирующий период (НП)				Нелимитирующий сезон (НС)						Лимитирующий сезон (ЛС)				
IV	V	VI	НП	VII	VIII	IX	X	XI	НС	XII	I	II	III	ЛС
27,2	57,7	15,1	100	27,0	16,7	12,9	25,5	17,9	100	30,6	23,0	21,7	24,7	100

Таблица А.28. Расчетное распределение стока по месяцам и сезонам года (в процентах от годового и м^3/сек) для маловодного (75% ной обеспеченности) и очень маловодного (95%-ной обеспеченности) водохозяйственных лет

Вид стока		Группа водности года			
		Маловодная (Р=75%)		Очень маловодная (Р=95%)	
		%	м^3/с	%	м^3/с
Месячный сток	IV	19.6	286	20.6	238
	V	41.5	605	43.9	507
	VI	10.8	158	11.5	133
	VII	5.2	76.2	4.3	49.5
	VIII	3.2	46.8	2.6	30.0
	IX	2.5	36.5	2.0	23.1
	X	4.9	71.7	4.1	47.3
	XI	3.5	51.3	2.8	32.3
	XII	2.7	39.4	2.5	28.9
	I	2.0	29.2	1.9	22.0
	II	1.9	27.6	1.8	20.8
	III	2.9	32.2	2.0	23.1
Сезонный сток	НП	71.0	350	76.0	293
	НС	19.3	56.5	15.8	36.4
	ЛС	8.8	32.1	8.2	23.7
Сток за ВГ		100	122	100	96.3

А. 11. Определение параметров n и А1 редукционной формулы (8.3) для расчета максимальных расходов весеннего половодья

Для территории Северо-Запада РФ требуется определить районный показатель редукции n и параметр A_1, учитывающий снижение интенсивности редукции модуля максимального стока с уменьшением площади водосбора.

Для решения этой задачи были использованы 104 ряда максимальных расходов весеннего половодья и такое же количество рядов слоев стока весеннего половодья для рек с площадями водосборов от 10 до 20000 км^2. Для каждого ряда были рассчитаны статистические параметры и определены максимальные расходы и слои стока обеспеченностью $P = 1$ %, соответственно $Q_{1\%}$ и $h_{1\%}$.

Переход от максимальных расходов весеннего половодья обеспеченностью $P = 1$ % к модулям стока ($q_{1\%}$, л/с км^2) осуществлялся по формуле

$$q_{1\%} = (Q_{1\%}/A)1000,$$

где A — площадь водосбора, км^2.

Дальнейший расчет сводится в таблицу А.29. По данным колонок 7 и 8 таблицы А.29 строилась районная редукционная зависимость (рисунок А.27), для которой определялись параметры уравнения линейной регрессии.

В данном случае уравнение линейной регрессии имеет вид: $y = -0{,}18\,x + 0{,}38$, следовательно, коэффициент редукции $n = 0{,}18$.

Таблица А.29. Вспомогательная таблица для построения районной редукционной зависимости для территории Северо-Запада РФ

№ п/п	Река — створ	A, км^2	$Q_{1\%}$, м^3/с	$q_{1\%}$, л/с км^2	$h_{1\%}$, мм	$\lg(q_{1\%}/h_{1\%})$	$\lg(A+1)$
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
1	Великая — д. Пятаново	20000	2410	120,5	184	–0,184	4,301
2	Исса — д. Визги	1410	222	157,5	204	–0,112	3,150
3	Сороть — д. Осинкино	3170	358	113,0	227	–0,302	3,501
4	Льста — д. Глазатово	122	41,2	337,3	298	0,054	2,090
5	Утроя — д. Большая Губа	2970	430	144,8	186	–0,108	3,473
6	Кудеб — д. Свериково	739	214	289,5	245	0,073	2,869
7	Пскова — д. Черняковицы	914	238	260,3	277	–0,027	2,961
8	рЛовать — д. Узкое	398	61,2	153,8	239	–0,191	2,601
...	...	...	...	...	...	...	...
101	Паша — д. Часовенское	5710	968	169,46	301	–0,249	3,757
102	Явосьма — д. Ушаково	742	147	198,52	296	–0,174	2,871
103	Капша — д. Еремина Гора	1560	244	156,64	317	–0,306	3,193

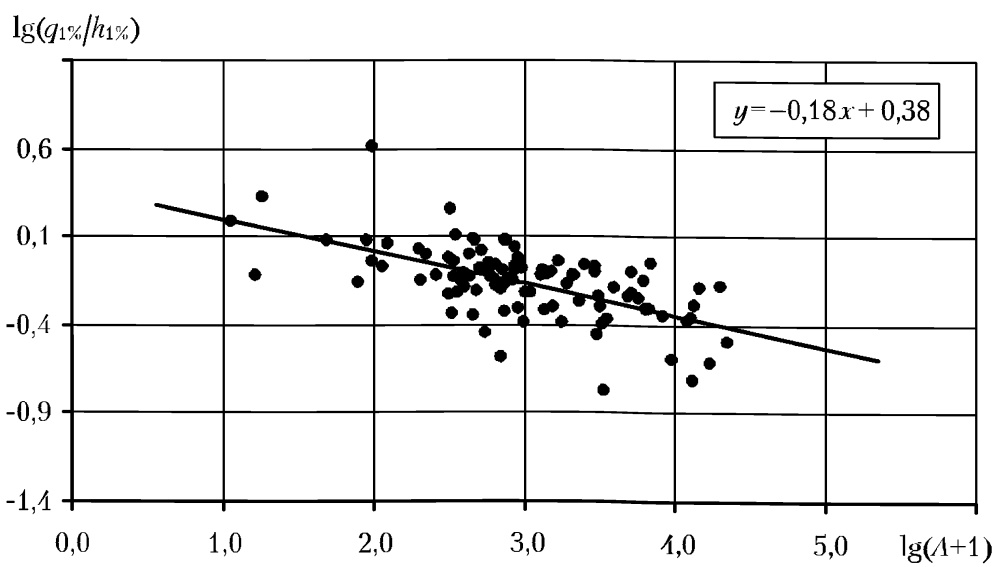

Рис. А.27. Районная редукционная зависимость максимального весеннего стока для рек Северо-Запада РФ.

Анализ зависимости показывает, что уменьшения редукции в зоне малых площадей водосборов не наблюдается, следовательно, параметр $A_1 = 1$.

Если уменьшение редукции в зоне малых площадей водосборов имеет место, то значение параметра A_1 определяется методом последовательных приближений. В этом случае следует варьировать значение параметра A_1 при фиксированном показателе редукции n, добиваясь минимального расхождения между фактическими значениями максимальных расходов и расходами, полученными по редукционной формуле. При этом в диапазоне малых площадей водосборов должно быть не менее 3–4 точек.

А.12. Расчет максимальных расходов весеннего половодья р. Перовка — д. Гончарово

Река Перовка протекает на Карельском перешейке вблизи города Выборга. Реки рассматриваемого района принадлежат к типу равнинных рек, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. Для рек района характерна одна волна половодья, форма гидрографа одновершинная. Основные гидрографические характеристики р. Перовка — д. Гончарово даны в таблице А.30.

Таблица А.30. Основные гидрографические характеристики р. Перовка — д. Гончарово

Река — створ	A, км^2	L, км	$I_р$, ‰	$I_в$, ‰	$f_{оз}$, %	$f_л$, %	$f_б$, %
Перовка — д. Гончарово	257	50	1,09	13,1	1,79	79	7,0

Требуется: рассчитать максимальные расходы и модули стока весеннего половодья вероятностью ежегодного превышения P = 0,1, 1, 2, 3, 5, 10, 25 %.

Расчет максимальных расходов весеннего половодья обеспеченности P % производился по редукционной формуле (8.3):

$$Q_{max,p} = \frac{K_0 h_p \mu_p A}{(A + A_1)^n} \delta \delta_1 \delta_2,$$

где h_p – слой стока весеннего половодья обеспеченностью P %; A — площадь водосбора, км^2; K_0 — коэффициент, характеризующий дружность весеннего половодья; μ_p — коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимального расхода воды; n — районный показатель редукции; A_1 — коэффициент, характеризующий снижение редукции в зоне малых площадей водосборов; $\delta, \delta_1, \delta_2$ — коэффициенты, учитывающие снижение модуля максимального стока соответственно под влиянием озерности, залесенности и заболоченности.

В соответствии с СП 33-101-2003 для определения значений параметров n и A_1 была построена редукционная зависимость для рек Северо-Запада РФ с привлечением длиннопериодных рядов наблюдений (см. Пример А.11). В результате получены расчетные значения n = 0,18 и A_1 = 1.

С целью определения параметров K_0 и h_p по формуле (8.3) были отобраны 4 реки-аналога со сходными условиями формирования стока и близкими гидрографическими характеристиками (таблица А.31).

Таблица А.31. Основные гидрографические характеристики рек-аналогов

Река — створ	A, км^2	L, км	$I_р$, ‰	$I_в$, ‰	$f_{оз}$, %	$f_л$, %	$f_б$, %
Селезневка — д. Лужайка	486	44	1,53	24,2	3,50	84	3,0
Петровка — п. Дружноселье	78,6	11	5,00	28,8	2,00	85	0,5
Гороховка — п. Токарево	700	86	0,76	23,0	9,00	68	3,0
Сестра — д. Белоостров	390	68	2,05	22,5	0,76	78	6,0

Расчетное значение коэффициента K_0 было определено как среднее по 4 рекам-аналогам. Для каждого аналога значение K_0 определялось обратным путем по формуле (8.3) при $\mu = 1$. Результаты расчета представлены в таблице А.32.

Таблица А.32. Расчет коэффициента K_0 рек-аналогов

Река — створ	A, км^2	$h_{1\%}$, мм	$q_{1\%}$, м^3/с км^2	δ	δ_1	δ_2	K_0
Селезневка — д. Лужайка	486	235	0,149	0,8	0,38	0,92	0,0070
Петровка — п. Дружноселье	78,6	281	0,190	0,8	0,38	0,99	0,0050
Гороховка — п. Токарево	700	212	0,056	0,8	0,39	0,92	0,0030
Сестра — д. Белоостров	390	249	0,192	1	0,38	0,86	0,0069
						Среднее K_0 =	0,006

Для получения слоев половодья расчетной обеспеченности реки Перовка были рассчитаны статистические характеристики рядов слоя половодья рек-аналогов (h_0 — среднее значение, C_v — коэффициент вариации, C_s — коэффициент асимметрии). Результаты расчета представлены в таблице А.33.

Таблица А.33. Основные статистические характеристики рядов слоя весеннего половодья рек-аналогов.

Река, пункт	A, км^2	h_0, мм	C_v	C_s	C_s/C_v	σ_h, %	σ_{Cv}, %
Селезневка — д. Лужайка	486	131	0,29	0,28	0,98	5,4	13,7
Петровка — п. Дружноселье	78,6	143	0,35	–0,06	–0,16	6,8	14,4
Гороховка — п. Токарево	700	117	0,30	0,89	2,99	5,9	14,3
Сестра — д. Белоостров	390	137	0,30	1,17	3,94	5,5	13,5
Среднее:		132	0,31		2,0		

Как видно из таблицы, среднеквадратическая погрешность среднего значения и коэффициента вариации не превышает 20 %. Следовательно, расчет можно считать надежным.

Учитывая, что расчетная река и реки-аналоги расположены в пределах относительно небольшой территории, статистические характеристики определены путем осреднения по рекам-аналогам: $h_0 = 132$ мм; $C_v = 0{,}31$; $C_s/C_v = 2$ (если расстояние между центрами бассейнов расчетной реки и рек-аналогов

значительное, то значения h_0 и C_v следует определять путем пространственной интерполяции).

С использованием полученных статистических характеристик были рассчитаны слои половодья различной обеспеченности для створа р. Перовка – д. Гончарово. В качестве расчетной кривой использована кривая обеспеченностей Крицкого-Менкеля. Результаты расчетов представлены в таблице А.34.

Таблица А.34. Расчетные слои половодья, мм в створе р. Перовка — д. Гончарово

Обеспеченность, *P* %						
0,1	1	2	3	5	10	25
296	245	232	220	206	187	156

Коэффициенты, учитывающие неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды, рассчитывались по группе рек исследуемого района с наиболее продолжительными рядами наблюдений по формуле (8.5)

$$m_{p\%}=(q_{p\%}h_{1\%})/(q_{1\%}h_{p\%}),$$

где $q_{P\%}$ и $q_{1\%}$ – модули максимального весеннего стока л/с км^2 соответственно обеспеченностью $P\%$ и 1%. Полученные значения для каждой обеспеченности осреднялись в пределах всего района (таблица А.35).

Таблица А.35. Значения коэффициента μ, учитывающего неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов воды

Обеспеченность, *P* %						
0,1	1	2	3	5	10	25
1,02	1,00	0,99	0,97	0,96	0,93	0,90

Учитывая, что относительная озерность водосбора менее 2 %, коэффициент δ принимался равным единице, δ = 1.

Коэффициент δ_1, учитывающий снижение максимальных расходов воды в залесенных бассейнах, определяют по формуле (8.7)

$$\delta_1=\alpha/(A_л+1)^{n'},$$

где n' и α – коэффициенты, зависящие от природной зоны, преобладающих на водосборе почво-грунтов и расположения леса на водосборе. В первом приближении коэффициенты n' и α можно определить по приложению В.5.

В данном случае: $\alpha_1 = 1$, $n_2 = 0{,}22$.

Коэффициент δ_2, учитывающий снижение максимальных расходов воды с заболоченных водосборов, определяют по формуле (8.8)

$$\delta_2=1-\beta\lg(0{,}1A_б+1),$$

где $A_б$ – относительная площадь болот, заболоченных лесов и лугов в бассейне реки, %; β – коэффициент, определяемый в зависимости от типа болот и механического состава почво-грунтов вокруг болот и заболоченных земель (со слоем

торфа не менее 30 см). В первом приближении коэффициент β можно определить по приложению В6. В данном случае: β = 0,7.

В таблице А.36 представлены параметры расчетной формулы (8.3), а в таблице А.37 расчетные расходы воды и модули стока р. Перовка — д. Гончарово

Таблица А.36. Параметры расчетной формулы

F, км^2	K_0	N	A_1	δ	δ_1	δ_2	h_0	Cv	Cs/Cv
257	0,006	0,18	1	1,00	0,38	0,84	132	0,31	2

Таблица А.37. Расчетные максимальные расходы воды и модули стока весеннего половодья р. Перовка — д. Гончарово

Характеристика	Обеспеченность, P %						
	0,1	1	2	3	5	10	25
Q м^3/с	54,8	44,4	41,5	38,6	35,9	31,5	25,6
q л/с км^2	213	173	161	150	140	123	99,4

А.13. Пример расчета гидрографа весеннего половодья р. Перовка — д. Гончарово

Требуется построить гидрограф, соответствующий максимальному расходу весеннего половодья обеспеченностью $P = 1$ %.

Река Перовка протекает на Карельском перешейке вблизи города Выборга. Реки рассматриваемого района принадлежат к типу равнинных рек, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. Для рек района характерна одна волна половодья, форма гидрографа одновершинная. При выполнении расчетов использованы результаты, полученные в примере А.12.

Расчет максимального мгновенного расхода воды $Q_{1\%}$ выполнен по редукционной формуле (см. пример А.12), $Q_{м,1\%} = 44{,}4$ м^3/с.

Переходный коэффициент от максимального мгновенного расхода к максимальному среднесуточному расходу ($Q_{1\%}$) в первом приближении принят по Приложению Б.7, $к_\tau = 1{,}1$.

Таким образом, расчетный однопроцентный среднесуточный расход реки Перовка в створе д. Гончарово равен

$$Q_{1\%} = Q_{м,1\%}/1{,}1 = 44{,}4/1{,}1 = 40{,}4 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для построения расчетного гидрографа в качестве реки-аналога выбрана река Селезневка — д. Лужайка (таблица А.38)

Таблица А.38. Основные гидрографические характеристики расчетной реки и реки-аналога

Река — створ	A, км^2	L, км	$I_р$, ‰	$I_в$, ‰	$f_{оз}$, %	$f_д$, %	$f_б$, %
Перовка — д. Гончарово	257	50	1,09	13,1	1,79	79	7,0
Селезневка — д. Лужайка	486	44	1,53	24,2	3,50	84	3,0

Расчет переходом от гидрографа-модели к расчетному гидрографу

В качестве гидрографа-модели на реке Селезневке выбран гидрограф весеннего половодья многоводного 1966 года (рисунок А.28) с обеспеченностью максимального расхода близкой к $P = 1\%$ ($Q_{м,1966} = 69{,}1$ м^3/с, $Q_{м,1\%} = 72{,}6$ м3/с).

Таким образом, переходный коэффициент для ординат гидрографа-модели к ординатам расчетного гидрографа определяется выражением $k_1 = Q_р/Q_м = 40{,}4/69{,}1 = 0{,}58$.

Ординаты расчетного гидрографа приводятся в таблице А.39.

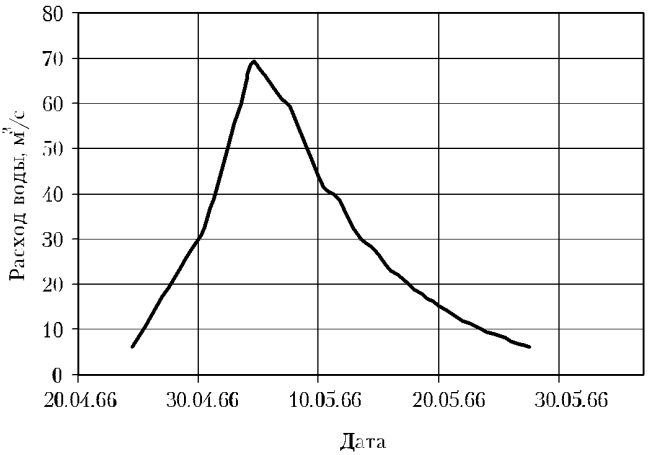

Рис. А.28. Гидрограф весеннего половодья на р. Селезневка — д. Лужайка, 1966 г.

Таблица А.39. Расчет ординат гидрографа реки Перовка — д. Гончарово переходом от гидрографа-модели к расчетному гидрографу

Дни от начала половодья	Расход, м^3/с		Дни от начала половодья	Расход, м^3/с	
	$Q_м$	$Q_р = Q_м * k_1$		$Q_м$	$Q_р = Q_м * k_1$
1	6,29	3,65	18	39,5	22,9
2	10,6	6,15	19	34,8	20,2
3	15,0	8,70	20	30,1	17,5
4	19,3	11,2	21	27,8	16,1
5	23,6	13,7	22	24,5	14,2
6	28,0	16,2	23	22,3	12,9
7	32,3	18,7	24	20,1	11,7
8	41,5	24,1	25	17,9	10,4
9	50,7	29,4	26	16,2	9,40
10	59,9	34,7	27	14,5	8,41
11	69,1	40,1	28	12,8	7,42
12	65,9	38,2	29	11,1	6,44
13	62,6	36,3	30	10,0	5,80
14	59,3	34,4	31	9,00	5,22
15	53,3	30,9	32	8,00	4,64
16	47,2	27,4	33	7,00	4,06
17	41,2	23,9	34	6,20	3,60

Расчет гидрографа по уравнению Гудрича

В этом случае форма гидрографа схематизируется по уравнению

$$y = 10^{-a\frac{(1-x)^2}{x}}. \qquad (A.1)$$

где, y — ординаты расчетного гидрографа Q_i, выраженные в долях от максимального среднесуточного расхода воды расчетной обеспеченности; абсцисса расчетного гидрографа, выраженная в долях от продолжительности подъема паводка $t_п$; a — параметр, зависящий от коэффициента несимметричности гидрографа K_S.

По реке-аналогу определяется значение коэффициента несимметричности гидрографа 1966 года:

$$K_S = h_п/h = 0{,}36,$$

где $h_п$ — слой стока за период подъема половодья; h — общий слой половодья.

По приложению Б.8 определяются коэффициент полноты стока λ и параметр a:

$$\lambda = 1{,}0;\ a = 1{,}52.$$

Определяется слой половодья реки Перовка в створе д. Гончарово обеспеченностью 1 % (см. пример А.12), $h_{1\%} = 245$ мм.

Определяется максимальный среднесуточный модуль стока весеннего половодья обеспеченностью 1% реки Перовка в створе д. Гончарово:

$$q_{1\%} = Q_{1\%}/A = 40{,}4/257 = 0{,}157\ м^3/с\ км^2$$

Определяется условная продолжительность подъема половодья:

$$t_п = 0{,}0116\lambda h_{p\%} / q_{p\%} = 0{,}0116 \cdot 1{,}0 \cdot 245/0{,}157 = 18\ сут.$$

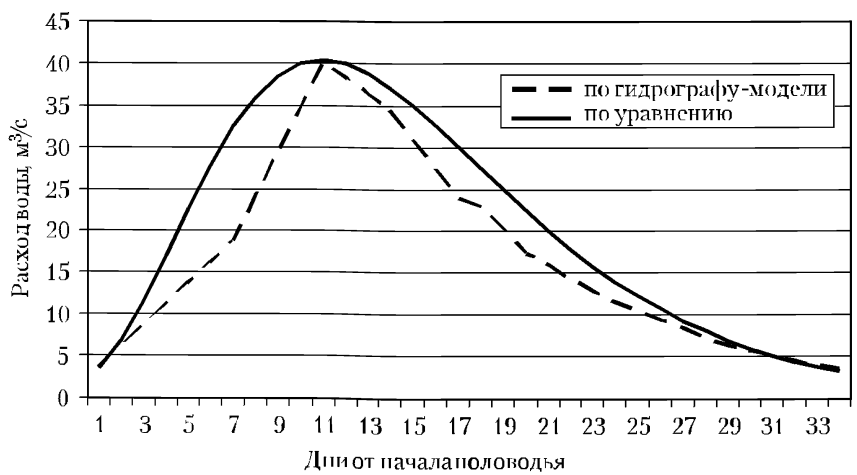

Рис. А.29. Расчетные гидрографы весеннего половодья реки Перовка — д. Гончарово

Таблица А.40. Расчет ординат гидрографа реки Перовка — д. Гончарово по уравнению (А.1)

Дни от начала половодья	$x = t_i/t_п$	y_i по уравнению (1)	$Q_i = y_i\, Q_{1\%}$	Дни от начала половодья	$x = t_i/t_п$	y_i по уравнению (1)	$Q_i = y_i\, Q_{1\%}$
1	0,06	0,00	0,00	23	1,28	0,81	32,7
2	0,11	0,00	0,00	24	1,33	0,75	30,2
3	0,17	0,00	0,00	25	1,39	0,68	27,6
4	0,22	0,00	0,00	26	1,44	0,62	25,0
5	0,28	0,00	0,06	27	1,50	0,56	22,5
6	0,33	0,01	0,38	28	1,56	0,50	20,2
7	0,39	0,03	1,40	29	1,61	0,44	18,0
8	0,44	0,09	3,55	30	1,67	0,39	15,9
9	0,50	0,17	7,02	31	1,72	0,35	14,0
10	0,56	0,29	11,6	32	1,78	0,30	12,3
11	0,61	0,42	17,0	33	1,83	0,27	10,7
12	0,67	0,56	22,5	34	1,89	0,23	9,34
13	0,72	0,69	27,8	35	1,94	0,20	8,11
14	0,78	0,80	32,4	36	2,00	0,17	7,02
15	0,83	0,89	36,0	37	2,06	0,15	6,06
16	0,89	0,95	38,5	38	2,11	0,13	5,22
17	0,94	0,99	39,9	39	2,17	0,11	4,48
18	1,00	1,00	40,4	40	2,22	0,10	3,84
19	1,06	0,99	40,0	41	2,28	0,08	3,29
20	1,11	0,96	38,9	42	2,33	0,07	2,81
21	1,17	0,92	37,2	43	2,39	0,06	2,39
22	1,22	0,87	35,1	44	2,44	0,05	2,04

Дальнейший расчет выполняется по уравнению (А.1). Ординаты расчетного гидрографа даны в таблице А.40. Вместо уравнения (А.1) можно использовать относительные ординаты расчетного гидрографа, представленные в таблице Б.10 СП 33-101-2003.

На рисунке А.29 приводятся расчетные гидрографы, полученные по гидрографу-модели и по уравнению (А.1). Для удобства сопоставления гидрографов время наступления максимума принято одно и то же.

А.14. Расчет минимального 30-суточного стока

Пример основан на применении алгоритма расчета, приведенного в разделе 9 настоящих Рекомендаций.

Водосбор реки Видлица входит в бассейн Ладожского озера. В замыкающем створе с.Большие Горки имеет площадь водосбора 997 км^2. По данным гидрометрических наблюдений на десяти окружающих реках с площадями водосборов от 100 км^2 до 3000 км^2, находящихся в сходных физико-географических условиях,

строится график $q_{30}=f(A)$ для летне-осеннего сезона. На графике нижняя огибающая линия эмпирических точек изменяет свое наклонное положение на горизонтальное в зоне 1200 км^2. Следовательно, река относится к категории малых.

По данным тех же пунктов наблюдения строится график $Q_{30_{80\%}}=f(A)$ для летне-осеннего сезона.

График позволяет определить средние по району значения параметра b и коэффициента m. Осредняющая эмпирические точки линия связи выходит из нулевой точки, следовательно, параметр A_1 равен нулю. Озерность и заболоченность водосбора незначительная. Поэтому величину минимального 30-суточного стока 80%-ной обеспеченности можно рассчитать по формуле $Q_{30_{80\%}}=bA^m$. Минимальный 30-суточный сток иной обеспеченности определяется по выражению $Qp_{\%} = \lambda p\% Q_{30_{80\%}}$.

Для расчета зимнего минимального стока производится аналогичная работа.

А.15. Расчет минимального стока малых рек при наличии эпизодических и кратковременных экспедиционных наблюдений

В большинстве районов России данные режимных наблюдений на малых водотоках отсутствуют, то реализовать подходы, изложенные в СП [Свод, 2004] или раздела 9 настоящих Рекомендаций не представляется возможным. Вместе с тем, нередко имеются данные ранее выполненных эпизодических (разовых) наблюдений, которые содержатся в архивах Госгидрометфонда, изыскательских, проектных и других организациях. Ниже дается пример, как можно использовать эти разрозненные данные для расчетов минимального стока.

Пример: необходимо рассчитать минимальный 30-ти суточный зимний и летний сток р.Б.Хэяхя — левого притока р.Таз на участке проектируемого водозабора для объектов газового месторождения. В гидрологическом отношении водоток является неизученным. Стандартные режимные наблюдения Гидрометслужбы за стоком рек на сопредельной территории проводились только на больших реках Надыме, Пуре и Тазе.

На малых реках в северных районах Западной Сибири с середины 70-х годов работала экспедиция ГУ «ГГИ», которой выполнялись стационарные гидрологические наблюдения на малых реках на Медвежьем месторождении (1973–1975 гг.), в районе пос.Газовский (1971 г.), Губкинском месторождении (1978–1980 гг.), Комсомольском месторождении (1976–1977 гг.), месторождении им.Муравленко (1983–1992 гг.). Эпизодические гидрологические работы выполнялись на Русско-Речинском м-е, Русском, Ямбургском, Еньяхинском, Северо-Уренгойском, Уренгойском и Северо-Губкинском месторождениях. Эти данные хранятся в фондах ГУ «ГГИ» и могут быть использованы при определении минимального стока р.Б.Хэяхи.

В соответствие СП [Свод, 2004], в пункте проектирования обязательно должны быть проведены гидрологические изыскания для повышения точности и надежности расчетов. ГУ «ГГИ» выполнил 5 гидрометрических съемок на реке Большая Хэяха в зимнюю и летнюю межень. Всего измерено на 6 створах 15 расходов воды, из них в летнюю межень — 12, зимнюю — 3.

Полевые измерения выполнены не только в расчетном створе, но и на других участках реки и ее притоках, так как при использовании рассматриваемого подхода важно установить закономерности изменения минимального стока с площадью водосбора исследуемой реки. Это повышает точность определения минимального стока в расчетном створе, так как позволяет более точно учесть местные особенности формирования подземного питания реки и минимального речного стока.

Рассматриваемый методический подход, основан на выявлении связи изменения меженного стока с площадью водосбора рек в годы различной водности. Суть его состоит в том, что, зная региональную закономерность изменения параметров этой связи в годы разной водности можно решить обратную задачу: определить водность года в который проведены полевые работы и установлена связь минимального стока с площадью водосбора.

Для выявления описанной связи использованы результаты многолетних гидрологических работ ГУ «ГГИ» на севере Западной Сибири, указанных выше. По этим данным определены параметры уравнения вида А.2 (таблица А.41):

$$Q = aA^m, \qquad (А.2)$$

Параметр a в уравнении (А.2) зависит от водности года, а m-отражает характер изменения подземного питания рек с изменением размера их водосбора и, соответственно, с глубиной вреза. Так как геология и гидрогеологические условия в многолетнем разрезе меняются мало, то параметр m остается постоянным для однородного по этим условиям района, но разным для зимней и летней межени. Зимой в этих районах на сток малых рек оказывает влияние изменение пропускной способности русла реки под ледяным покровом.

В качестве характеристики водности принят модульный коэффициент рассчитанный по рекам-аналогам р. Пяку Пур — с. Тарко-Слае и Надым — г. Надым по уравнению:

$$K_{(\text{зим, летн})} = Q_{\text{мин. 30-ти сут. (зим, летн)}} / Q_{\text{сренд. мин. 30-ти сут. (зим, летн)}}, \qquad (А.3)$$

где $Q_{\text{мин. 30-ти сут. (зим, летн)}}$ минимальный 30-ти суточный зимний или летний расход воды в реке-аналоге за конкретный год; $Q_{\text{сренд. мин. 30-ти сут. (зим, летн)}}$ — средний многолетний минимальный 30-ти суточный зимний или летний расход воды в реке-аналоге. Результаты расчетов приведены в таблице А.41.

Таблица А.41 — Параметры уравнения (А.2)

год	Летняя межень		год	Зимняя межень	
	a	*m*		*a*	*m*
1976	5,3E-05	1,58	1981	0,000229	1,26
1977	9,4E-05	1,53	1982	0,000209	1,27
1978	0,00037	1,41	1983	0,000458	1,16
1979	0,00082	1,28	1984	0,000275	1,24
1984	0,00022	1,49	1986	0,000323	1,19
1985	0,00038	1,44	1987	0,000106	1,36
1986	0,00053	1,42	1989	0,000329	1,22
1989	0,00015	1,42			

В качестве аналогов приняты два поста (р. Пяку-Пур — с. Тарко-Сале; р. Надым — г. Надым) с наименьшими площадями водосбора из всех, расположенных вблизи. Для зимней межени принят один аналог — р. Пяку-Пур, так как анализ показал, что на р. Надым, удаленной на большее расстояние от исследуемых рек, зимний сток изменяется не синхронно с со стоком в р. Пяку-Пур. Средний многолетний зимний минимальный 30-ти суточный расход воды в р. Пяку-Пур –с Тарко-Сале равен 89,6 м^3/с. Средний многолетний летний минимальный 30-ти суточный расход воды в р. Пяку-Пур — с. Тарко-Сале составляет — 295 м^3/с, в р. Надым — г. Надым — 402 м^3/с. Результаты расчета модульных коэффициентов водности летней и зимней межени в годы экспедиционных гидрологических наблюдений ГУ «ГГИ» приведены в таблицах А.42 и А.43.

Таблица А.42. Минимальный зимний 30-ти суточный расход воды (Q) и модульный коэффициент водности в этот период ($К_{зим}$) — р. Пяку-Пур (F=34300 км^2)

Год	Q, м^3/с	К $_{зим}$
1980	98,4	1,09
1981	101,0	1,12
1982	68,5	0,76
1983	88,7	0,98
1984	86,9	0,96
1985	85,8	0,95
1986	93,8	1,04
1987	103,0	1,14
1989	76,1	0,84
1990	75,4	0,83

Таблица А.43. Минимальный летний 30-ти суточный расход воды (Q) и модульный коэффициент водности в этот период ($K_{летн}$)

Годы	р. Пяку-Пур (F=34300 км^2)		р. Надым — г. Надым (F=48000 км^2)		Средний $K_{летн}$
	Q, м^3 /с	**К$_{летн}$**	**Q, м^3 /с**	**К$_{летн}$**	
1975	361	1,26	720	1,84	1,55
1976	146	0,51	321	0,82	0,66
1977	173	0,60	214	0,55	0,58
1978	307	1,07	380	0,97	1,02
1979	361	1,26	492	1,26	1,26
1980	366	1,28	308	0,79	1,03
1981	333	1,16	379	0,97	1,06
1982	200	0,70	372	0,95	0,82
1983	227	0,79	226	0,58	0,68
1984	300	1,05	432	1,10	1,08
1985	382	1,33	517	1,32	1,33
1986	409	1,43	555	1,42	1,42
1987	317	1,11	388	0,99	1,05
1988	179	0,62	287	0,73	0,68
1989	201	0,70	252	0,64	0,67

По установленным параметрам уравнения (А.2), приведенным в таблице А.41 и данным о водности меженных периодов (таблицы А.42 и А.43) установлены их связи для летне-осенней (рисунок А.30) и зимней межени (рисунок А.31).

Далее установлены уравнения связи измеренных меженных расходов воды на реке Б. Хэяха и ее притоках с площадью водосбора (рисунок А.32). По полученным параметрам a уравнения вида (А.2) для каждой межени определена ее водность с помощью графиков на рисунках. А.30 и А.31 и рассчитаны средние многолетние расходы воды (таблицы А.44–А.47) по уравнению:

$$Q_{\text{сренд. мин. 30-ти сут. (зим, летн)}} = Q_{\text{измереный мин. (зим, летн)}} \times K_{\text{(зим, летн.)}}, \qquad \text{(А.4)}$$

В данном случае измеренный расход трактуется как минимальный 30-ти суточный. Это, возможно, занижает результаты расчета и дает некоторый запас надежности полученных значений в условиях слабой гидрологической из-

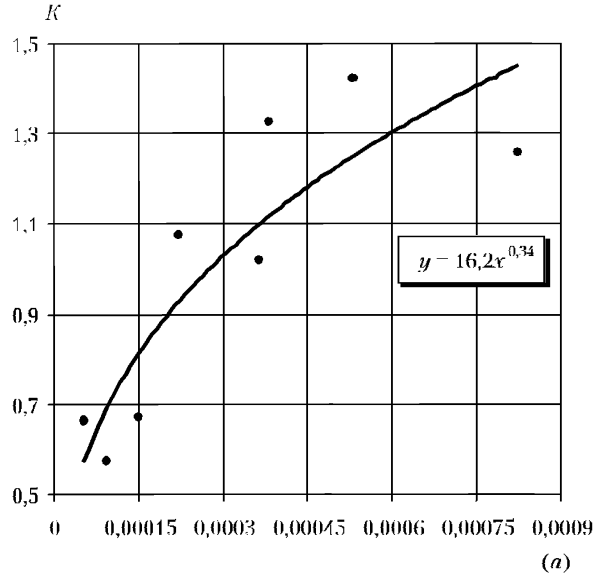

Рис. А.30. Связь параметра (а) с коэффициентом водности минимального летнего 30-ти суточного стока

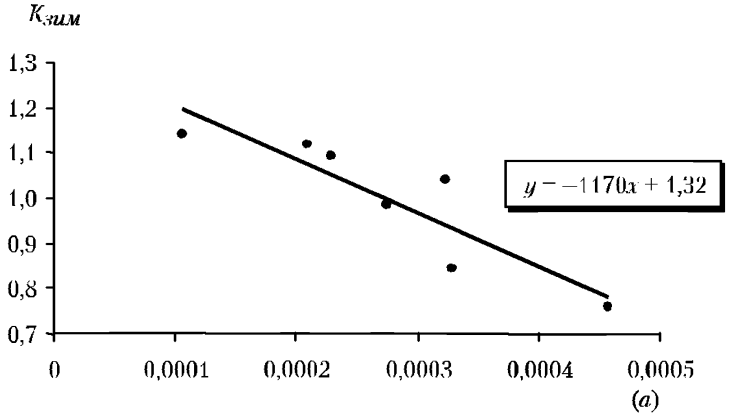

Рис. А.31. Связь параметра (а) с коэффициентом водности минимального зимнего 30-ти суточного стока

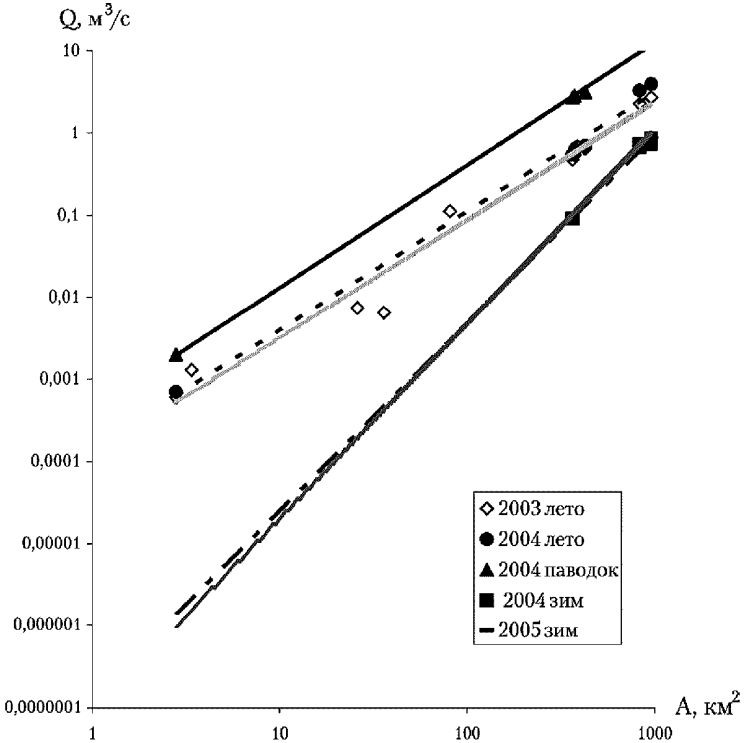

Рис. А.32. Связь измеренных расходов воды на р. Б. Хэяхе и ее притоках с площадью водосбора

ученности. Отметим так же, что реки зоны бугристых болот, где расположена р. Б. Хэяха, характеризуются глубокими и устойчивыми меженными периодами. Поэтому существенного отличия суточного от 30-ти суточного минимального стока нет. Кроме того, точность определения зимнего стока в районах со значительной толщиной льда (2–3 м) мала, а погрешность самих измерений стока превышает 15%.

Таблица А.44. Измеренный и расчетный средний многолетний минимальный зимний расход воды, м^3/с

Створ	Площадь водосбора, км^2	Измеренный в 2004 г.	Средний многолетний
р. Б. Хэяха	365	0,091	0,077

О точности полученных результатов можно судить на основе сравнения их с результатами расчетов, не учитывающих полевые гидрологические работы на исследуемой реке. В последнем случае расчет минимальных расходов в расчетном створе осуществляется по региональным методам расчета гидрологических характеристик, основанным на результатах обобщения данных гидрометеорологических наблюдений на сопредельной территории. Для расчета рекомендуется следующее уравнение:

Таблица А.45. Измеренный и расчетный средний многолетний минимальный летний расход воды, м^3/с

Створ	Площадь водосбора, км^2	2003 г.		2004 г.		Принятый средний многолетний расход воды
		Измеренный	Расчетный средний многолет.	Измеренный	Расчетный средний многолет.	
1 — ручей б/н (пр.приток)	3,4	0,0013	0,0017			0,002
2 — р. Б.Хэяха	365	0,477	0,64	0,544	0,68	0,658
3 — р.Б.Хэяха	375	0,543	0,72	0,627	0,78	0,754
4 — р.Хасуйяха (пр.приток)	36	0,0065	0,0087			0,012
5 — ручей б/н (пр.приток)	2,8	0,0006	0,0008			0,001
6 — р.Б.Хэяха	426	0,646	0,86	0,698	0,87	0,867

Для расчета минимальных расходов воды 95% и 98% обеспеченности приняты параметры кривой распределения по рекам-аналогам р. Пяку-Пур и р. Надым (зима — Cv=0.15; Cs/Cv=–2.5; лето — Cv=0,28; Cs/Cv=1,5).

Таблица А.46. Минимальные 30-суточные расходы воды р. Б. Хэяхи, определенные с учетом полевых исследований 2003–2005 гг., м^3/с

Река-пост	Площадь водосбора, км^2	летне-осеннний			зимний		
		средний	95%	98%	средний	95%	98%
Б. Хэяха-2	365	0,658	0,388	0,32	0,077	0,058	0,049

$$Q_{80\%} = 10^{-3} \cdot a(A + f_0)^m, \qquad (А.5)$$

где $Q_{80\%}$ — минимальный 30-суточный расход воды вероятностью превышения 80% для зимнего и летне-осеннего периода, м^3/с; A — площадь водосбора реки, км^2; a, m, f_0 — параметры редукции, определяемые в зависимости от географических районов. Уточненные по данным экспедиционных исследований 70–80-х годов [Марков М.Л. и др., 2004] параметры a, n, f_0 следующие для летне-осеннего стока:

$$Q_{80\%} = 0{,}66 \cdot 10^{-3} \cdot F^{1{,}30} \qquad (А.6)$$

Для зимнего стока принят модуль 80% по [Рекомендации, 1991], равный 0,4 л/(с км^2)

Рассчитанные расходы минимального стока воды для замыкающих створов приведены в таблице А.47. Переходные коэффициенты от 80% обеспеченности к другим определены для данного примера с учетом [Пособие, 1984].

Таблица А.47. Минимальные 30-суточные расходы воды р.Б.Хэяхи, определенные без учета полевых исследований 2003–2005 гг., м^3/с

Река-пост	Площадь водосбора, км^2	летне-осенняя межень			зимняя межень		
		средний	80%	95%	средний	80%	95%
Б. Хэяха -2	365	1,91	1,41	1,13	0,163	0,146	0,117

Полученные результаты расчета меженных расходов воды двумя способами (см. таблицы. А.46 и А.47) существенно отличаются, особенно в маловодные годы. Первый подход дает более низкие значения. Учитывая, что в нем использовано больше информации и натурных данных по реке Б. Хэяхе, то его результаты могут быть приняты, как более надежные.

А.16. Расчет минимального летнего 30-ти суточного стока ежегодной вероятности превышения 95% озерной реки

Требуется определить минимальный летний 30-ти суточный сток вероятностью превышения 95% (данные наблюдений отсутствуют) по р. Каменка (приток р. Цаги-Кольский по-ов) в устье. Площадь водосбора реки составляет – 67 км^2. Река протекает через озеро площадью 4,1 км.

Расчет рекомендуется выполнять при отсутствии данных наблюдений по следующему уравнению:

$$Q_{p\%} = b(A \pm A_1)^m \delta_1 \delta_2 \lambda_{p\%}.$$

Районные параметры b и m не выявлены для рассматриваемой территории из-за отсутствия достаточного количества пунктов наблюдений со сходными природными условиями формирования стока (различия в высоте, озерности, площади водосборов и т. п.). Поэтому расчет минимального стока без учета озерности (левая часть уравнения: $b(A \pm A_1)^m$) выполнен на основе данных по ближайшей реке-аналогу: р. Нивка – устье (А=204 км^2). На основе статистического анализа выборок ежегодных значений минимального стока по этой реке минимальный 30-ти суточный расход воды 95% превышения составляет $Q_{95\%\,a}$ =0,073 м^3/с или q_{30a} =0,36 л/(с км^2) (Cv=029; Cs=0; $Q_{0\,a}$ =0,14 м^3/с). Таким образом, определяемая характеристика для р.Каменки без учета озерности составит $Q_{95\%}$= 0,36·67/1000=0,024 м^3/с.

Расчет дополнительного притока в реку за счет сработки озера в меженный период выполняется по уравнению:

$$Q_{оз\,p\%} = 0{,}84\, h_{30} F_{оз}/T,$$

в следующей последовательности:

1. Определяем амплитуду изменения уровня воды в озере за меженный 30-ти суточный период по уравнению, выведенному для маловодного периода:

$$h_{30} = 0{,}0236\, H_{оз} + 0{,}0054,$$

где $H_{оз}$ – средняя многолетняя амплитуда колебания уровня воды в озере, см; рассчитывается в зависимости от его водосборной площади по уравнению:

$$H_{оз} = 85{,}3\, A_{оз}^{0{,}096},$$

где $A_{оз}$ – площадь водосбора озера = 20 км^2.

$$H_{оз} = 85{,}3 \cdot 20^{0{,}096} = 114 \text{ см} = 1{,}14 \text{ м}$$

$$h_{30} = 0{,}0236 \cdot 1{,}14 + 0{,}0054 = 0{,}03 \text{ м}$$

2. Определяем $Q_{95\%\,оз}$

$$Q_{95\%\,оз} = (0{,}84 \cdot 0{,}03 \cdot 4{,}1 \cdot 10^6/(30 \cdot 86400)) = 0{,}040 \text{ м}^3/\text{с}$$

3. Определяем минимальный летний 30-ти суточный сток ежегодной вероятности превышения 95% для р. Каменки:

$$Q_{95\%} = 0{,}024 + 0{,}040 = 0{,}064 \text{ м}^3/\text{с},$$

Расчет среднего многолетнего минимального 30-ти суточного стока производится по приведенной выше схеме, но амплитуда изменения уровня воды в озере определяется по следующему выражению:

$$h_{30} = 0{,}0411\, H_{оз} + 0{,}0052 = 0{,}0411 \cdot 1{,}14 + 0{,}0052 = 0{,}052 \text{ м}$$

$$Q_{ср.\,многл} = 0{,}046 + 0{,}84 \cdot 0{,}052 \cdot 4{,}1 \cdot 10^6/86400/30 = 0{,}115 \text{ м}^3/\text{с}$$

Таким образом, минимальный 30-ти суточный расход на р.Каменке в маловодный год за счет регулирующего влияния озера площадью 4,1 км^2 , расположенного в среднем течении реки, повышается почти в 2,5 раза, а в средний по водности год в 1,5 раз.

А.17. Расчет максимального заторного уровня воды

Требуется произвести расчет максимального заторного уровня воды 1% вероятности превышения для р. Холодной у с. Новое (многолетние гидрометрические наблюдения не производились).

Исходные данные: в ходе полевых исследований установлено, что заторы льда образуются в хвосте сохраняющихся до весны зажоров, наибольший расход весеннего половодья 1% вероятности превышения, рассчитанный по формуле при отсутствии данных наблюдений, равен 1800 м^3/с. На ближайших реках – аналогах отношение $Q_{з,\,1\%}$ к $Q_{1\%}$ составляет 0,65. Координаты кривых $Q = f(H)$, $B = f(H)$, $h = f(H)$ и $I = f(H)$, определенные путем промеров глубин, нивелирования береговых склонов и продольного уклона водной поверхности с последующим расчетом по формуле Шези, приведены в таблице А.48:

Таблица А.48. Координаты кривых $Q=f(H)$, $B=f(H)$, $h=f(H)$ и $I=f(H)$

H, см	500	600	700	800	900
Q, м^3/с	114	399	788	1180	1800
B, м	144	160	176	192	208
h, м	2,8	3,4	4,0	4,7	5,3
I, ‰	0,00001	0,00005	0,00013	0,00024	0,00034

По данным реки-аналога вычислим значение заторообразующего расхода

$$Q_{з1\%} = 0{,}65 \times 1800 = 1170 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Значению $Q_{з,1\%}$ = 1170 м^3/с соответствуют следующие значения бытового уровня, ширины реки, глубины и уклона водной поверхности:

$H_{Qз}$ = 800 см,

$B_{Qз}$ = 192 м,

$h_{Qз}$=4,7 м,

$I_{Qз}$=0,00024.

Заторный максимум уровня воды рассчитываем по формуле (7.51) СП [Свод, 2004] сначала при $\Delta B/B_{Qз}$=0

$$H_{з,p\%} = (\mu I^{0,3}_{Qз,p\%} - 1)h_{Qз,p\%} + H_{Qз,p\%} = (22{,}2 \times 0{,}00024^{0,3} - 1) \times 470 + 800 = 1186 \text{ см}.$$

Рассчитанному значению уровня соответствует ширина реки, равная 265 м. Тогда при $\Delta B/B_{Qз}$=0,38 получим новое уточненное значение μ и $H_{з,p\%}$, т.е.

$$H_{з,p\%} = (15{,}2 \times 0{,}00024^{0,3} - 1) \times 470 + 800 = 916 \text{ см}.$$

И далее расчет ведется методом последовательного приближения до тех пор, пока точка с координатами заданного В и вычисленного $H_{з,p\%}$ не попадет на кривую $B = f(H)$, что имеет место в рассматриваемом случае при B=230 м и $\Delta B/B_{Qз}$ =0,20

$$H_{з,p\%} = (18{,}2 \times 0{,}00024^{0,3} - 1) \times 470 + 800 = 1031 \text{ см}.$$

А.18. Расчет уровня озера

Требуется рассчитать наивысший уровень воды озера Глубокое в восточной его части повторяемостью 1 раз в 25 лет. Озеро находится на севере ЕТР (данные наблюдений отсутствуют). Исходные данные: площадь водосбора озера 58,1 км^2, площадь зеркала 6,5 км^2. Из озера вытекает ручей Быстрый. Порог стока имеет отметку 2,65м БС. Объем озера в бессточный период относительно постоянен. Ветер над озером преимущественно западного направления. Максимальная его скорость 25 м/с. Озеро вытянуто с юга на север и имеет длину 5 км при ширине 1 км.

Данные расчета элементов водного баланса озера показывают, что осадки, выпадающие на поверхность озера в течение гидрологического года, не превышают 15% приходной части баланса и равны испарению, поэтому уровенный режим озера находится в прямой зависимости от весеннего притока воды в него. В связи с этим для расчета среднего многолетнего подъема уровня используем формулу (7.53) [Свод,2004] при β=32.

$$\overline{\Delta H} = \beta(A/\Omega)^{0,5} = 32(58{,}1/6{,}5)^{0,5} = 96 \text{ см}.$$

Поскольку по данным наблюдений на ближайших озерах-аналогах коэффициент изменчивости $\overline{\Delta H}$ равен 1, то при Cs=0 ордината кривой распределения, соответствующая 4%, y = 2,77

$$H_{4\%} = (y \times Cv + 1{,}0)\ \overline{\Delta H} + H_{в.н} + H_{п.ст} = (2{,}77 \times 1 + 1{,}0) \times 0{,}96 + 2{,}65 = 6{,}26 \text{ м БС}.$$

А.19. Расчет наивысшего уровня воды обеспеченностью 1%, 5%, 10%, на участке проектируемого мостового перехода на р. Лена

Требуется рассчитать наивысший уровень воды обеспеченностью 1%, 5%, 10%, на участке проектируемого мостового перехода на р. Лена. Участок бесприточный. Наблюдения за уровенным режимом реки на участке 1457–1574 км от устья, систематически проводятся с 1927г по настоящее время на гидрологических постах Покровск (1574 км), с 1937 г. Табага (1527 км), с 1934 г. Якутск (1491 км), и с 1935 г Кангалассы (1457 км). В непосредственной близости от намечаемого створа мостового перехода находится водомерный пост у с. Табага (в 2 км ниже по течению).

Общие положения и требования к организации и порядку проведения инженерных гидрологических расчетов содержаться в Своде правил [Свод, 2004].

Прежде чем начать статистическую обработку исходных данных наблюдений необходимо осуществить их приведение к естественному режиму, если данные были нарушены хозяйственной деятельностью, и оценить их однородность и стационарность. Оценка однородности наивысших уровней воды выполняется по 10 экстремальным значениям максимальных уровней воды в рядах, расположенных в убывающем порядке (критерии Диксона и Смирнова–Граббса). Стационарность оценивается по выборочным средним (критерии Стьюдента) и дисперсиям (критерий Фишера), рассчитанным по первой и второй половине рядов наблюдений.

Следующий этап — приведение наблюденных данных за наивысшими уровнями воды к многолетнему периоду. Более подробную информацию о методах приведения гидрологических характеристик и их параметров к многолетнему

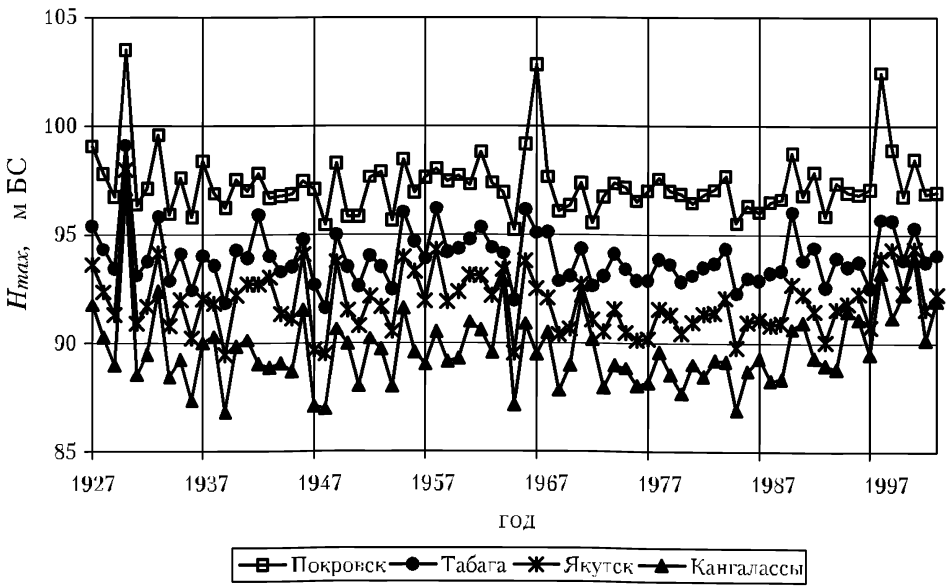

Рис. А.33. Многолетние колебания наивысших в году уровней воды р. Лены

периоду при различном объеме исходной информации можно найти в Своде правил [Свод, 2004].

По наблюденным и приведенным к многолетнему периоду данным был построен хронологический график многолетних колебаний наивысших в году уровней воды р. Лена в створах гидрологических постов: Покровск, Табага, Якутск и Кангалассы (рисунок А.33) По оси ординат отложены наивысшие в году уровни воды в метрах Балтийской системы, а по оси абсцисс — годы. На основании данного графика можно утверждать, что ход колебаний наивысших уровней от года к году на всех рассматриваемых постах синфазный. Это обстоятельство свидетельствует об однообразных условиях формирования наивысших в году уровней воды на рассматриваемом участке р. Лена.

По восстановленным рядам совместно с наблюденными данными рассчитываются параметры распределения: среднее многолетнее значение, коэффициенты вариации, асимметрии и коэффициент автокорреляции, а также квантили распределения.

Восстановленные значения наивысших уровней воды имеют особое значение, так как в этот период наблюдались очень большие значения наивысших уровней воды, включая значения, которые являются самыми большими за весь период наблюдений (1930 г.), он наблюдался на гидрологическом посту в Покровске. Особенно важно использовать и сведения об историческом уровне воды в 1864 году при заторе льда у г. Якутск (1174 см над нулем графика гидрологического поста).

В связи с тем, что уровень 1930 года превышал высший исторический уровень 1864 года, то его обеспеченность определяется как для первого члена ранжированного ряда при условии, что этот уровень не был превышен с 1864 г., т. е. по формуле $1/(N+1)$, где N=139 лет (1864–2003 гг.). В результате получена обеспеченность наивысшего в году уровня воды у с. Табага, равная 0,7 %.

Обеспеченность же высшего исторического уровня 1864 года определяется по формуле $2/(N+1)$, так как он был ниже уровня 1930 года, но достоверно был выше всех остальных наблюденных уровней с 1864 по 2003 год за исключением уровня 1930 года, т. е. вторым по высоте за этот период. Полученная эмпирическая обеспеченность ВИУ за 1864 г. составила 1,4%.

Обеспеченности всех остальных ранжированных по убыванию наивысших уровней воды, входящих в ряд наблюдений, определяются по формуле $m/(n+1)$, где $m = 2, 3, \ldots n$, где n — число членов ряда стационарных наблюдений на г/п Табага (66 лет), а с учетом приведения к многолетнему периоду — 76 лет.

В результате произведенного приведения наивысших в году уровней воды следует, что у с. Табага в 1864 году уровень воды составил 1274 см, а в 1930 году — 1403 см. над «0» графика гидрологического поста.

На основании вычисленной эмпирической обеспеченности строится эмпирическое распределения наивысших в году уровней воды на р. Лена — пос. Табага. Распределение наивысших уровней получены графическим сглаживанием эмпирических точек. Со сглаженной кривой снимаем отметки расчетных уровней различной обеспеченности.

Аналогичным образом также были выполнены расчеты и по другим гидрологическим постам на р. Лена в створах Покровск, Якутск, Кангалассы.

Полученные уровни различной обеспеченности использованы для построения продольного профиля водной. В качестве примера на рисунке А.34 представ-

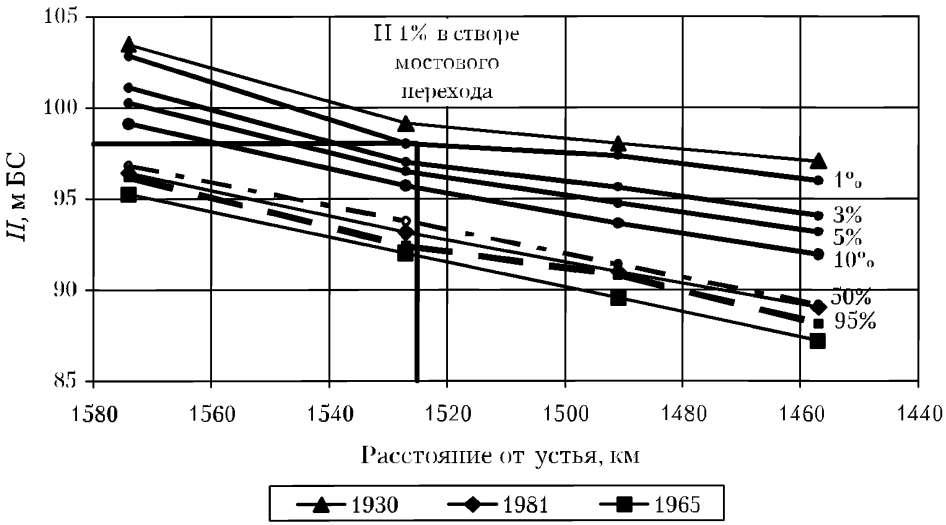

Рис. А.34. Продольное изменение наивысших в году уровней воды различной обеспеченности на участке р. Лены от с. Покровск до пос. Кангалассы

лен продольный профиль реки Лена при уровнях воды разной обеспеченности. Так же на А.34 представлены продольные профили для самых высоких уровней воды (1930 г.), средних уровней воды (1981 г.) и низких уровней воды (1965 г.).

На основании рассчитанных кривых обеспеченности могут быть получены отметки водной поверхности в м БС для любых участков реки и любых заданных обеспеченностей. Далее, при наличии крупномасштабных топографических карт для интересующих участков реки Лены в пределах населенных пунктов от Покровска до Кангалассы, могут быть определены зоны затопления при наивысших уровнях воды разной заданной обеспеченности.

А.20. Расчет береговой линии водного объекта при отсутствии данных наблюдений

Необходимо определить **прибрежную защитную полосу (ПЗП)** и **водоохранную зону (ВЗ)** на р. Кушелка (правый приток р. Плюсса) в пределах города Сланцы. Реки-аналоги: Плюсса, Руя.

Площадь водосбора реки 161 км^2, длина 22 км. В связи с тем, что р. Кушелка в гидрологическом отношении является неизученной, для определения среднемноголетнего уровня за безледоставный период был использован метод аналогии, где в качестве реки-аналога была выбрана река Руя. По данным многолетних наблюдений на ней в створе у д. Новые Рожки были определены среднемноголетний расход воды за период без ледостава и за год (таблица А.49), и рассчитано соотношение между этими расходами. Коэффициент этого соотношения составил 1,10.

Далее по данным наблюдений за стоком рек рассматриваемого района была установлена региональная зависимость среднегодовых расходов воды от пло-

щади водосбора (рисунок А.35), которая затем использовалась для определения среднегодового расхода воды р. Кушелки.

По результатам полевых гидрометрических работ (измерение расходов воды, уклонов водной поверхности, определение поперечного профиля реки в створе, расположенном на входе в г. Сланцы), была построена зависимость расходов воды от уровня (рисунок А.36). Площадь водосбора р. Кушелки до створа проведения

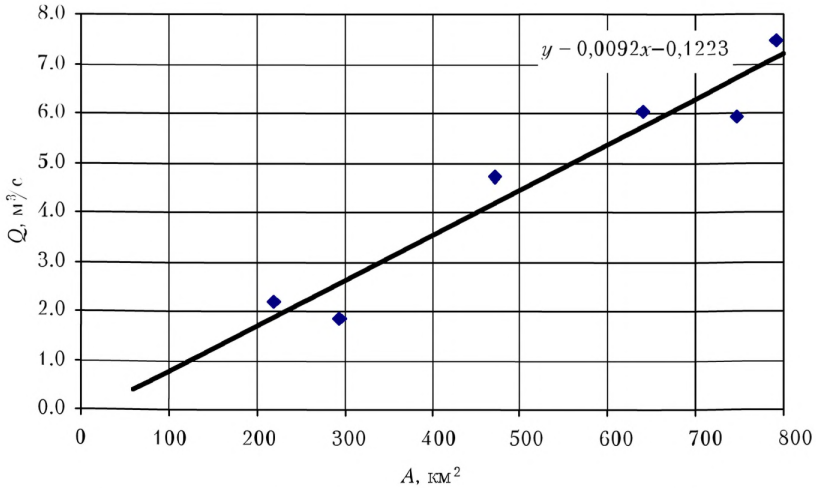

Рис. А.35. Зависимость среднемноголетнего расхода воды ($м^3/с$) от площади водосбора ($км^2$)

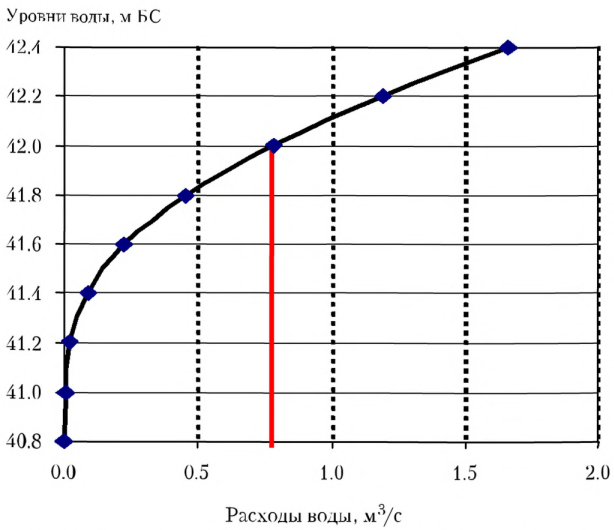

Рис. А.36. Зависимость расхода воды от уровня р. Кушелки в створе проведения гидрометрических работ

Таблица А.49. Определение среднемноголетнего расхода воды р. Руя у д. Малые Рожки за безледоставный период

№ п/п	Год	Дата окончания ледостава	Дата начала ледостава	Продолжительность безледоставного периода, сутки	Средний расход за безледоставный период, м^3/с	Среднегодовой расход воды, м^3/с
1	2	3	4	5	6	7
1	1951–52	05.04.1951	25.01.1952	295	2.26	1.92
2	1952–53	12.04.1952	05.12.1952	237	2.40	2.02
3	1953–54	01.04.1953	17.12.1953	260	3.21	2.64
4	1954–55	24.03.1954	26.11.1954	247	2.18	1.87
5	1955–56	21.04.1955	25.11.1955	218	2.65	1.92
6	1956–57	23.04.1956	30.12.1956	251	2.93	2.34
7	1957–58	04.04.1957	30.11.1957	240	3.16	2.67
8	1958–59	16.04.1958	03.12.1958	231	2.60	1.94
9	1959–60	03.04.1959	19.11.1959	230	2.00	1.70
10	1960–61	11.04.1960	18.01.1961	282	1.94	1.83
11	1961–62	23.02.1961	15.12.1961	295	2.48	2.31
12	1962–63	04.04.1962	18.12.1962	258	3.50	3.27
13	1963–64	12.04.1963	28.11.1963	230	1.98	1.53
14	1964–65	13.04.1964	25.11.1964	226	1.40	1.27
15	1965–66	13.04.1965	13.11.1965	214	1.58	1.36
16	1966–67	03.04.1966	07.12.1966	248	3.21	2.46
17	1967–68	10.03.1967	01.12.1967	266	2.70	2.27
18	1968–69	24.03.1968	09.12.1968	260	2.41	1.98
19	1969–70	10.04.1969	13.12.1969	247	1.96	1.55
20	1970–71	22.03.1970	01.12.1970	254	1.99	1.68
21	1971–72	26.03.1971	20.11.1971	239	2.14	1.95
22	1972–73	31.03.1972	26.12.1972	270	1.48	1.29
23	1973–74	27.03.1973	17.11.1973	235	1.23	1.07
24	1974–75	21.03.1974	04.02.1975	320	2.29	1.92
25	1975–76	09.03.1975	22.11.1975	258	1.57	1.72
26	1976–77	31.03.1976	21.12.1976	265	1.98	1.73
27	1977–78	09.03.1977	03.12.1977	269	1.23	2.00
28	1978–79	29.03.1978	03.12.1978	249	2.40	2.83
29	1979–80	30.03.1979	12.12.1979	257	2.00	2.19
30	1980–81	06.04.1980	01.12.1980	239	2.06	1.84
31	1981–82	02.04.1981	11.12.1981	253	3.32	2.93
32	1982–83	26.03.1982	22.01.1983	302	2.68	2.44
33	1983–84	26.03.1983	30.11.1983	249	2.24	2.29
34	1984–85	29.03.1984	28.11.1984	244	2.80	2.53
35	1985–86	02.04.1985	01.12.1985	243	3.17	2.53
36	1986–87	26.03.1986	15.12.1986	264	3.15	2.65
37	1987–88	31.03.1987	10.12.1987	254	3.12	2.83
38	1988–89	31.03.1988	08.11.1988	222	2.22	2.55
39	1989–90	06.02.1989	24.11.1989	291	2.51	2.63

Продолжение таблицы А.49

1	2	3	4	5	6	7
40	1990–91	01.02.1990	25.11.1990	297	3,90	3,53
41	1991–92	23.03.1991	26.12.1991	278	2,57	2,52
42	1992–93	11.03.1992	26.10.1992	229	2,08	2,32
43	1993–94	24.03.1993	10.11.1993	231	1,75	1,88
44	1994–95	05.04.1994	17.12.1994	256	2,29	2,25
45	1995–96	09.03.1995	08.11.1995	244	2,62	2,54
46	1996–97	06.04.1996	18.12.1996	256	2,08	1,49
47	1997–98	01.04.1997	11.12.1997	254	2,57	2,64
48	1998–99	09.04.1998	12.11.1998	217	3,14	2,73
49	1999–00	30.03.1999	19.11.1999	234	2,73	2,40
50	2000–01	21.03.2000	26.12.2000	281	2,23	2,21
52	2001–02	04.04.2001	20.11.2001	231	2,49	2,23
53	2002–03	18.03.2002	30.11.2002	258	1,44	1,93
54	2003–04	09.04.2003	24.12.2004	260	2,63	2,33
55	2004–05	28.03.2004	23.11.2004	241	3,09	–
среднее					2,40	2,18

гидрометрических работ составляет 110 км^2. В соответствии с зависимостью (рисунок А.35) среднемноголетний годовой расход воды равен 0,71 м^3/с. Среднемноголетний расход воды за безледоставный период с учетом коэффициента 1,10 составил 0,78 м^3/с, а соответствующий ему уровень воды 42,00 м БС (рисунок А.37). Расчетные значения уровня были определены на основе данных об уровне р. Плюссы в устье р. Кушелки и уклонах её водной поверхности, установленных по крупномасштабным планам и результатам полевых обследований. Таким образом, расчетные значения уровня р. Кушелки в пределах г. Сланцы составляют от 25,7 м БС (в устье) до 42,0 м БС (в 8 км от устья).

Среднемноголетний уровень воды р. Плюссы за период, когда она не покрыта льдом, определялся следующим образом: устанавливались даты начала и окончания ледостава. В соответствии с (Многолетние данные, 1986) за начало устойчивого ледостава принималась дата установления первого длительного ледостава (20 суток и более). Ледостав меньшей продолжительности, предшествующий основному, учитывается, если его продолжительность была больше, чем продолжительность последующего безледоставного периода. Если длительный ледостав прерывался состоянием «чисто» или «ледоход», продолжавшимся всего несколько суток, т.е. значительно меньше, чем сам ледостав, то такие перерывы во внимание не принимаются. За окончание ледостава принимается первый день наступления весенних ледовых явлений (весеннего ледохода, шугохода, подвижек и др.).

Поэтому при наличии данных наблюдений в гидрологических створах-аналогах, определение береговой линии рек должно проводиться в следующей последовательности:

По данным наблюдений за многолетний период за каждый гидрологический год определяются даты окончания и начала ледостава и, соответственно, продолжительность безледоставного периода. Так как эта дата определяется по табли-

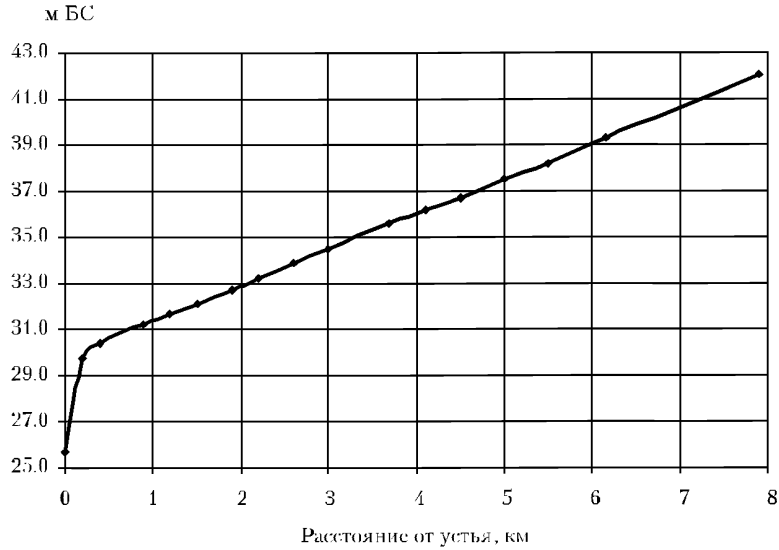

Рис. А.37. Продольный профиль водной поверхности р. Кушелки в г. Сланцы

цам ежедневных уровней воды с характеристиками ледовых явлений, которые публикуются в гидрологических ежегодниках начиная с 1936 г., то, соответственно, этот год является первым (естественно при наличии данных наблюдений) в многолетнем ряду. Таким образом, максимальная длина ряда может включать период с 1936 по 2007 гг.

За каждый год рассчитывается средний уровень за период без ледостава.

Определяется среднемноголетний уровень за безледоставный период. При наличии значимого тренда в сроках наступления и окончания ледостава, обусловленного климатическими факторами, обосновывается расчетный многолетний период времени, за который определяется средний уровень воды.

Отметки среднемноголетнего уреза воды за безледоставный период в пределах всего рассматриваемого участки реки устанавливаются по данным об уклонах водной поверхности, приведенных на крупномасштабных топографических картах или планах. При отсутствии необходимых топографических материалов уклон водной поверхности на участке реки определяется в результате полевых обследований.

А.21. Расчет зон затопления

Как было отмечено в разделе 12 обработка ведется в любом пакете программ ГИС и мы имеем дело с векторными картами. Здесь рассмотрен случай с применением программы MapInfo, но при необходимости все получаемые данные конвертируются в любой пакет ГИС, например — Arc View GIS, AutoCAD.

Для получения векторной карты берется топографическая карта на бумажной основе, сканируется для получения растрового изображения всего того, что

есть на этой карте и векторизуется. Любой объект (изображенный на карте) из растрового вида представляется в форме векторов, т.е. создается векторная карта. Каждая точка вектора представлена в плане координатами X — долгота, У — широта, но может быть дополнена и другими данными, например Z (высота). Однотипные объекты компонуются в одну группу, так называемые слои. Слои по форме подразделяются на три группы: точечные, линейные и площадные.

Вначале создается слой «реки линейные», т.е. проводится векторная линия по фарватеру реки (рисунок А.38). Выбираем место, от которого следует вести отсчёт измерений по длине реки. За «0» отсчета можно принять положение гидрологического поста и от него вести отсчет вверх (+) по течению и вниз (–) по течению. Но можно выбрать и любой другой объект, надежно отображенный на карте (указать выходные данные карты) и дать описание его местонахождения. В таблице слоя «реки линейные» должны быть созданы обязательно два поля: одно — с отметкой уреза водной поверхности, второе — с расстоянием от выбранного начала. На топографических картах крупного масштаба имеются точки со значением отметок уреза воды в межень. Зная эти отметки, проводится линейная интерполяция значений уровня воды с шагом, в зависимости от уклона, например через 10, 25, 50 см и определяется их местоположение от назначенного постоянного начала. Наводятся линии раздела интерполированных значений уровня воды на урезе водного объекта примерно перпендикулярно ложу реки при наибольшем разливе. Затем создается слой «реки площадные» — с границей воды по обоим берегам (обязательно указывается величина отметки водной поверхности для выбранного диапазона интерполяции). В результате получаем фрагменты реки с известной отметкой водной поверхности (условно принятой горизонтальной), то есть без учета уклона водной поверхности на рассматриваемом участке реки.

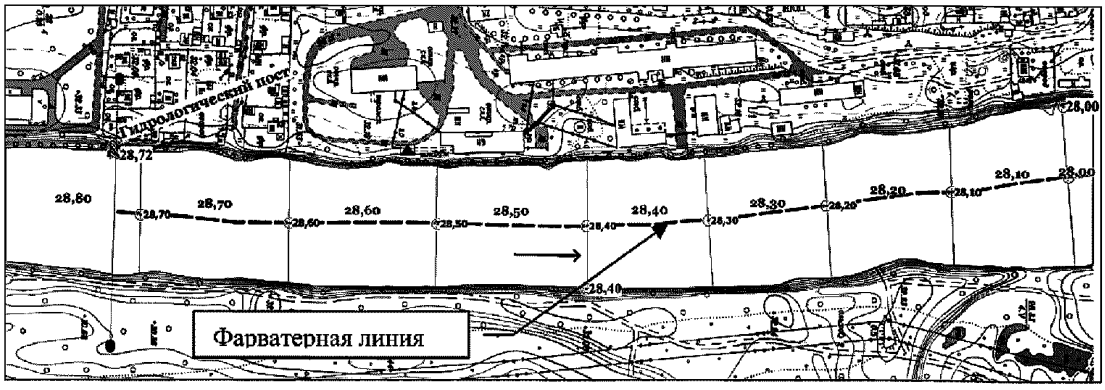

Рис. А.38. Векторизация основного русла с учетом отметок уреза воды по длине реки

Далее необходимо подготовить к интерполяции слои, содержащие отметки поверхности (воды и суши). Рассмотрим это на примере использования программы «Surfer». Выбираем любой файл с наведенными векторами, например, с наименьшей величиной горизонтали, выше отметки уреза воды в межень — в нашем случае, «горизонт — 30,0» (рисунок А.39). Просматриваем, чтобы он был наведен в проекции «долгота-широта» и имел единицу измерения координат — градусы. Структура таблицы файла должна иметь минимум два поля: ID (тип —

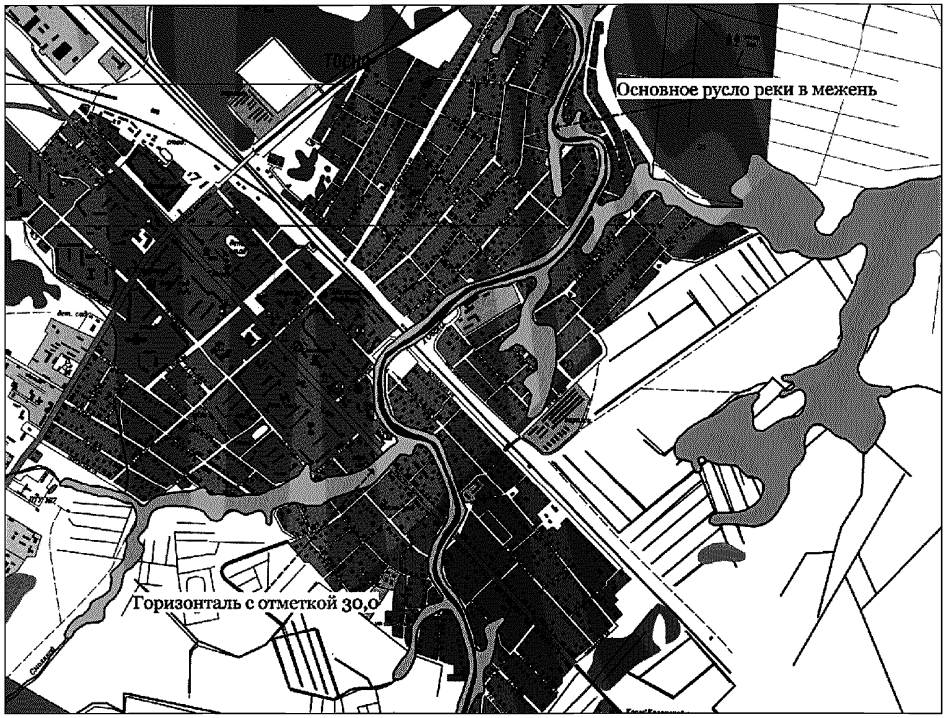

Рис. А.39. Участок реки с горизонталью ближайшей к меженному уровню воды

целое) и ГОРИЗОНТАЛЬ – (тип – десятичное, с одним знаком после запятой). Таблицу экспортируем в формат – mif и сохраняем «горизонт – 30,0.mif». Далее используем модуль MifSurfConv. Надо дважды «кликнуть» по MifSurfConv.exe. Показать, где находится исходный MIF-файл. Далее «кликнуть» по кнопке «Открыть».

В раскрывшемся окне «Choose output file» указать имя файла («горизонт – 30,0.mif») и показать, где он должен находиться. «Кликнуть» по кнопке «Сохранить» – «горизонт – 30,0.dat». В раскрывшемся синем окне «кликнуть» по черному треугольнику и выбрать какую-нибудь подходящую строчку (отметка), после чего «кликнуть» по кнопке «Start». Если окошко стало зеленым, все «Ok». Появившаяся цифра покажет, сколько получилось точек. Результат получен в виде файла с расширением «горизонт – 30,0.dat», который можно открыть в Surfer. Полученный файл «горизонт – 30,0.dat» в Surfer копируются (через буфер компьютера) в MapInfo в создаваемый файл *«рельеф-30*.tab» с соответствующей структурой и проекцией. В MapInfo на основе списка в созданной таблице создаются точечные объекты (рисунок А.40).

Аналогичным образом подготавливаются все файлы с горизонталями, гидрографией и точечные данные, имеющие на карте отметку высоты. Затем они собираются в единый файл с рельефом (*рельеф_весь*. tab). Надо проверить, все ли координаты в столбцах имеют одни и те же единицы измерения (десятичные градусы или метры). Если единицы разные, надо проделать: «Таблица – обновить колонку...» – результат – *«рельеф_весь_2*. tab» (рисунок А.41).Все значе-



X	Y	Z
30,842367	59,583405	30,0
30,860063	59,583424	30,0
30,859841	59,583288	30,0
30,859664	59,583147	30,0
30,858973	59,582906	30,0
30,858855	59,582756	30,0
30,859052	59,582726	30,0
30,859428	59,582756	30,0
30,859586	59,582816	30,0
30,859862	59,582927	30,0
30,860277	59,582997	30,0
30,860691	59,583128	30,0
30,861086	59,583268	30,0
30,861343	59,583279	30,0
30,861679	59,583219	30,0
30,861936	59,583229	30,0
30,862173	59,583279	30,0
30,862508	59,583248	30,0
30,862904	59,583269	30,0
30,863316	59,583260	30,0
30,863971	59,583200	30,0
30,864247	59,583110	30,0
30,864129	59,582949	30,0
30,863913	59,582759	30,0
30,863913	59,582668	30,0
30,863914	59,582508	30,0
30,863736	59,582408	30,0
30,863459	59,582387	30,0
30,863262	59,582387	30,0
30,862946	59,582407	30,0
30,862353	59,582417	30,0
30,861721	59,582366	30,0
30,861328	59,582236	30,0
30,861228	59,582025	30,0
30,861268	59,581815	30,0
30,861092	59,581414	30,0
30,860697	59,581243	30,0
30,859434	59,580872	30,0
30,858901	59,580661	30,0
30,858744	59,580360	30,0
30,858705	59,580139	30,0
30,858924	59,579779	30,0
30,859319	59,579528	30,0
30,859656	59,579218	30,0
30,859637	59,579037	30,0
30,859361	59,578917	30,0
30,859006	59,578856	30,0
30,858551	59,578896	30,0
30,858136	59,578966	30,0
30,857819	59,579086	30,0
30,857424	59,579166	30,0
30,857187	59,579186	30,0
30,857049	59,579136	30,0
30,856338	59,578915	30,0
30,856003	59,578905	30,0
30,855647	59,579035	30,0
30,855390	59,579024	30,0

Рис. А.40. Участок реки с точечными объектами для слоя «горизонт — 30,0», справа таблица со значениями координат каждой точки (широта — X , долгота — Y , отметка — Z)



X	Y	Z
30,891	59,5407	31,30
30,8947	59,5419	26,20
30,8805	59,5459	34,20
30,8696	59,5442	35,90
30,8551	59,5458	32,60
30,8473	59,5427	35,20
30,8724	59,5489	34,00
30,9045	59,5395	32,10
30,9179	59,5394	33,20
30,9217	59,5425	30,50
30,9254	59,5474	30,30
30,9235	59,5448	29,50
30,9342	59,5403	30,40
30,9645	59,5461	34,40
30,9399	59,5346	31,90
30,9258	59,5362	30,40
30,9127	59,5354	31,00
30,8998	59,5362	34,60
30,8765	59,5331	31,20
30,8693	59,5334	30,20
30,8575	59,5375	33,80
30,8457	59,5316	33,30
30,8367	59,5338	32,70
30,8521	59,5299	33,70
30,8569	59,527	33,60
30,8614	59,5289	30,40
30,8652	59,5301	32,80
30,875	59,5232	34,10
30,8834	59,5303	32,10
30,8695	59,5246	31,00
30,9059	59,5259	31,40
30,9088	59,5318	30,80
30,9108	59,5237	34,30
30,9168	59,5315	29,80
30,9364	59,5275	35,50
30,928	59,521	35,10
30,9394	59,5162	34,50
30,925	59,516	37,30
30,9226	59,5143	37,20
30,9143	59,5218	35,30
30,9085	59,5193	34,20
30,9062	59,5144	34,10
30,9122	59,5143	37,00
30,9348	59,5133	37,10
30,9153	59,5107	37,20
30,8936	59,5195	32,00
30,9011	59,5146	32,90
30,8949	59,5137	31,20
30,8998	59,5101	27,40
30,8905	59,5169	34,90
30,8782	59,5113	35,40
30,8718	59,5125	34,30
30,8926	59,5074	32,20
30,9074	59,5052	38,90
30,8904	59,5221	31,20
30,8808	59,5319	30,80
30,8812	59,5532	31,80

Рис. А.41. Исследуемый участок со всеми точечными объектами «*рельеф_весь*»

ния из списка полученной таблицы можно скопировать в буфер компьютера и вставить либо в Excel, либо в Surfer.

Далее идет обработка в программе «Surfer». Если данные из списка находятся в буфере компьютера, надо открыть Surfer: «File-New-Worksheet-Edit-Paste». Результат сохранить как Golden Software Data (*рельеф*.dat) — этот файл (или аналогично созданный в Excel) — представляет собой таблицу из трех столбцов. 1 — X-координата (долгота), Y-координата (широта), 3 — H — высота в точке с координатами X, Y. Это исходный файл для расчетов в Surfer. Создавать его можно и разными другими способами, например, просто набирать вручную значения координат и высоты в таблице Excel или Surfer. По исходным данным сначала рассчитывается сетка (*рельеф*.grd). Открыть Surfer, File-New-PlotDocument. Если сетка не была построена ранее, то Grid-Data- *рельеф*.dat — открыть. Откроется окно Scattered Data Interpolation, в котором выбирается метод интерполяции (например, Kriging), шаг сетки (spacing) и пр. параметры. Результат расчетов делаем с шагом сетки в 10 раз меньшим, чем предлагается по умолчанию.

Расчет линий рельефа. Если сетка не была построена ранее, то открыть Surfer, File-New-PlotDocument-Map-Contour Map-New-Contour Map и в открывшемся окне показать файл сетки «*рельеф*.grd». Затем задать параметры построения рельефа, для этого надо дважды щелкнуть по карте и появится окно «map: Contour Properties». На вкладке «General» задаем уровень сглаживания контура «smooth contours» и способ его заливки. На вкладке «levels» задаем значения наименьшего и наибольшего уровня воды и шаг интерполирования (через 0,5–0,25–0,10 м), а также способ и цвет заливки контура. В результате будет построена карта рельефа.

Для экспорта в MapInfo «кликнуть» по построенной картинке (она пометится) и «кликнуть» по Map-Contour Map-Export Contours-задать имя файла .dxf (рисунок А.42). Этот файл с расширением .dxf надо перевести в файл програм-

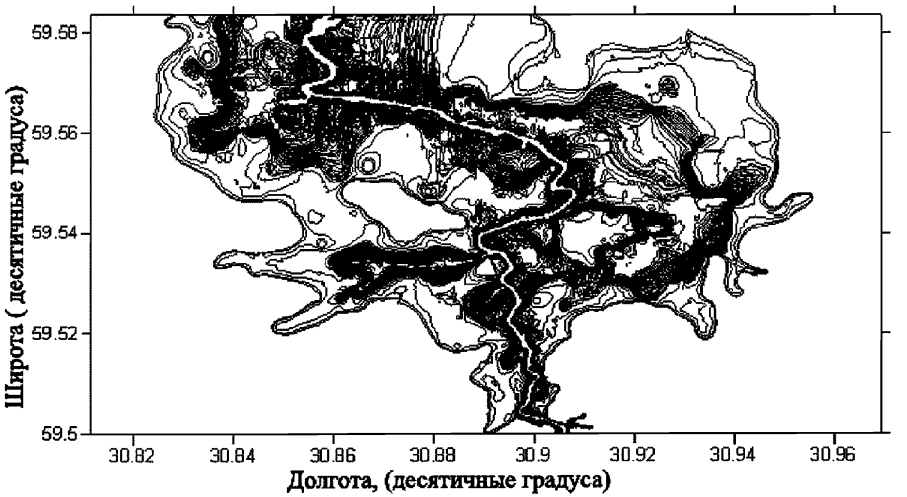

Рис. А.42. Карта по реке Тосна у г. Тосно с интерполированными горизонталями в программе Surfer

мы MapInfo, используя встроенный в неё универсальный транслятор. В блоке «Источник» выбираем AutoCad DWG/DXF и показываем, где находится файл, в блоке «Результат» показываем формат, в какой транслируем файл и его место. Мы видим достаточно пеструю картину, явно карта содержит и необоснованные детали интерполяции и шумы. Поэтому приходится выполнить чистку и выбрать только физически обоснованные значения, без детальных необоснованных прорисовок (рисунок А.43) Далее можно получить заданные интерполированные горизонтали, соответствующие отметке уровня воды любой обеспеченности (рисунок А.44).

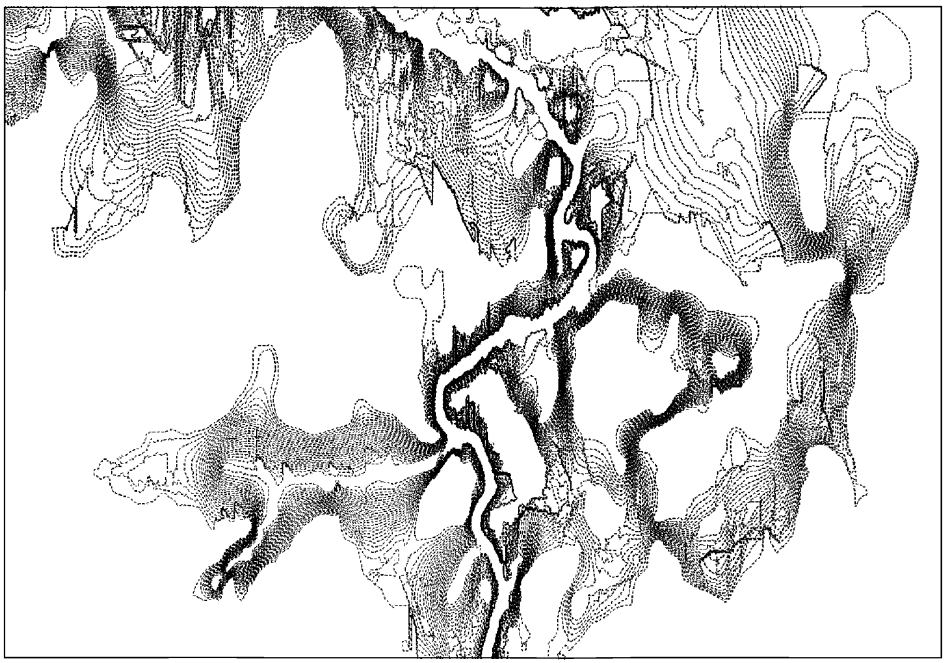

Рис. А.43. Фрагмент изображения в Mapinfo, конвертированного из Serfer

Далее наводим линии раздела полученных интерполированных горизонталей, соответствующих горизонтальной поверхности, и отметок водной поверхности в принятом диапазоне их изменения (обусловленных уклоном) по длине реки (рисунок А.45). Линии раздела проводим примерно перпендикулярно границам разлива при наибольшем разливе. Безусловно, здесь присутствует субъективный подход, и каждый специалист наведет эти линии по своему усмотрению, но это мало повлияет на общую картину затоплений.

После наведения границ разделов водной поверхности, надо разрезать зону затопления требуемой обеспеченности (полученную в Surfer), на отдельные части с постоянной отметкой внутри каждой из них (рисунок А.46). После разрезки появятся нестыковки зоны разлива на границах разделов водной поверхности. Эти нестыковки можно сгладить, чтобы получить более естественную (плавную) зону затопления. Затем можно и объединить несколько разрезан-

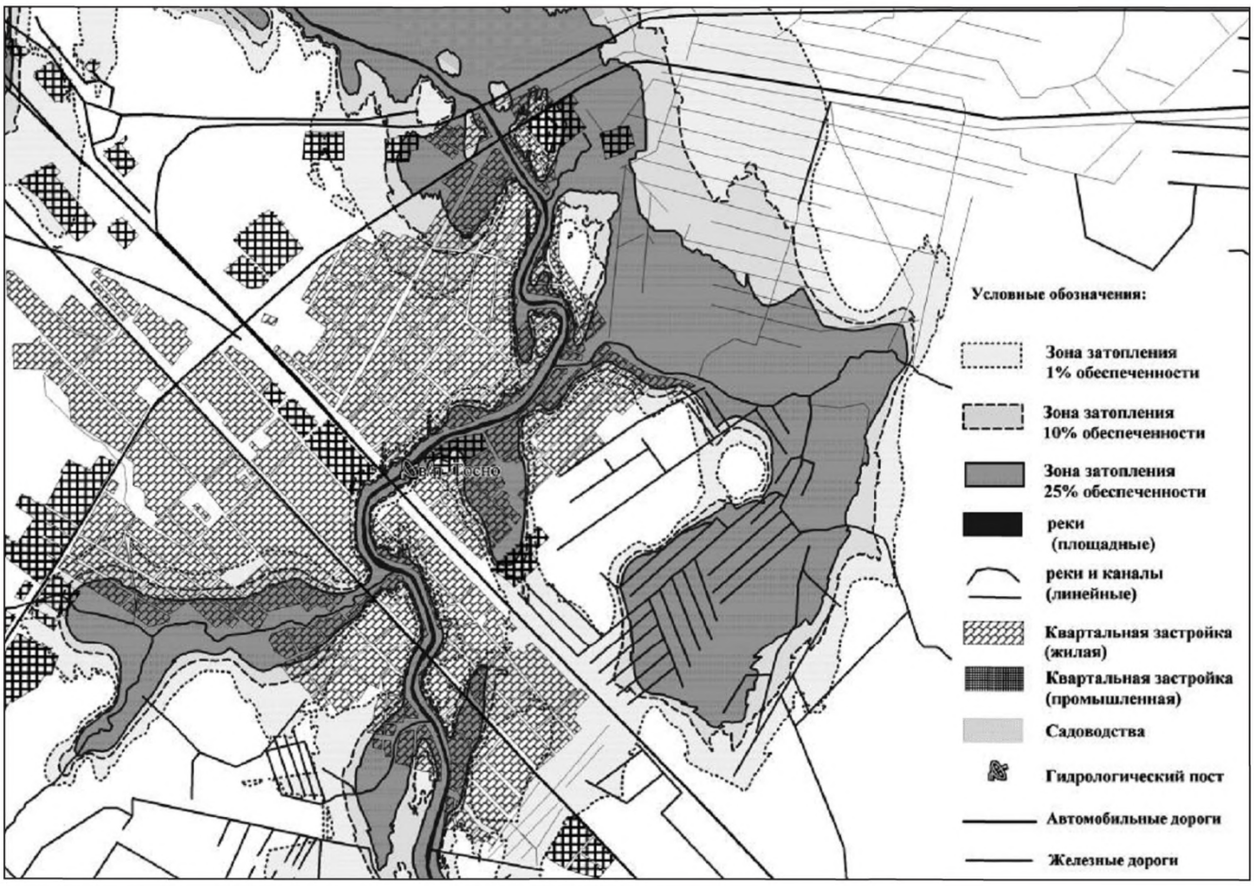

Рис. А.44. Интерполированные горизонтали (в площадном виде), соответствующие уровню воды 1, 10 и 25% обеспеченности (без срезки на уклон)

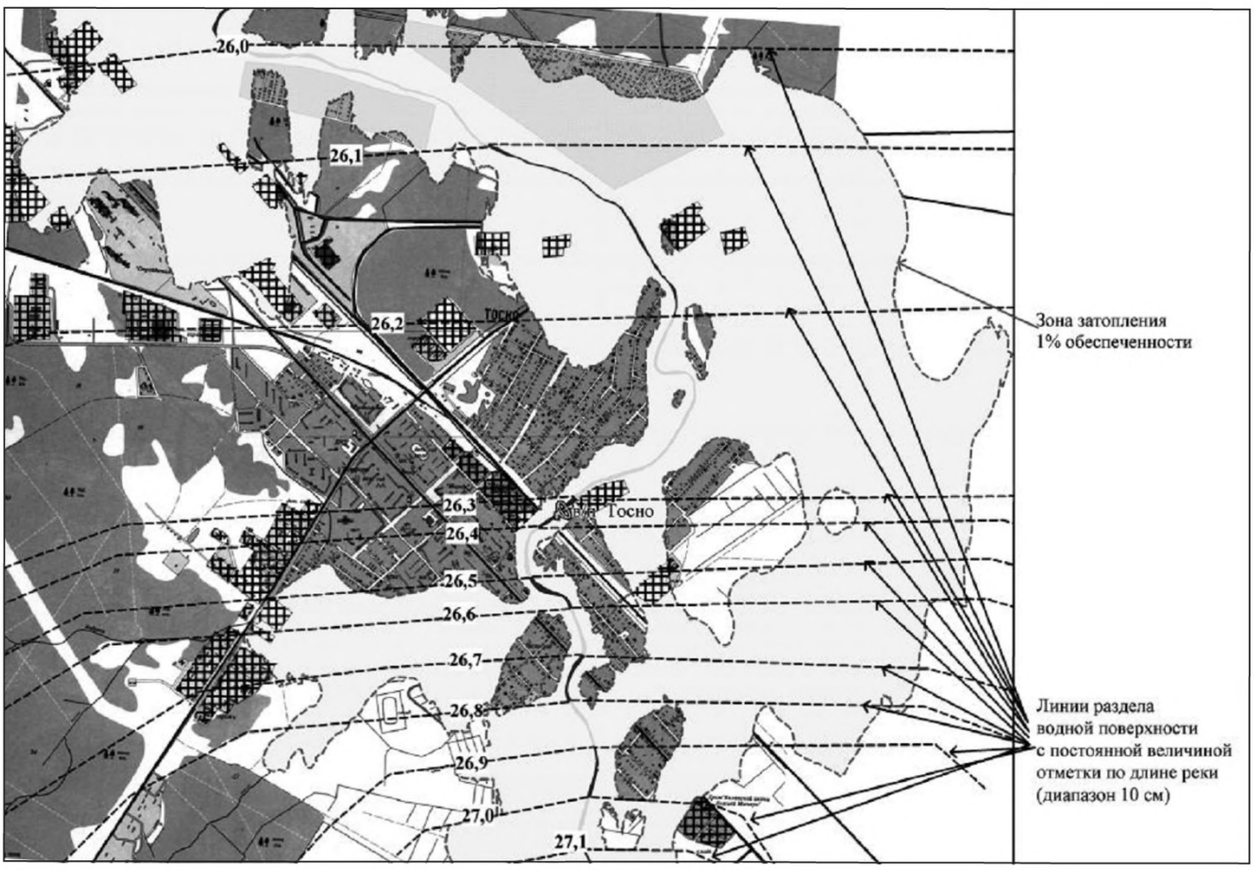

Рис. А.45. Схема наведения линий раздела водной поверхности с постоянной величиной отметки по длине реки

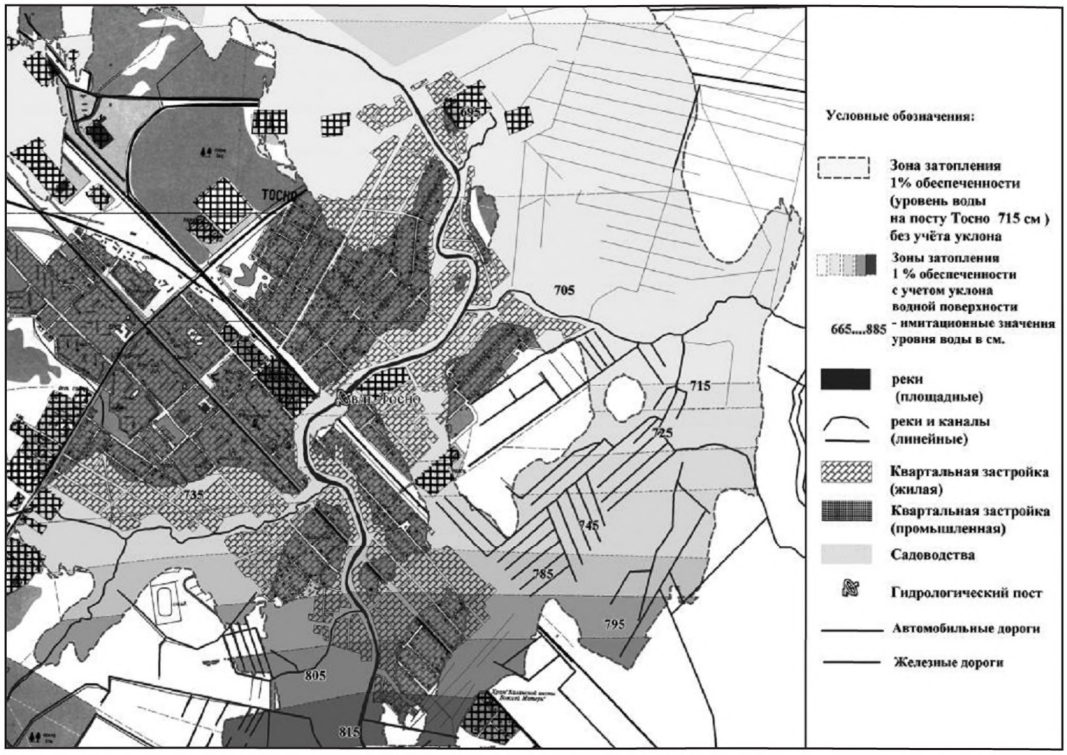

Рис. А.46. Схема зон затопления при уровне воды 1% обеспеченности для участков, с учётом уклона воды

ных зон в единое образование, но относить эту зону к уровню воды на гидрологическом посту.

Такие схемы нетрудно построить для любого задаваемого значения уровня воды, надо только в программе Surfer при интерполировании прописать это значение.

А. 22. Расчет максимальных расходов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений ручья Чернецкий у деревни Ситенка по формуле предельной интенсивности

Ручей Чернецкий протекает на юго-западе Ленинградской области (лесная зона), является левым притоком реки Луги. Реки рассматриваемого района принадлежат к типу равнинных рек, для которых характерно смешанное питание с преобладанием снегового. Дождевые максимумы даже на малых реках обычно ниже весенних. Значительная часть водосбора занята сосновым лесом, механический состав почв: пески и супеси. Основные гидрографические характеристики ручья Чернецкий даны в таблице А.50.

Требуется: рассчитать максимальные расходы и модули стока дождевых паводков вероятностью ежегодного превышения $P = 0{,}1, 1, 2, 3, 5, 10, 25$ %.

Таблица А.50. Основные гидрографические характеристики руч. Чернецкий — д. Ситенка

Площадь водосбора A, км^2	Длина реки L, км	Средневзвешенный уклон реки $I_р$, ‰	Средний уклон водосбора $I_в$, ‰	Средневзвешенная озерность $f_{оз}$, %	Залесенность $f_л$, %	Заболоченность $f_б$, %
10,2	6,4	3,78	17	0	76	10

Так как в данном случае площадь водосбора водотока менее 200 км^2 расчет максимальных расходов дождевых паводков обеспеченности P % производился по формуле предельной интенсивности (тип III) (8.20):

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

где $q'_{1\%}$ — максимальный модуль стока ежегодной вероятности превышения $P = 1$ %, выраженный в долях от произведения $\varphi H_{1\%}$, при $\delta = 1$; φ — сборный коэффициент стока; $H_{1\%}$ — максимальный суточный слой осадков вероятности превышения $P = 1$ %, мм; δ — коэффициент, учитывающий влияние водохранилищ, прудов и проточных озер; $\lambda_{P\%}$, — переходный коэффициент от обеспеченности 1 % к обеспеченности P %; A — площадь водосбора км^2.

Решение

1. При отсутствии рек-аналогов сборный коэффициент стока φ определяется по формуле (8.24):

$$\varphi = \frac{C_2}{(A+1)^{n_2}}\varphi_0\left(\frac{I_в}{50}\right)^{n_3},$$

где c_2 — эмпирический коэффициент, который для лесной зоны принимают равным 1,2 [Свод,2004], φ_0 — сборный коэффициент стока для условного водосбора с площадью A, равной 10 км^2, и средним уклоном $I_в$, равным 50 ‰; n_2 — коэффициент, зависящий от типа и механического состава почв; n_3 — коэффициент, принимаемый для лесной зоны равным 0,07 [Свод, 2004].

Параметры φ_0 и n_2 в первом приближении могут быть определены по таблице 11 [Пособие, 1984]. Результаты расчета сборного коэффициента стока представлены в таблице А.51.

Таблица А.51. Исходные данные и расчетное значение сборного коэффициента стока

A, км^2	$I_в$, ‰	C_2	n_2	n_3	φ_0	φ
10,2	17	1,2	0,80	0,07	0,30	0,128

2. Рассчитывается гидроморфометрическая характеристика русла $\Phi_р$ по формуле (8.21):

$$\Phi_р = (1000L)\Big/\left[m_р I_р^m \Lambda^{0,25}\left(\varphi H_{1\%}\right)^{0,25}\right],$$

где L — гидрографическая длина реки, км; m и $m_р$ — параметры шероховатости русла и поймы, определяемые по таблице 27 [Пособие.1984]; $I_р$ — средневзве-

шенный уклон русла водотока, ‰; $H_{1\%}$ — максимальный суточный слой осадков вероятности превышения P = 1 %, мм, определяемый по данным ближайшей метеорологической станции (таблица А.52).

Таблица А.52. Исходные данные и расчетное значение гидроморфометрической характеристики русла

F, км^2	L, км	$I_р$, ‰	m	$m_р$	φ	$H_{1\%}$	$Ф_р$
10,2	6,4	3,78	0,333	11	0,128	91	113

3. Определяется время склонового добегания.

В первом приближении время склонового добегания можно определить в соответствии с п.7.46 [Свод, 2004]. Для лесной зоны с заболоченностью водосбора менее 20 % $\tau_{ск}$ = 60 мин.

Определяется $q'_{1\%}$ — максимальный модуль стока ежегодной вероятности превышения P = 1 %, выраженный в долях от произведения $\varphi H_{1\%}$, при δ = 1.

В первом приближении допускается определять значение $q'_{1\%}$по таблице 9 приложения 2 [Пособие, 1984] в зависимости от номера района кривых редукции осадков (лист14 приложение1 [Пособие,1984], склонового времени добегания ($\tau_{ск}$) и гидроморфометрической характеристика русла ($Ф_р$) (таблица А.53).

Таблица А.53. Исходные данные и расчетное значение параметра $q'_{1\%}$

№ района	$\tau_{ск}$, мин	$Ф_р$	$q'_{1\%}$
3	60	113	0,024

5. Определяется коэффициент δ, учитывающий влияние водохранилищ, прудов и проточных озер. Так как в данном случае $f_{оз}$ = 0, то δ = 1.

6. Определяются переходные коэффициенты от максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятности превышения P = 1 % к значениям другой вероятности превышения.

С этой целью были рассчитаны переходные коэффициенты для 8 рек района исследований с самыми малыми площадями водосборов и достаточно продолжительными рядами наблюдений. Расчет производился по формуле (8.11)

$$\lambda_P = Q_{P\%}/Q_{1\%},$$

Полученные значения для каждой обеспеченности осреднялись. Результаты расчета представлены в таблице А.54.

Таблица А.54. Переходные коэффициенты от обеспеченности P = 1 % к другим обеспеченностям

Переходные коэффициенты $\lambda_р$						
0,1	1	2	3	5	10	25
1,50	1	0,81	0,72	0,62	0,50	0,31

7. Выполняется окончательный расчет по формуле (22.1). В таблице А.55 представлены параметры формулы, в таблице А.56 — расчетные расходы воды.

Таблица А.55. Параметры расчетной формулы

C_2	n_2	n_3	φ_0	φ	m	$m_р$	$H_{1\%}$	$\tau_{ск}$	$\Phi_р$	δ	$q_1{}^*{}_{\%}$
1,2	0,80	0,07	0,30	0,128	0,333	11	91	60	113	1,00	0,024

Таблица А.56. Расчетные максимальные расходы и модули стока дождевых паводков; руч. Чернецкий — д. Ситенка

Размерность	**Обеспеченность *P*, %**						
	0,1	1	2	3	5	10	25
Q, м^3/с	4,29	2,86	2,32	2,06	1,77	1,43	0,89
q, л/с км^2	421	280	227	202	174	140	87,3

Примечание. Таблицы Пособия [Пособие,1984], принятые при расчетах допускается использовать только в переходный период — до создания территориальных строительных норм.

Приложение Б
Таблицы

Таблица Б1. Примерные сроки и продолжительность основных гидрологических сезонов для России и прилегающих территорий

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

* В — весенний сезон; (3) — продолжительность сезона 3 месяца; V–VII — границы сезона: май — июль.

Таблица Б2. Условия применения расчетных формул по определению максимального расхода воды дождевого паводка заданной вероятности превышения

N типа расчетной формулы	Расчетная формула	Площадь водосбора реки	Учитываемые характеристики бассейна	Методические возможности расчетной формулы
I	эмпирическая редукционная формула (6.9) при наличии реки — аналога	$A > 200$ км^2	Гидрографические характеристики русла, озерность, заболоченность, средняя высота водосбора	расчет $Q_{max,P\%}$ без учета наиболее вероятных календарных сроков его прохождения
II	Эмпирическая редукционная формула (6.21) при отсутствии реки-аналога	— " -	— " -	— " -
III	Формула предельной интенсивности стока (6.23): - при наличии реки аналога; - при отсутствии реки аналога;	$A < 200$ км^2	гидрографические характеристики русла и водосбора, озерность, тип и мех. состав почв водосбора, наибольший суточный максимум осадков в году, интенсивность осадков	расчет $Q_{max,P\%}$ без учета наиболее вероятных календарных сроков его прохождения
IV	Объемные, генетические и др. формулы, основанные на расчете стока по осадкам, в том числе через индексы предшествующего увлажнения	$A > 0$ км^2	гидрографические характеристики русла и водосбора, озерность, заболоченность, инфильтрационные свойства почв, уровень подземных вод, стокоформирующие односуточные и многосуточные осадки по календарным периодам года (на уровне декад и месяцев), показатель увлажненности почв	расчет $Q_{max,P\%}$ с учетом календарных сроков летне-осеннего периода и имеющихся представлений о формировании потерь стока

Примечание: Структура формул IV типа и методы определения параметров устанавливаются в Территориальных строительных нормах.

Таблица Б3. Гидравлические параметры, характеризующие состояние и шероховатость русла водотока

Характеристика русла и поймы	m	m_p, м/мин
1	2	3
Реки и водотоки со средними уклонами I_p<35‰: чистые русла постоянных равнинных рек; русла периодически пересыхающих водотоков (сухих логов)	1/3	11
извилистые, частично заросшие русла больших и средних рек; периодически пересыхающие водотоки, несущие во время паводка большое количество наносов	1/3	9
сильно засоренные и извилистые русла периодически пересыхающих водотоков	1/3	7
Реки и периодически пересыхающие водотоки со средними уклонами I_p≥35‰	1/7	10

Таблица Б 4. Коэффициент $m_{ск}$

Характеристика поверхности склонов	Травяной покров склонов		
	редкий или отсутствует	обычный	густой
Укатанная, спланированная грунтовая; такыровидные равнины	0,40	0,30	0,25
Без кочек, в населенных пунктах с застройкой менее 20%	0,30	0,25	0,20
Кочковатая, таежные завалы, а также в населенных пунктах с застройкой более 20%	0,20	0,15	0,10

Таблица Б.5. Значения параметров α и *n'* в формуле для расчета коэффициента δ_1

Природная зона	Расположение леса на водосборе	параметр α при *f*л %			Коэффициент *n'* для почвогрунтов под лесом		
		3–9	10–19	20–30	различного механического состава	супесчаных	суглинистых
Лесная	*A*	1,00	1,00	1,00	0,22	—	—
	B	0,85	0,80	1,75	0,22	—	—
	C	1,20	1,25	1,30	0,22	—	—
Лесостепная	*A,C*	1,00	1,00	1,00	0,16	0,20	0,10
	B	1,25	1,30	1,40	0,16	0,20	0,10

Примечания: 1. Расположение леса на водосборе в таблице принимается условно: А — равномерное; В — в верхней части водосбора; С — в нижней и прирусловой части водосбора. 2. В лесной зоне из-за отсутствия сведений о преобладающих почвах (грунтах) значение *n'* принимается равным 0,22 независимо от почв (грунтов) под лесом.

Таблица Б.6. Значение параметра β в формуле для расчета коэффициента δ_2

Тип болота	β
Низинные болота и заболоченные леса и луга на водосборах, сложенных супесчаными и легкосуглинистыми почвами (грунтами)	0,8
Водосборы, включающие болота разных типов	0,7
Верховые болота на водосборах, сложенных супесчаными и легкосуглинистыми почвами (грунтами)	0,5
Верховые болота на водосборах, сложенных среднесуглинистыми и глинистыми почвами (грунтами)	0,3

Таблица Б.7. Отношение максимального мгновенного расхода весеннего половодья к максимальному среднесуточному расходу весеннего половодья в зависимости от природной зоны и площади водосбора

Природная зона	Площадь водосбора, км^2										
	0,1	0,5	1	5	10	50	100	500	1000	2000	3000
Тундра и северная часть лесной зоны (тайга)	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,15	1,05	1	1	1
Южная часть лесной зоны (смешанные и лиственные леса)	3,7	3,0	2,7	2,3	2,1	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0
Лесостепная	4,4	3,6	3,3	2,7	2,5	2,0	1,9	1,4	1,3	1,15	1,0
Степная	5,5	4,4	4,0	3,0	2,8	2,1	1,9	1,4	1,3	1,15	1,0
Засушливых степей и полупустынь	9,5	7,0	6,0	4,3	3,7	2,6	2,0	1,5	1,4	1,3	1,2

Таблица Б.8. Значения коэффициентов λ и *a* в зависимости от коэффициента несимметричности гидрографа K_s

K_s	0,19	0,23	0,26	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42	0,44
λ	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	1,3	1,5	1,9	2,6
a	0,21	0,32	0,46	0,62	0,80	1,01	1,24	1,52	2,41	3,22	5,11	9,41

Таблица Б.9. Относительные ординаты расчетного гидрографа стока воды $y = Q_i/Q_{p\%}$ при различных коэффициентах λ и k_s

$x=t_i/t_n$	$\lambda = qt_n / (0.116h_{p\%})$																				
	0,3	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1,0**	**1,1**	**1,2**	**1,3**	**1,4**	**1,5**	**1,6**	**1,7**	**1,8**	**1,9**	**2,0**	**2,2**	**2,4**	**2,6**
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0,1	0,023	0,002	0	0	0																
0,2	0,21	0,091	0,034	0,011	0,003	0	0	0	0												
0,3	0,45	0,29	0,18	0,099	0,050	0,022	0,009	0,003	0,001	0	0	0	0								
0,4	0,66	0,51	0,39	0,28	0,19	0,12	0,076	0,043	0,024	0,013	0,006	0,003	0,001	0	0	0	0	0			
0,5	0,78	0,69	0,59	0,49	0,40	0,31	0,24	0,18	0,13	0,088	0,059	0,039	0,025	0,015	0,009	0,005	0,003	0,002	0	0	0
0,6	0,88	0,82	0,75	0,69	0,61	0,54	0,47	0,39	0,33	0,27	0,22	0,18	0,14	0,12	0,088	0,066	0,049	0,036	0,017	0,009	0,004
0,7	0,94	0,91	0,87	0,83	0,79	0,74	0,69	0,64	0,59	0,54	0,48	0,43	0,39	0,34	0,30	0,26	0,22	0,19	0,14	0,094	0,062
0,8	0,97	0,96	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,66	0,62	0,59	0,55	0,52	0,46	0,40	0,34
0,9	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,84	0,82	0,79
1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,87	0,85	0,82
1,2	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,92	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,80	0,78	0,76	0,73	0,70	0,68	0,65	0,60	0,54	0,49
1,3	0,97	0,95	0,93	0,91	0,88	0,85	0,82	0,78	0,75	0,71	0,68	0,64	0,60	0,56	0,52	0,48	0,44	0,41	0,34	0,28	0,22
1,4	0,95	0,92	0,89	0,85	0,81	0,77	0,72	0,67	0,62	0,57	0,52	0,48	0,43	0,38	0,34	0,30	0,26	0,23	0,17	0,12	0,084
1,5	0,92	0,88	0,84	0,79	0,74	0,68	0,62	0,56	0,50	0,44	0,39	0,34	0,29	0,25	0,21	0,17	0,14	0,12	0,075	0,046	0,027
1,6	0,90	0,85	0,79	0,73	0,66	0,59	0,52	0,46	0,39	0,34	0,28	0,23	0,19	0,15	0,12	0,092	0,071	0,054	0,030	0,016	0,008
1,7	0,87	0,81	0,74	0,66	0,59	0,51	0,44	0,37	0,30	0,25	0,20	0,15	0,12	0,089	0,066	0,047	0,034	0,024	0,011	0,005	0,002
1,8	0,84	0,77	0,69	0,60	0,52	0,44	0,36	0,29	0,23	0,18	0,13	0,10	0,072	0,050	0,035	0,023	0,015	0,010	0,004	0,001	0
1,9	0,81	0,73	0,64	0,55	0,46	0,37	0,29	0,23	0,17	0,13	0,089	0,063	0,043	0,028	0,018	0,011	0,007	0,004	0,001	0	
2,0	0,78	0,69	0,59	0,49	0,40	0,31	0,24	0,18	0,13	0,088	0,059	0,039	0,025	0,015	0,009	0,005	0,003	0,002	0		
2,2	0,73	0,61	0,59	0,40	0,30	0,22	0,15	0,10	0,066	0,042	0,025	0,014	0,008								
2,4	0,67	0,54	0,42	0,32	0,22	0,15	0,096	0,058	0,034	0,019	0,010	0,005	0,002								
2,6	0,62	0,48	0,35	0,25	0,16	0,10	0,060	0,032	0,017	0,008	0,004	0,002	0,001								
2,8	0,57	0,42	0,29	0,19	0,12	0,068	0,036	0,018	0,008	0,004	0,001	0,001	0								
3,0	0,53	0,37	0,24	0,15	0,086	0,045	0,022	0,010	0,004	0,002	0	0									
3,5	0,43	0,26	0,15	0,079	0,037	0,016	0,006	0,002	0	0											
4,0	0,34	0,19	0,092	0,042	0,016	0,005	0,002	0													
5,0	0,21	0,091	0,034	0,011	0,003	0	0														
6,0	0,13	0,044	0,012	0,003	0																
8,0	0,052	0,010	0,002	0																	
$k_s=h_n/h_p=f(\lambda)$	0,19	0,23	0,26	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,37	0,38	0,38	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44

Таблица Б.10. Относительные ординаты гидрографа внутрисуточного хода стока весеннего половодья у при различных коэффициентах $k_\tau = Q'_{p\%} / Q_{p\%}$

Время, ч	k_τ											
	1	**1,2**	**1,5**	**2,0**	**2,5**	**3,0**	**3,5**	**4,0**	**4,5**	**5,0**	**5,5**	**6,0**
1	1,0	0,99	0,81	0,43	0,26	0,12	0,07	0,05	0,03	0,03	0,0	0,0
2	1,0	0,97	0,76	0,39	0,23	0,11	0,07	0,05	0,03	0,03	0,0	0,0
3	1,0	0,94	0,71	0,36	0,21	0,11	0,07	0,05	0,03	0,03	0,0	0,0
4	1,0	0,91	0,66	0,33	0,19	0,10	0,06	0,04	0,03	0,03	0,0	0,0
5	1,0	0,88	0,58	0,29	0,18	0,10	0,06	0,04	0,02	0,02	0,0	0,0
6	1,0	0,86	0,50	0,27	0,16	0,10	0,06	0,04	0,02	0,02	0,0	0,0
7	1,0	0,84	0,42	0,24	0,14	0,09	0,06	0,04	0,02	0,01	0,0	0,0
8	1,0	0,82	0,40	0,23	0,13	0,09	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	0,0
9	1,0	0,78	0,38	0,22	0,13	0,11	0,08	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01
10	1,0	0,74	0,40	0,22	0,14	0,15	0,10	0,05	0,08	0,04	0,12	0,08
11	1,0	0,72	0,42	0,21	0,18	0,25	0,16	0,11	0,24	0,18	0,31	0,27
12	1,0	0,72	0,43	0,29	0,23	0,44	0,36	0,30	0,44	0,39	0,53	0,45
13	1,0	0,71	0,45	0,36	0,35	0,65	0,69	0,54	0,73	0,64	1,00	1,00
14	1,0	0,71	0,50	0,48	0,55	0,92	0,86	0,81	1,00	1,00	0,75	0,75
15	1,0	0,70	0,58	0,62	0,71	1,00	1,00	1,00	0,84	0,80	0,56	0,56
16	1,0	0,72	0,63	0,78	0,94	0,93	0,88	0,83	0,63	0,69	0,41	0,40
17	1,0	0,76	0,70	0,95	1,00	0,78	0,71	0,68	0,45	0,43	0,26	0,25
18	1,0	0,81	0,79	1,00	0,95	0,62	0,56	0,50	0,32	0,29	0,14	0,12
19	1,0	0,84	0,88	0,96	0,82	0,45	0,39	0,35	0,20	0,15	0,06	0,04
20	1,0	0,88	0,98	0,87	0,69	0,33	0,25	0,21	0,11	0,08	0,03	0,01
21	1,0	0,90	1,00	0,77	0,54	0,25	0,18	0,14	0,07	0,05	0,02	0,0
22	1,0	0,94	0,98	0,66	0,44	0,18	0,14	0,10	0,04	0,03	0,01	0,0
23	1,0	0,99	0,93	0,57	0,35	0,15	0,10	0,06	0,04	0,03	0,01	0,0
24	1,0	1,00	0,87	0,50	0,30	0,13	0,08	0,05	0,04	0,03	0,0	0,0

Таблица Б.11. Шкала шероховатости речных русел и пойм

Характеристика русел и пойм			
n	**Равнинные реки**	**Полугорные и горные реки**	**Поймы**
0,020	Прямолинейные русла канализированных рек в плотных грунтах с тонким слоем илистых отложений	-	-
0,025	Естественные земляные русла в благоприятных условиях, чистые, прямые, со спокойным течением	Искусственные отводы русел, высеченные в скале	Ровная чистая пойма с низкой травой без сельскохозяйственного использования
0,030	Гравийно-галечные русла в тех же условиях	Гравийно-галечные русла в благоприятных условиях (чистые, прямые), J=0,8–1,0‰	Ровная пойма под пашней без посевов и пастбищем с низкой травой
0,040	Сравнительно чистые русла постоянных водотоков с некоторыми неправильностями в направлениях струй, неровностями дна и берегов и влечением донных наносов	Земляные русла периодических водотоков (сухих логов) в благоприятных условиях. правильные хорошо разработанные галечные русла в нижнем течении. J=0,8–1,0‰	Ровная пойма, занятая зрелыми полевыми культурами, пастбищем с высокой травой и вырубками без побегов, небольшое количество староречий и мелких просек
0,050	Значительно засоренные русла больших и средних рек, частично заросшие или каменистые, с неспокойным течением. Чистые русла периодических водотоков	Значительно засоренные каменистые русла с бурным течением. Периодические водотоки с крупногалечным покрытием ложа. J=7–15‰	Пойма, поросшая редким кустарником и деревьями (весной без листвы), изрезанная староречьями
0,065	Скалистые русла больших и средних рек. Русла периодических водотоков, засоренные и заросшие	Галечно-валунные русла с бурным течением. Засоренные периодические водотоки. J=15–20‰	Пойма под редким кустарником и деревьями с листвой или вырубками с развивающейся порослью
0,080	Речные русла, значительно заросшие, с промоинами и неровностями дна и берегов	Валунные русла в средней и верхней частях бассейна и периодические водотоки с бурным течением и взволнованной водной поверхностью. J=50–90‰	Поймы, покрытые кустарником средней и большой густоты (весной без листвы)
0,100	Русла рек, сильно заросшие, загроможденные стволами деревьев и валунами	Русла водопадного типа преимущественно в верховьях с крупно-валунным ложем и бурным течением. J=90–200‰	Поймы, занятые лесом при уровне ниже ветвей и кустарником средней и большой густоты с листвой
0,140	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода)	Русла с завалами из валунов и обломков скал и валунами. J=90–200‰	Поймы, покрытые лесом при затоплении ветвей, и густым ивняком
0,200	-	Русла с завалами из валунов и обломков скал	Глухие, сплошь заросшие, трудно проходимые поймы таежного типа.

Таблица Б.12. Примерное значение уклона водной поверхности реки (‰) вблизи створа в равнинных районах

Площадь водосбора км^2	**Рельеф местности**			
	возвышенности	**увалы**	**холмистые равнины**	**низменности**
100	2,84	1,70	0,72	0,28
500	1,60	0,96	0,41	0,16
1000	1,28	0,76	0,32	0,13
5000	0,70	0,43	0,18	0,07
20000	0,44	0,27	0,11	0,04
50000	0,32	0,19	0,08	0,03
100000	0,25	0,15	0,06	0,03

Приложение В

Рекомендации по оценке параметров формул I-го типа

В.1 Для исследуемой реки устанавливается природная зона, в которой расположен бассейн реки, и по картам определяются следующие основные морфометрические характеристики:

– площадь водосбора, (А, км^2),

– гидрографическая длина русла, (L, км),

– средневзвешенный уклон русла водотока, ($I_{р,}$ ‰),

– относительная озерность водосбора, ($А_{оз,}$ %),

– средневзвешенная озерность, ($А_{оз}^{'}$ %),

– относительная заболоченность водосбора, ($А_{б,}$ %),

– средняя высота водосбора (для горных и полугорных районов), м.

В.2 На основе использования данных гидрометеорологических наблюдений, опубликованных в официальных документах Росгидромета, выбирается группа гидрологически изученных рек (не менее 10), расположенных в гидрологоклиматических условиях, однородных с исследуемым районом. Для выбранных рек подготавливается сводка сведений о морфометрических характеристиках, приведенных выше в п. В1.

В.3 Для каждой из выбранных гидрологически изученных рек на основе статистической обработки многолетних рядов наблюдений за стоком воды определяется максимальный срочный расход воды дождевого паводка ($Q_{1\%}$) вероятности превышения P=1% в соответствии с требованиями разделов 4,5 СП и по формуле (8.13) настоящих Рекомендаций рассчитывается соответствующий максимальный срочный модуль стока ($q_{1\%,}$).

В.4 Строятся зависимости $q_{1\%} = f(A)$ и $q_{1\%} = f(\tau_p)$ на двухосной логарифмической клетчатке, по которым определяются значения степенных коэффициентов n и n_1, представляющие тангенс угла наклона прямой, отражающей в среднем тенденцию уменьшения максимального модуля стока с увеличением площади водосбора (А) или руслового времени добегания (τ_p).

В.5 При определении максимального срочного расхода воды по формуле (8.12) для каждой из выбранных рек по формуле (8.13) рассчитывается модуль максимального срочного расхода воды дождевого паводка вероятности превышения Р=1%, приведенный к условной площади водосбора, равной 200 км^2,

$$q_{200}^{'} = q_{1\%}(A/200)^n, \qquad (В.1)$$

где $q_{1\%}$ и A — те же, что для реки-аналога в формуле (8.13), n — показатель степени редукции

В.6 По данным для всей группы рек строятся графики связи: $q_{200}^{'}=f(A_{оз,}^{'}\%)$ при наличии сведений о средневзвешенной озерности; $q_{200}^{'}=f(A_{оз,\%})$ — при наличии сведений об относительной озерности, а также $q_{200}^{'}=f(A_{б,\%})$ — при наличии сведений об относительной заболоченности. На основе анализа полученных графиков связи выявляется наиболее значимый фактор регулирующего влияния

($A'_{оз}$, $A_{оз}$ или $A_б$), для которого устанавливается расчетная формула по определению поправочного коэффициента δ или δ_2.

В.7 При превалирующем влиянии озер (прудов, водохранилищ) строится зависимость вида $q'_{200}/\delta = f(A_б)$, а при превалирующем влиянии болот и заболоченных земель — зависимость вида $q'_{200}/\delta_2 = f(A'_{оз}$ или $A_{оз})$, на основе которой устанавливается структура расчетной формулы для менее значимого фактора (δ_2 — в первом случае или δ -во втором).

В.8 При определении максимального срочного расхода воды по формуле (8.13) с использованием для коэффициента $\varphi_м$ выражения (8.15) для каждой из выбранных рек по формуле (8.13) рассчитывается модуль максимального срочного расхода воды дождевого паводка вероятности превышения P=1%, приведенный к условной величине руслового времени добегания $\tau_р$ = 1440мин.,

$$q'_{1440} = q_{1\%}(\tau_р/1440)^{n1}. \qquad (В.2)$$

В.9 По данным для всей группы рек строится график связи $q'_{1440} = f(A'_{оз,\%})$ при наличии сведений о средневзвешенной озерности, а при их отсутствии — $q'_{1440} = f(A_{оз,\%})$ и устанавливается расчетная формула для определения коэффициента δ.

В.10 Коэффициенты δ и $\delta_а$ также допускается определять по формуле:

$$\delta = 1/(1+C_о A_{оз}). \qquad (В.3)$$

При наличии сведений только об относительной озерности ($A_{оз}$, %) значение $C_о$ для всех природных зон рекомендуется принимать равным 0,11; при наличии сведений о средневзвешенной озерности ($A'_{оз}$, %) значение $C_о$ рекомендуется принимать равным 0,2 для лесной и лесостепной зон, а для степной зоны — равным 0,4.

Коэффициенты δ_2 и $\delta_{2а}$ допускается определять по формуле:

$$\delta_2 = 1 - 0{,}5\lg(0{,}1A_б + 1), \qquad (В.4)$$

где $A_б$ — относительная площадь болот и заболоченных земель на водосборе (%).

В.11 При необходимости в структуру расчетных формул следует вводить дополнительные параметры, учитывающие другие виды естественного и искусственного регулирования максимального дождевого стока рек, а также влияние изменения средней высоты водосбора для полугорных и горных районов. При этом следует сохранить основной принцип разработки структуры формул для расчета поправочных коэффициентов, изложенный в настоящем приложении.

В.12 После разработки структуры расчетных формул по учету влияния озерности и заболоченности следует откорректировать значение степенного коэффициента n на основе анализа зависимости $q^*_{1\%} = f(A)$ и коэффициента n_1 — на основе анализа зависимости $q^{**}_{1\%} = f(\tau_р)$:

$$q^*_{1\%} = Q_{1\%}/A\delta\delta_2, \qquad (В.5)$$

$$q^{**}_{1\%} = Q_{1\%}/A\delta. \qquad (В.6)$$

Приложение Г

Порядок уточнения ординат кривых редукции осадков и параметров формулы предельной интенсивности

Г.1 Корректировку значений $q'_{1\%}$, следует производить поэтапно в следующей последовательности:

– на первом этапе (первая строка таблицы Г.1 для заданных значений бассейнового времени добегания $\tau_б$, мин, приводятся уточненные по сравнению с данными [Пособие, 1984] ординаты кривых редукции осадков 16,67 $\overline{\Psi}(\tau_б) = q_{1\%}/\varphi H_{1\%}$;

– на втором этапе (вторая строка таблицы Г.1) по формуле, приведенной в столбце 2, для каждого из заданных значений бассейнового времени добегания $\tau_б$, мин рассчитываются значения руслового времени добегания $\tau_р$, мин;

– на третьем этапе (третья строка таблицы Г.1) по формуле, приведенной в столбце 2, рассчитываются значения гидроморфометрического параметра $\Phi\tau$ для каждого значения руслового времени добегания, приведенного в строке 2, и соответствующего ему значения ординаты кривой редукции осадков 16,67 $\overline{\Psi}(\tau_б) = q_{1\%}/\varphi H_{1\%}$.

Таблица Г.1. Схема корректировки максимальных модулей стока $q'_{1\%}$ в долях от произведения $\varphi H_{1\%}$ (при $\tau_{ск}$= 30 мин.)

Номер этапа расчета	Вид расчета	Значения для $\tau_б$, мин, равных					
		5	10	20	40	...	1440
1	2	3	4	5	6	...	
1	16,67 $\overline{\Psi}(\tau_б) = q_{1\%}/\varphi H_{1\%}$	0,50	0,40	0,30	0,20	...	0,013
2	$\tau_р = [\tau_б - (\tau_{ск}=30)]^{0,91}/1,18$	–	–	–	6,88	...	622
3	$\Phi_\tau = \tau_р [16,67\Psi(\tau_б)]^{0,25}$	–	–	–	4,68	...	211

Примечание: при $\tau_{ск}$=10, 60, 100, 150, 200 (мин.) расчеты следует производить в том же порядке, что и для $\tau_{ск}$=30 мин.

Для перехода от расчетов, произведенных в таблице Г.1, к рекомендациям по выбору параметра $q'_{1\%}$, необходимо построить серию зависимостей $(q_{1\%}/\varphi H_{1\%}) = f(\Phi_\tau)$ для каждого из принятых значений $\tau_{ск}$, по которым следует определить значения $q_{1\%}/\varphi H_{1\%}$, соответствующие табулированным значениям $\Phi_р$ ($\Phi_р = \Phi_\tau$).

Г.2 Уточнение рекомендаций по определению сборного коэффициента стока φ для равнинных рек необходимо производить в следующем порядке:

1) для условного водосбора с площадью, равной 10 км^2, по формуле (8.20) определяется модуль максимального срочного расхода воды вероятности превышения P=1% на основе использования гидрометрических данных гидрологически изученных рек. Для исследуемых рек, расположенных в тундровой и лесной зонах, включаются в расчет водотоки с площадью водосбора менее 500 км^2, а для остальных — с площадью менее 300 км^2:

$$q_{10} = q_{200}\beta_{10}, \qquad (Г.1)$$

$$\beta_{10} = \frac{200^{\eta_{A=200}}}{10^{\eta_{A=10}}}. \qquad (Г.2)$$

где q_{200} — то же, что и в формуле (8.19); значения $\eta_{A=200}$ и $\eta_{A=10}$ — степенные коэффициенты, рассчитываются по уравнениям, приведенным в [Пособие, 1984].

2) для выбранных рек по формуле (4.18) рассчитывается продолжительность руслового добегания и по графику связи $\tau_p = f(A, км^2)$ определяется среднее значение τ_p^*, соответствующее площади водосбора 10 км^2;

3) по формуле (8.23) рассчитывается значение продолжительности бассейнового добегания $\tau_б^*$, используя полученное значение τ_p^* и рекомендации Г.4 относительно назначения $\tau_{ск}$;

4) по уточненным ординатам кривой редукции осадков определяется значение 16,67 $\overline{\Psi}(\tau_б)^*$, соответствующее значению $\tau_б^*$;

5) для каждого из выбранных водотоков рассчитывается коэффициент φ^* по формуле:

$$\varphi^* = q_{10}/[16{,}67\ \overline{\Psi}(\tau_б)^*\ H_{1\%}], \qquad (Г.3)$$

где q_{10} — то же, что в формуле (Г1), $H_{1\%}$ — то же, что в формуле (8.20);

6) строится график связи $\varphi^* = f(I_{ск,}\%_0)$ для выбранных рек с однородным (по типу и механическому составу) почвенным покровом, на основе использования которого уточняются рекомендации по назначению параметров n_2 и φ_0 в формуле (8.24).

Г.3 Для горных рек корректировку рекомендаций по назначению сборного коэффициента стока φ следует производить на основе использования данных гидрологически изученных рек, для которых значения φ определяются исходя из формулы (8.20) обратным путем. При этом необходимо исследовать степень влияния средней высоты водосбора, экспозиции склонов, а для районов, характеризующихся наличием многолетней мерзлоты, также характера распространения многолетней мерзлоты (сплошной, прерывистой или островной).

Г.4 При отсутствии возможности уточнения параметров φ_0 и n_2 в формуле (8.24) допускается проводить уточнение только параметра φ_0 согласно выражению

$$\varphi_0 = \varphi_0 \Psi_т(\tau_б)^* / \overline{\Psi}(\tau_б)^*, \qquad (Г.4)$$

где φ_0 — сборный коэффициент стока; $\overline{\Psi}_т(\tau_б)^*$ — уточненная ордината кривой редукции осадков, соответствующая заданной величине $\tau_б^*$; $\overline{\Psi}(\tau_б)^*$ — ордината кривой редукции осадков, принимаемая по [Пособие,1984] посредством исключения значения «16.67» из величин 16.67 $\overline{\psi}(\tau_б)$.

Приложение Д*

Пространственная интерполяция гидрологических характеристик с использованием ГИС-технологии

При выполнении гидрологических расчетов при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в расчетном створе (пункте проектирования и при решении других задач инженерной гидрологии) требуются сведения о пространственном распределении гидрологических характеристик и параметров расчетных схем и формул, которые могут быть вычислены с помощью пространственной интерполяции. При пространственной интерполяции значения гидрологических характеристик и параметров в любой неизученной точке рассматриваемой территории определяются через известные значения в соседних пунктах наблюдений. Построение наиболее точной из возможных непрерывных поверхностей, проходящей через все выбранные опорные точки измеренных значений гидрологической характеристики, является основной задачей пространственной интерполяции. Рассчитанная поверхность в дальнейшем может использоваться для трехмерной визуализации пространственного распределения изучаемой гидрологической характеристики или параметра региональной зависимости. Интерполяция может производиться по точечным данным (регулярно или нерегулярно распределенным в пространстве) или по данным, отображенным изолиниями (например, с учетов высоты местности). Выбор метода интерполяции зависит от точности результатов расчета (с учетом сглаживания случайных погрешностей исходных данных), числа и пространственного распределения исходных точек и линий. Кроме того, желательно знать, насколько точно выбранная функция интерполяции описывает распределение гидрологических характеристик и параметров в пространстве. При построении карт пространственного распределения гидрологических характеристик используются правила, изложенные в разделе 5 настоящих Рекомендаций.

Наиболее часто пространственная интерполяция осуществляется для следующих гидрологических характеристик, параметров кривых обеспеченности и параметров расчетных схем и формул:

— средние значения, или норма стока гидрологических характеристик,
— коэффициенты вариации и асимметрии гидрологических характеристик,
— обеспеченные значения гидрологических характеристик,
— параметры редукционных зависимостей гидрологических характеристик
— карты гидрологических характеристик за конкретные годы и многие другие.

---

* Замечание от редактора:

В практике инженерных гидрологических расчетов ГИС-технологии практически не применяются и поэтому мало знакомы читателям настоящих рекомендаций. В связи с этим было приято решение дать более расширенное толкование данного раздела в сравнении с остальным содержанием Методических рекомендаций в Приложении. Вместе с тем важность рассмотренных вопросов в данном разделе по использованию ГИС-технологий настолько очевидна, что при определении расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в расчетном створе обойтись без некоторых сведений по использованию ГИС просто невозможно.

С помощью ГИС-технологии могут применяться две основные группы методов интерполяции: детерминированные и статистические. Наиболее полно методы интерполяции и статистического анализа представлены в ГИС-программе ArcGIS с расширением Geostatistical Analyst, подробно рассмотренные в книге [ArcGIS Geostatistical Analyst, 2002].

Д.1. Статистический анализ исходной информации

Статистический анализ, выполненный средствами ГИС — удобный инструмент для выявления особенностей исходных данных, их анализа и построения интерполирующей поверхности по отдельным точечным исходным значениям непрерывного в пространстве явления, оценки достоверности полученных результатов и их представления в наглядной для восприятия форме. Технология построения таких поверхностей включает следующие основные этапы: подготовку исходных данных, статистический анализ исходных данных, выбор метода интерполяции и оценку полученных результатов.

При подготовке исходных данных желательно осуществить приведение рассматриваемых рядов наблюдений и их параметров распределения к многолетнему периоду. Это связывается с необходимостью повышения точности определения расчетных значений гидрологических характеристик, а также параметров и коэффициентов расчетных схем и формул [СП 33-2003 2004, Методические рекомендации, 2007]. Кроме того, желательно осуществить оценку однородности и стационарности колебаний гидрометеорологических характеристик и их параметров во времени и пространстве [Пространственно,1984]. Большое внимание следует уделять оценке точности пространственной интерполяции на зависимом и, особенно, на независимом от расчета материале наблюдений [Рождественский А.В. и др., 1988]. Восстановление отсутствующей информации в пунктах гидрометрических наблюдений будет особенно полезно при картировании гидрологических характеристик за отдельные годы. По мере накопления новой гидрометеорологической информации альбом годичных карт гидрологических характеристик будет постоянно пополняться, что открывает новые возможности инженерных гидрологических расчетов при отсутствии данных наблюдений в расчетном створе и при решении других задач для различных отраслей народного хозяйства. Составление годичных карт гидрологических характеристик и параметров расчетных схем и формул особенно полезно при использовании ГИС-технологий.

Перед выполнением интерполяции целесообразно оценить: пространственную структуру исходных гидрометеорологических характеристик, экстремальные значения исходных данных, пространственные тренды рассматриваемых гидрологических характеристик. Кроме того, полезно осуществить анализ лучшего выбора интерполирующей поверхности, отвечающей современным представлениям пространственного распределения гидрологических характеристик. ГИС-технология позволяет выполнить этот анализ графически, путем построения гистограммы пространственного распределения вероятностей, построения карты, основанной на многоугольниках Тиссона, графической оценки нормаль-

ности распределения, оценки пространственного тренда и, наконец оценки пространственной структуры с использованием пространственной корреляционной функции, или с использованием структурной функции (вариограммы). Каждое из этих графических построений позволяет исследовать исходные эмпирические данные с различных точек зрения.

Пространственная гистограмма распределения

Для исследования плотности пространственного распределения данных строится пространственная ***гистограмма*** распределения рассматриваемой гидрологической характеристики. Гистограмма в данном случае представляет собой графическую пространственную функцию распределения рассматриваемой гидрологической характеристики, где по оси X — откладываются интервалы значений, а по оси Y — количество значений, попадающих в каждый интервал.

Методы интерполяции, используемые для построения поверхности, дают лучшие результаты при нормальном распределении исходных данных. Гистограмма нормального распределения имеет вид в форме колокола. Нормальность исходных данных может быть оценена на клетчатке вероятностей для кривых с умеренной асимметричностью. Следует особо подчеркнуть, что при ограниченности исходных данных наблюдений в пространстве, в практике гидрологических расчетов обычно используются кривые обеспеченности, представляющие собой распределение вероятностей превышении рассматриваемой в пространстве гидрологической характеристики. В качестве параметров аналитического распределения принимается центральное значение (среднее значение, или норма стока, мода и медиана), его изменчивость (среднее квадратическое отклонение, или коэффициент вариации) и коэффициент асимметрии, или отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации. Гидрологические характеристики речного стока обычно имеют положительную асимметрию, что связано с пределами простирания случайных переменных, то есть влиянием нижнего предела стоковых характеристик равного нулю ограничивающего функцию распределения со стороны нулевого значения. Если эмпирическое пространственное распределения гидрологической характеристики на клетчатке вероятностей для кривых с умеренной асимметричностью близко к прямой линии, то данное распределение близко к нормальному закону. Если эмпирическое распределение на этой клетчатке вероятностей, представляющей собой проекцию нормальной функции распределения на ось абсцисс, имеет вогнутый вид, то имеет место положительная асимметрия. Если же эмпирическое распределение рассматриваемой гидрологической характеристики имеет выпуклый вид, то будем иметь отрицательную асимметрию. В технической литературе по ГИС эту операцию обычно называют «***Нормальный график КК (квантиль-квантиль)***», который и используется для проверки нормальности пространственного распределения исходных данных при пространственной интерполяции. Данный инструмент позволяет сравнивать распределение наших данных с нормальным законом распределения вероятностей. Чем ближе точки графика лежат к прямой линии, тем распределение ближе к нормальному. Таким образом, нормальность распределения наших данных можно проверить, нанеся на клетчатку вероятностей нормального закону (клетчатка вероятностей для кривых с умеренной асимме-

тричностью) квантили эмпирического пространственного распределения этих данных. Отклонение эмпирического распределения от прямой линии будет свидетельствовать в данном случае об асимметричности изучаемого распределения. Если данные не отражают нормального распределения ни на **графике КК**, ни на кривой **обеспеченности нормального закона**, а также ни на пространственной гистограмме, перед тем как использовать статистические методы интерполяции, может возникнуть необходимость преобразовать данные, чтобы привести их к нормальному распределению. Существуют различные функции преобразования исходных данных к нормальному закону. В качестве примера можно привести процедуру логарифмирования исходных данных. Наиболее общий вид приведения исходных данных к нормальному закону предложил Г.А. Алексеев [Алексеев Г.А., 1971].

Анализ пространственного тренда

Если в данных существует пространственный тренд, он представляет собой неслучайную (детерминированную) составляющую пространственного распределения исходных данных. Пространственный тренд может быть представлен системой изолиний, закономерно изменяющихся исходных данных в том или ином направлении, например с севера на юг. При пространственной интерполяции гидрологических характеристик установление пространственного тренда в виде закономерно изменяющейся системы изолиний представляет собой наибольший интерес. Дело в том, что подобная система изолиний используется при определении расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений в расчетном створе при строительном проектировании и при решении многих других задач водного хозяйства. Можно вычесть этот тренд и продолжить анализ, моделируя значения гидрологических характеристик и параметров региональных зависимостей в опорных точках, после его вычитания. При моделировании остатков анализируются изменения на поверхности в более узком интервале. Полученные остатки представляют собой сумму случайных ошибок исходных данных и отклонения для очень малых водосборов под влиянием микро азональных факторов речного стока. Азональные факторы речного стока учитываются путем построения региональных зависимостей характеристик и параметров речного стока от различных факторов, например, от площади водосбора. Далее, исключая из полученных остатков влияние азональных факторов стока получим в чистом виде случайные погрешности исходных данных гидрологических характеристик, которые должны быть отфильтрованы при пространственной интерполяции элементов гидрологического режима. Есть основания полагать, что случайные погрешности исходных данных не коррелированны в пространстве, что должно быть учтено при исключении случайных погрешностей в результате процедуры сглаживания случайных погрешностей.

Каждый вертикальный отрезок на диаграмме (карте) представляет местоположение, а его высота пропорциональна значению в каждой точке набора исходных данных. Точки проецируются на перпендикулярные плоскости, соответствующие направлениям восток-запад и север-юг. Через спроецированные точки проводится линия (полином), наилучшим образом описывающая их расположение, которая моделирует тренды в определенных направлениях при

анизотропности поля рассматриваемой характеристики. Если линия данного направления близка к прямой, то это значит, что в данных нет тренда. Если тренд имеет U — образную форму, то для его описания подойдет полином второго порядка. При анализе тренда гидрологических характеристик лучше использовать метод кокригенга, учитывающего возможность учета зависимости рассматриваемого пространственного распределения гидрологического явления от различных факторов, например, от высоты водосбора, или площади водосбора.

Многоугольники Тиссена

Многоугольники Тиссена (или карта Вороного) использовались для анализа пространственной изменчивости исходных данных. Этот инструмент также известен как ячейки Дирихле, диаграмма Вороного или картирование по ближайшим пунктам наблюдений. Этот метод часто применяется для картирования атмосферных осадков и других гидрометеорологических характеристик. Суть его заключается в том, что в отсутствие другой информации лучшей оценкой интерполируемой величины в какой-то точке является ее значение в ближайшей точке наблюдений или в самом близком соседстве. Для определения этого значения вся исследуемая поверхность делится на многоугольники, стороны которых перпендикулярны отрезкам прямых, соединяющих опорные точки, и делят их пополам. То есть, полигоны создаются таким образом, чтобы каждая точка внутри полигона находилась к рассматриваемой опорной точке ближе, чем к любой другой опорной точке. Соседи опорной точки определяются как любая другая опорная точка, чей полигон имеет общую границу с выбранной опорной точкой.

Пространственная корреляционная функция

Пространственная корреляционная функция представляет собой зависимость коэффициентов парной корреляции в зависимости от расстояния между центрами тяжести водосборов. Пространственная корреляционная функция обычно нормируется по дисперсии рассматриваемой гидрологической характеристики. Вместе с тем пространственная корреляционная функция может быть построена и без нормировки на дисперсию. Аналогичным образом может быть построена с нормировкой и без нормировки ***Структурная пространственная функция***, которая связывает дисперсию расхождений опорных точек в зависимости от расстояний между центрами тяжести водосборов, на которые они отстоят друг от друга. В технической зарубежной литературе, посвященной географическим информационным системам, структурную ненормированную пространственную функцию называют ***вариограммой***.

Структурная пространственная функция отражает пространственную связанность (корреляцию) опорных точек и их соседей. Основная цель построения структурной пространственной функции — выбор параметров кривой, минимизирующей отклонение сглаживающей поверхности от эмпирических точек в соответствии с принципом наименьших квадратов. В отечественной технической литературе в области гидрометеорологии обычно используется понятие **пространственной корреляционной функции.** Между структурной и корреляционной функциями существует однозначная связь. Если нормированная по дисперс-

сии колебаний структурная функция имеет предел колебаний от ноля до двух, то нормированная по дисперсии колебаний пространственная корреляционная функция имеет пределы колебаний от минус единицы до плюс единицы. Если структурная функция с увеличением расстояния возрастает, то корреляционная функция с увеличением расстояния убывает. Следует особо оговорить, что обычно структурная функция при нулевом расстоянии, как правило, равна не нулю, что следует из теоретических соображений, а некоторому положительному значению. Это обстоятельство легко объясняется случайными ошибками исходных данных наблюдений и, возможно, случайными микро флуктуациями рассматриваемых гидрометеорологических характеристик. Аналогичным образом при нулевом расстоянии пространственная корреляционная функция, как правило, равна не единице, а некоторому положительному значению меньше единицы, что опять таки связано с влиянием случайных ошибок исходных данных и микро флуктуаций пространственной изменчивости гидрометеорологических характеристик.

Структурная функция также как и пространственная корреляционная функция опирается на предположение, что наблюдения на гидрометеорологических постах, расположенные ближе всего друг к другу, наиболее похожи. Каждая точка на графике представляет собой пару значений, где по оси Y откладываются разности значений в квадрате для каждой пары, а по оси X — расстояния между центрами тяжести водосборов. Близкие по расположению точки должны иметь малые значения структурной функции, или близкие к единице на пространственной корреляционной функции. По мере того как расстояние между парами точек увеличивается, значения этой функции тоже должны увеличиваться.

На определенном расстоянии рассеивание точек выравнивается, что указывает на то, что за пределами этого расстояния корреляция незначительна. Это расстояние является радиусом положительной корреляции, который в технической литературе по ГИС называется радиусом влияния.

Иногда в структурных функциях случается явление так называемого самородка (этот не совсем удачный термин введен в техническую литературу в среде ГИС), когда нулевому расстоянию соответствует не нулевое значение структурной функции за счет ошибок исходных данных, или случайных флуктуаций микро гидрометеорологических характеристик.

Значения структурной функции по оси y определяются по формуле:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{m}[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \qquad (Д.1)$$

где m — число пар точек с расстоянием h_i ,$Z(x_i)$ — значение переменной в положении i. Расстояния h между парами точек исходных данных называются задержкой (лагом, или параметром сдвига) в заданном направлении, если поле рассматриваемой характеристики анизотропно. Если же пространственная структура поля изотропна, то в таком случае направление при расчете структурной, или корреляционной функции не учитывается. Для изотропного поля желательно учесть статистическую однородность структурной и (или) пространственной корреляционной функций. [Пространственно-временные, 1988].

Структурная функция обеспечивает информацию о пространственной автокорреляции наборов исходных данных в случае изотропного поля рассматри-

ваемого элемента, однако она не обеспечивает информацию для всех возможных направлений в случае анизотропного поля. Для выбора модели структурной функции в случае анизотропного поля рассматриваемой гидрологической характеристики могут использоваться следующие функции: круговая, сферическая, показательная, Гаусса, линейная. Выбранная функция влияет на оценку неизвестных значений, особенно когда форма кривой около начала отличается значительно. Чем круче кривая около начальной точки, тем больше влияния на интерполяцию будут иметь самые близко расположенные точки исходных данных. В результате поверхность подгонки будет менее гладкой. Для наиболее точной подгонки различных типов явлений предназначены различные функции.

Д.2. Детерминированные методы пространственной интерполяции

Детерминированные методы интерполяции строят поверхности по опорным точкам с исходными значениями (Z) в известных координатах X, Y, используя математические функции.

Поверхность, построенная с помощью детерминированных методов, может проходить через все опорные точки (жесткая интерполяция) или рядом с ними (сглаженная интерполяция).

Если точечные данные не имеют ошибок измерений, используется точная схема интерполяции. Если известно или предполагается, что имеются существенные ошибки исходных данных, может быть выбрана схема сглаживания или фильтрации. Этот прием часто используется в гидрологии, т.к. все гидрологические характеристик, параметры и коэффициенты расчетных схем и формул всегда отягощены случайными погрешностями.

Метод глобального полинома

При использовании ***метода глобального полинома*** вычисление искомых значений производится с использованием всей выборки данных. Как правило, с помощью глобальных полиномов определяются глобальные тренды поверхности. Полином первого порядка — наклонная плоскость, второго порядка — поверхность с одной наклонной инверсией, третьего порядка — с двумя наклонными инверсиями и т.д. Полином первого порядка выглядит следующим образом:

$$Z(x_i, y_i) = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + e(x_i, y_i), \qquad (Д.2)$$

где $Z(x_i, y_i)$ — фактическое значение в точке (x_i, y_i); b_j — параметры, определяемые методом наименьших квадратов; $e(x_i, y_i)$ — случайная ошибка исходных данных. Полином второго порядка будет выглядеть как:

$$Z(x_i, y_i) = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 y_i^2 + b_5 x_i y_i + e(x_i, y_i), \qquad (Д.3)$$

и так далее до 10-го порядка.

Однако, если поверхность сначала имеет наклон, затем выравнивается, а потом снова наклоняется, попытка описать ее одной плоскостью хороших резуль-

татов не даст. Но, если поверхность разбивается на участки, результирующая поверхность обрисует опорные точки точнее. Этот прием является основой для интерполяции по методу ***локальных полиномов***. В этом случае для вычисления используются только измерения, выполненные в пределах определенных "окон" в окрестностях искомых точек. Окна можно передвигать, тогда значение поверхности в центре окна m(x,y) оценивается для каждой новой точки. Для полинома первого порядка:

$$m_0(x_i, y_i) = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i. \qquad (Д.4)$$

Для полинома второго порядка:

$$m_0(x_i, y_i) = b_0 + b_1 x_i + b_2 y_i + b_3 x_i^2 + b_4 y_i^2 + b_5 x_i y_i + e(x_i, y_i). \qquad (Д.5)$$

Линейная интерполяция — кусочный полином первого порядка, посредством которого поверхность совмещается с опорными точками.

Интерполяционная формула для интервала $[x_i, x_{i+1}]$ имеет вид:

$$f(x) = f_1 - \frac{f_{i+1} - f_i}{x_{i+1} - x_i} x_i + \frac{f_{i+1} - f_i}{x_{i+1} - x_i} x. \qquad (Д.6)$$

Этот способ интерполяции используется наиболее широко, возможно из-за его простоты. Он является точным методом. Если густота выборки чрезмерно низка, линейная интерполяция работает лучше, чем полиномы более высоких степеней. Ломаная интерполируемая поверхность может подвергаться сглаживанию. Однако сглаживание вносит некоторые искажения в интерполированные данные.

Способ выполнения двумерной линейной интерполяции зависит от того, находятся ли опорные точки в узлах регулярной сетки. Если находятся, применяется линейная сеточная интерполяция, известная как билинейный метод. Если опорные точки не находятся в узлах регулярной сетки, строятся нерегулярные сети, известные как THC (триангуляционная нерегулярная сеть).

Триангуляция Делоне. При этом методе интерполяции через точки измеренных данных строится сеть треугольников. Внутри треугольника можно рассчитать значение z в любой точке (z_0), используя уравнение плоскости, ограниченной тремя точками,

$$Ax + By + Cz + D = 0 \qquad (Д.7)$$

При данном методе триангуляции создаются крутые искусственные перерывы по сторонам треугольников. Перерывы можно сгладить косметически, применяя фильтр. Возникают проблемы, когда значения сторон треугольников сильно различаются. Поэтому в триангуляционных нерегулярных сетях применяется критерий Делоне: окружность, проведенная через три вершины треугольника, не должна содержать никакой другой вершины. Критерий Делоне сводит к минимуму различия в величинах углов треугольников и длинах сторон. Для построения сети Делоне имеются различные алгоритмы.

Триангуляция Делоне часто применяется для преобразования векторных данных в цифровую модель высот путем создания триангуляционной нерегулярной сети (THC).

Сплайн — разновидность кусочного полинома. Наиболее часто используются кубические сплайны, которые являются кусочными кубическими полиномами с непрерывными первыми и вторыми производными в узлах.

Компьютерная графика широко использует сплайн, потому что данный подход позволяет производить относительно быстрое вычисление и выдает сглаженные поверхности.

Метод обратных взвешенных расстояний. В данном методе используется предположение, что степень схожести объектов зависит от их взаимного удаления. Для определения значения переменной в искомой точке метод взвешенных расстояний использует опорные точки, расположенные в непосредственной близости от нее. Предполагается, что влияние каждой опорной точки уменьшается с увеличением расстояния от искомой точки. Опорные точки, расположенные в окрестностях искомой величины, получают большие весовые значения, чем удаленные. Формула метода выглядит следующим образом:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(s_i), \qquad (Д.8)$$

где $\hat{Z}(s_0)$ — искомое значение для точки s_0, N — число опорных точек, используемых в вычислениях; $Z(s_i)$ — измеренное значение в точке s_i; λ_i — веса, присвоенные каждой опорной точке, которые использованы в вычислениях. Сумма весов опорных точек должна быть равной 1. Веса определяются по следующей формуле:

$$\lambda = d_{i0}^{p} / \sum_{i=1}^{N} d_{i0}^{-p} \sum_{i=1}^{N} \lambda = 1, \qquad (Д.9)$$

где p — коэффициент веса; d_{i0} — расстояние между искомой и опорной точками.

Метод радиальных базисных функций. Метод интерполяции с использованием радиальных базисных функций позволяет строить поверхности, описывающие как глобальные, так и локальные вариации измеренной переменной. В этом случае используется набор из n базисных функций, по одной для каждой опорной точки. Интерполятором является линейная комбинация базисных функций:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \phi(\|s_i - s_0\|) + \omega_{n+i}, \qquad (Д.10)$$

где $\phi(r)$ — радиальная базисная функция , $r = \|s_i - s_0\|$ — расстояние между интерполируемой точкой s_0 и каждой опорной точкой s_i, а $\{w_i; i=1, 2, n+1\}$ — оцениваемые значения весов, которые вычисляются решением системы уравнений.

В качестве радиальных функций могут использоваться: плоский сплайн, сплайн с натяжением, регуляризированный сплайн, функция мультиквадриков, обратный мультиквадрик. Действие метода подобно натягиванию резинового листа на все опорные точки. Метод используется для построения сглаженных поверхностей для большого количества опорных точек (дает хороший результат для рельефа).

Д.3. Статистические методы интерполяции

В технической литературе по ГИС статистические методы интерполяции часто называют геостатистическими методами интерполяции.

Детерминированные схемы интерполяции, упомянутые ранее, имеют некоторые ограничения. В них не принимается во внимание пространственная структура, которая численно описывается пространственной корреляционной или структурной функциями в пределах выборки исходных данных. Расстояния рассматриваются только в геометрическом, но не в статистическом смысле. Большинство выборок данных гидрологических переменных имеет стохастический характер, т.е. они содержат структурный элемент и случайную составляющую.

Статистические методы основаны на математических моделях, учитывающих пространственную корреляцию (статистические взаимоотношения между опорными точками). С помощью таких методов можно не только построить искомую поверхность, но и получить количественную оценку точности выполненной интерполяции.

Кригинг — метод интерполяции, учитывающий не только удаленность точек, но и их взаимное расположение (аналогичен методу обратных взвешенных расстояний).

Известны различные формы кригинга: ординарный, простой, универсальный, индикаторный, вероятностный, дизъюнктивный. Кригинг метод используется для создания карт распределения различных параметров, выраженных с помощью изолиний, карт вероятности, квантилей и стандартных ошибок. Метод может быть жестким или сглаженным, если учитывает ошибки исходных данных и ошибки пространственной интерполяции.

В данном разделе основные принципы применения статистических методов рассматриваются на примере **метода ординарного кригинга**, который предусматривается использовать при обобщении гидрологической информации во времени и пространстве и который уже использовался в примерах, представленных в данном Приложении. Этот метод основан на формуле:

$$Z(i) = \text{м} + \text{е(i)}, \qquad \text{(Д.11)}$$

интерполятор: $Z = S\text{л}\ Z(i)$,

где $Z(i)$ — измеренное значение в точке i; л — вес для i-го значения (зависит от пространственной структуры поля рассматриваемого элемента гидрологического режима на основе пространственной корреляционной или структурной функции); м — постоянное среднее значение; е(i) — стандартная случайная ошибка исходных данных.

Кригинг — многошаговый процесс; он включает: статистический анализ исходных данных, оценку пространственной структуры на основе пространственной корреляционной или структурной функции и создание интерполирующей поверхности. Этот метод основан на положении, что исходные данные имеют нормальное распределение. Однако допускается использование этого методы при незначительной асимметрии исходных данных. В этом случае принцип наименьших квадратов при интерполировании сохраняется, но могут быть изме-

нены некоторые теоретические положения по оценке точности распределения ошибок пространственной интерполяции, аналогично тому, как это имеет место при регрессионном анализе гидрометеорологических характеристик, широко применяемом в практике анализа и обобщения гидрометеорологической информации. При нормализации исходных данных следует иметь ввиду, что после всех расчетов с нормализованными данными, необходимо будет осуществить переход от нормализованных данных расчета к не нормализованным исходным данным, что не редко вызывает определенные трудности. Поэтому рекомендуется при не столь существенной асимметрии, которая имеет место в исходных данных гидрометеорологических характеристик процедуру нормализации не производить. Другое дело, когда рассматриваются кривые обеспеченности гидрологических характеристик. В этом случае учет асимметрии крайне необходим при определении расчетных гидрологических характеристик.

Многие выборки данных слишком ограниченны, чтобы выполнить требуемый пространственный анализ прежде, чем осуществлена интерполяция методом кригинга. Выбор аналитической аппроксимации эмпирической пространственной (структурной) функции, также влияет на результат интерполяции. Многие из этих проблем, не требующих вычислений высокой точности, могут быть решены более простыми детерминированными методами.

Кригинг метод позволяет не только произвести интерполяцию, но и, что особенно важно, вычислить случайные средние квадратические ошибки интерполяции. Если данные подчиняются закону нормального распределения, истинное значение в 95% случаев будет находиться в интервале, определенном вычисленным значением ± двукратная стандартная ошибка интерполяции. В принципе, можно использовать метод кригинг и для асимметрично распределенных данных при небольшой асимметрии. В этом случае истинное значение будет отличаться от теоретического (95%) значения. С практической точки зрения отмеченные расхождения будут не столь большими при не очень большой асимметрии.

Кокригинг (совместный кригинг) — это метод, который может производить интерполяцию переменной величины с учетом нескольких других переменных, коррелирующих друг с другом. Например, распределение модуля стока (нормы годового стока) в зависимости от высоты местности.

Когда имеются выборки данных для двух переменных Z_1 и Z_2, которые связаны некоторым способом друг с другом, точность оценки кригинга иногда может быть улучшена совместным кригингом (кокригингом). Использование кокригинга учитывает совместную дисперсию между переменными Z_1 и Z_2. Эти две переменных должны быть основаны на тех же самых предположениях, которые рассматривались при рассмотрении простого кригинга.

Ординарный кокригинг рассчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} Z_1(\mathbf{i}) &= м_1 + e_1(\mathbf{i}), \\ Z_2(\mathbf{i}) &= м_2 + e_2(\mathbf{i}), \end{aligned} \qquad (Д.12)$$

где $м_1$ и $м_2$ — неизвестные константы; $e_1(i)$ и $e_2(i)$ — случайные ошибки.

Кокригинг предсказывает значения в неизвестных точках точно так же, как кригинг, но дополнительно еще использует информацию о других переменных для улучшения результатов интерполяции.

Д.4. Оценка точности интерполяции

Обычный метод для оценки точности результата интерполяции в статистике известен как *перекрестная проверка*. Она состоит в пропуске одной точки, оценке значения переменной в этом месте с помощью интерполяции и сравнении интерполированного и пропущенного значений. После этого процедура повторяется со следующей точкой.

В качестве показателя точности результата интерполяции могут использоваться следующие случайные ошибки (погрешности) интерполяции:

$$\text{Средняя ошибка} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))}{n}. \qquad (Д.13)$$

$$\text{Среднеквадратичная ненормированная ошибка} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))^2}{n}}. \qquad (Д.14)$$

$$\text{Средняя стандартная ошибка} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\sigma(s_i)}{n}}. \qquad (Д.15)$$

$$\text{Средняя нормированная ошибка} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{(\hat{Z}(s_i) - Z(s_i)}{\sigma(s_i)}}{n}. \qquad (Д.16)$$

$$\text{Среднеквадратичная нормированная ошибка} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\hat{Z}(s_i) - Z(s_i)}{\sigma(s_i)}\right]^2}{n}}. \qquad (Д.17)$$

где $\hat{Z}(s_i)$ — проинтерполированное значение; $Z(s_i)$ — измеренное или рассчитанное значение в точке наблюдения; $\sigma(s_i)$ — стандартная ошибка интерполяции для точки s_i.

Лучшая модель — та, средняя нормированная ошибка которой близка к нулю и которая характеризуется наименьшей среднеквадратичной ошибкой интерполяции.

Д.5. Выбор метода интерполяции

Выбор метода интерполяции зависит, прежде всего, от природы изучаемой переменной и связанной с ней пространственной структурой. Различные методы интерполяции производят разные интерпретации исходных данных, потому что каждый метод вычисляет значения переменной, используя свои алгоритмы, и соответственно имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому трудно дать жесткие правила выбора метода. Однако на основе испытаний разнообразных

методов интерполяции для гидрологического применения можно привести некоторые рекомендации:

– Десяти или менее точек данных достаточно только для определения общего тренда данных. При малой выборке неэффективна даже линейная интерполяция. В этом случае, как и с большим выборок данных, лучшую интерполяцию данных производят кригинг и метод радиальных базисных функций.

– Для интерполяции малых выборок (меньше 250 наблюдений) хорошие результаты достигаются применением кригинга с линейной структурной функцией и метода радиальных базисных функций.

– С рядами данных среднего и большого размера (более 250 точек исходных данных) хорошее представление данных дает триангуляция с линейной интерполяцией. Хотя кригинг или радиальная базисная функция работают медленнее, они также дают хорошее описание выборочных данных.

– Кригинг – один из наиболее гибких методов. Он полезен для интерполяции рядов данных почти любого типа. С большинством наборов данных весьма эффективен кригинг с линейной структурной функцией. Вообще, использование этого метода можно рекомендовать наиболее часто, потому что он производит хорошую интерполяцию для большинства наборов данных. Кригинг может экстраполировать значения Z вне диапазона данных.

– Метод обратных расстояний имеет тенденцию создавать вокруг точек данных концентрические контура, так называемые мишени. Метод не экстраполирует значения Z вне диапазона данных.

– Радиальная базисная функция весьма гибка. Она сравнивается с кригингом, так как производит лучшие полные интерпретации из большинства наборов данных.

– Триангуляция Делоне работает быстро. Когда обрабатываются даже небольшие наборы данных, метод вырабатывает удовлетворительные треугольные плоскости между точками данных. Метод не экстраполирует значения Z вне диапазона данных.

Д.6. Пример определения морфометрических и гидрологических характеристик бассейна Печоры с использованием ГИС-технологии

В районах с редкой сетью гидрологических постов для расчетов гидрологических характеристик весьма успешно может применяться метод картографического отображения. Он основан на создании и использовании гидрологических карт, отражающих пространственное распределение характеристик речного стока. В основу метода положена гипотеза, что характеристики стока, как и другие географические параметры, плавно изменяются в пространстве и зависят от географической зональности, поэтому они могут быть определены для любой точки гидрологической карты.

Для выполнения исследований выбрана река Печора, морфометрические параметры которой хорошо исследованы традиционными методами и опубликованы в справочных изданиях, известны также и гидрологические характеристики реки, полученные для различных по водности лет. Поэтому можно было вы-

полнить сравнение результатов измерений и расчетов, полученных с помощью ГИС-технологии, с надежными, неоднократно проверенными и опубликованными данными.

Расчет морфометрических характеристик

Выполнение любых гидрологических исследований и расчетов немыслимо без учета географических условий окружающей среды и морфологических особенностей изучаемых водных объектов и их водосборов. Эти географические характеристики определяются способами картометрических работ, которые до недавнего времени выполнялись вручную, с применением элементарных технических приспособлений. Для обеспечения однородности и сравнимости измеряемых величин были изданы [Методические,1960], строгое выполнение которых обеспечивало заданные точности измерений и периодичность их обновления.

Непрерывное совершенствование методов гидрологических расчетов выдвигает новые требования к точности, оперативности и унификации выполнения картометрических работ, которые уже не могут быть обеспечены их производством с применением старой технологии. Коренное изменение создавшегося положения может произойти только с применением новейших технологий информационных систем.

Перед выполнением картометрических работ и гидрологических расчетов с применением ГИС-технологии, желательно предварительно определиться с выбором проекции и масштаба цифровой карты для минимизации ошибок измерений.

Наименьшие ошибки измерения площадей получаются при использовании равновеликих проекций, а при измерении длин — равнопромежуточных. Для подготовки карт средних широт лучше подходят конические и азимутальные проекции. В экваториальных широтах предпочтительнее использовать цилиндрические проекции. А для полярных районов годны азимутальные и стереографические проекции. Проекция Гаусса-Крюгера, традиционно применяемая в России, неплохо подходит для расчета морфометрических характеристик небольших и средних бассейнов.

Масштаб исходных карт также влияет на точность цифровой информации. Оптимальные масштабы, позволяющие использование баз цифровых географических данных для решения проблем на уровне водосборов средних и крупных рек и административных округов, — от 1:100000 до 1:1000000. Для визуализации на экране и печати цифровые карты могут быть представлены в любом удобном масштабе.

На основе Цифровой векторной карты Мира в масштабе 1:1000000 [Digital Chart of the World, 1992.] была построена цифровая карта бассейна Печоры (рисунок Д.1), на которой и выполнены определения его морфометрических характеристик (таблица Д.1).

Длины и площади водных объектов рассчитываются автоматически, с помощью команд, заложенных в ГИС-программы. Рельеф цифровой векторной карты может быть использован для создания цифровой модели высот, по которой определяются границы водосборных бассейнов их площади, центры тяжести и средние высоты.

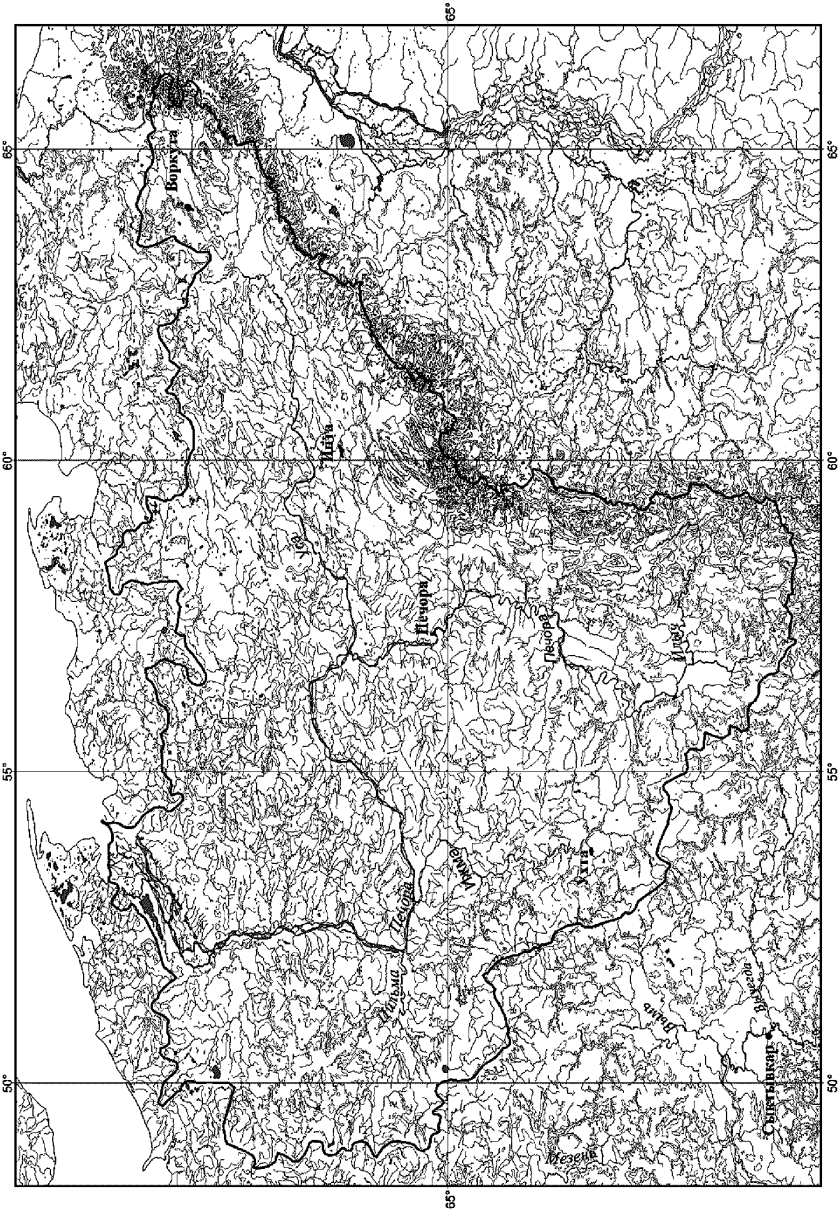

Рис. Д.1. Бассейн Печоры

Определение водоразделов бассейнов рек, впадающих в Печору, и их притоков было выполнено в среде ГИС-технологии (программное обеспечение ArcGis) с использованием цифровой модели высот Hydro1k [Hydro1k, 2000], которая по своей сути является математической матрицей рельефа местности с размером ячейки 30"x30". С применением Hydro1k были определены также границы водосборов до створов гидрологических постов на реках бассейна Печоры и средние высоты этих водосборов. Сравнение средних высот водосборов гидрологических постов, полученных средствами ГИС из базы данных Hydro1k, со справочными данными [ГВК. ОГХ. Т.3, 1975] приводится в таблице Д.2. Расхождения, в основном, невелики, но в отдельных случаях достигают 18%.

Таблица Д. 1. Морфометрические характеристики бассейна Печоры

Характеристики	Определенные с помощью ГИС	Опубликованные в [РПВ. т.3, 1972]	Расхождение, процент
Площадь водосбора, км^2 Площадь водосбора (с учетом рельефа), км^2	316700 316952	322000	1.6
Длина реки Печора, км Суммарная длина водотоков, км Количество притоков Густота речной сети, км/км^2	1680 46717 3337 0.1	1809 74855 2697	7.0
Средний уклон реки, ‰	0.363		
Средний уклон бассейна, ‰	33.4		
Суммарная площадь озер и водохранилищ (более 1 км^2), км^2 Озерность, %	1133 0.36	1203	5.8
Средняя высота водосбора, м	169		
Площадь болот, км^2 Заболоченность, %	23494 7.4	5–10	
Площадь лиственных лесов, км^2 Площадь хвойных лесов, км^2 Площадь смешанных лесов, км^2 Залесенность, %	43946 75154 101461 70		
Лесистая тундра Смешанная тундра Кустарники	66485 3462 23209		
Площадь городов, км^2 Количество населенных пунктов (крупных и средних) Урбанизированность, %	96 259 0.03		
Координаты центра водосбора Координаты пределов бассейна	54°.89E, 64°.89N 48°.62E – 66°.21E, 61°.45N – 68°.32N		

Таблица Д.2 (фрагмент). Средние высоты водосборов гидрологических постов реки Печора

Номер поста	Река — населенный пункт	Средняя высота водосбора, м		Расхождение, процент
		[ГВК. ОГХ. Т.3., 1975]	(ГИС)	
70494	Адзьва — д. Харута	142	135	4.9
70518	Айюва — ст. Керки	147	142	3.4
70486	Большой Кочмес — пос. Кочмес	141	126	10.6
70512	Ижма — д. Картайоль	156	145	7.1
70509	Ижма — с. Усть-Ухта	158	130	17.7
70506	Ижма — свх. Изваиль	201	205	2.0
70442	Илыч — крд. Шежимдикост	347	319	8.1
70444	Илыч — пос. Приуральск	326	300	8.0
70447	Когель — пос. Охотбаза	214	197	7.9
70489	Кожим — пос. Кожим Рудник	610	570	6.6
70499	Колва — с. Хорей-Вер	137	135	1.5
70487	Косью — пос. Косью	452	420	7.1
70505	Лая — гм. ст. Мишвань	123	130	5.7
70410	Печора — д. Якша	290	264	9.0
70414	Печора — с. Троицко-Печорск	242	230	5.0
70531	Пижма — д. Боровая	207	205	1.0
70530	Пижма — д. Левкинская	243	224	7.8
70517	Седью — пос. Седью	163	188	15.3
70451	Сойва — д. Сойва	225	210	6.7
70540	Сула — д. Коткино	97	95	2.1
70498	Сыня — свх. Сыня	308	280	9.1
70525	Тобысь — ст. .Тобысь	177	174	1.7
70439	Унья — д. Усть-Бердыш	402	376	6.5
70466	Уса — с. Петрунь	229	209	8.7
70463	Уса — ст. Сейда	234	217	7.3
70522	Ухта — г.Ухта	176	180	2.3
70497	Хоседа-Ю — пос. Хоседа-Хард	117	122	4.3
70532	Цильма — д. Номбур	147	147	0.0
70533	Цильма — с. Трусово	139	127	8.6
70458	Чикшина — ст. Чикшино	147	128	12.9
70455	Щугор — гм. ст. Верх. Щугор	512	466	9.0

Карты гидрологических характеристик

Для составления карт гидрологических характеристик была использована база гидрологических данных ГГИ [Вуглинский В.С., 2006], из которой сделана выборка информации по расходам воды на гидрологических постах бассейна Печоры. Кроме того, использовались дополнительно рассчитанные по цифровой модели высот [Hydro1k, 2000] и цифровой векторной карте [Digital Chart of the World, 1992] величины площадей бассейнов каждого гидрологического поста, их средние высоты и координаты центров бассейнов.

В целях получения пространственного распределения гидрологических характеристик по данным наблюдений в точках был построен ряд гидрологических карт для бассейна Печоры путем применения статистического метода интерполяции *кокригинг* (см. рисунок Д.1). Этот метод позволяет принимать в расчет не только данные измерений картируемых характеристик на гидрологических постах, но учитывать также и влияние высоты местности. Метод также позволяет оценить возможные величины стока в любой точке бассейна, в том числе и на неизученных притоках.

Карта среднемноголетнего слоя стока была получена по данным наблюдений на 51 гидрологическом посту (см. рисунок Д.2-а) за многолетний период (с 1960 по 1990 годы). Для составления карты слоя годового стока в бассейне Печоры за многоводный 1986 г. (обеспеченность – 20%) были использованы данные 54 гидрологических постов (см. рис. Д.2-б). Карта слоя годового стока в бассейне Печоры за маловодный 1980 г. (обеспеченность – 95%) была получена по данным 53 гидрологических постов (см. рисунок Д.2-в). Сама величина слоя стока относилась не к гидрологическому посту, а к центру водосборного бассейна каждого поста. Кроме того, как уже было упомянуто ранее, в качестве второй переменной величины при интерполяции точечных данных гидрологических постов использовались средние высоты их водосборов. В результате, картина распределения гидрологических характеристик на полученных картах хорошо согласуется с изображением рельефа водосбора (рисунок Д.1).

Эти карты дают возможность определить гидрологические характеристики не только в пункте измерений, но и в любой точке водосбора, в том числе и на водосборах притоков, не обеспеченных наблюдениями. В таблице Д.3 приведены, измеренные по цифровым картам (рисунок Д.2), значения слоя годового стока отдельных рек, впадающих в Печору.

Оценка точности пространственной интерполяции

Обычный метод для оценки результата интерполяции в геостатистике известен как *перекрестная проверка*. Она состоит в исключении из расчетов одной точки, оценке значения переменной в этом месте с помощью интерполяции и сравнении интерполированного и исключенного значений. После этого процедура повторяется со следующей точкой.

Перекрестная проверка позволяет оценить точность для различных методов интерполяции и на этой основе произвести выбор наиболее подходящего метода. Лучший метод – тот, чья средняя нормированная ошибка близка к нулю и который характеризуется наименьшей средней стандартной ошибкой интерполяции.

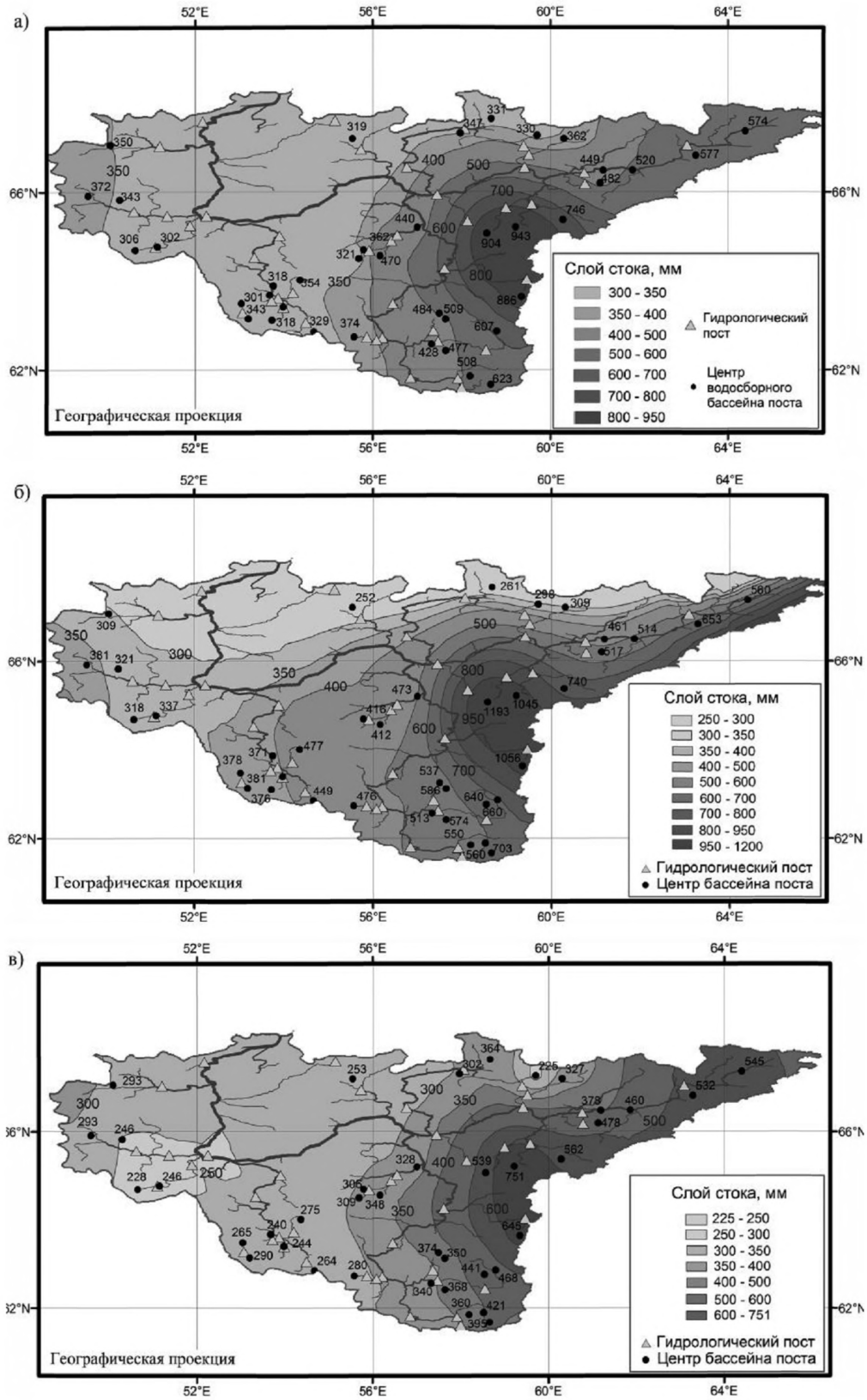

Рис. Д.2. Карты распределения слоя годового стока в бассейне Печоры
а) среднемноголетние значения б) за 1986 г. в) за 1980 г.

В данной работе оценивалась точность нескольких методов интерполяции: локального полинома, радиальных базисных функций и ординарного кокригинга. В результате тестирования метод кокригинга оказался предпочтительнее.

Таблица Д.3. Изменение слоя годового стока по длине р. Печора

Местоположение	Расстояние от истока, км	Среднемноголетний слой стока, мм	Слой стока за 1986 год, мм	Слой стока за 1980 год, мм
Исток	0	645	704	443
Устье р. Унья	167	607	645	425
Устье р. Илыч	410	524	598	413
Устье р. Мылва	450	493	564	409
Устье р. Велью	522	479	543	400
Устье р. Щугор	773	551	610	436
Устье р. Кожва	942	546	609	422
Устье р. Уса	1 056	529	569	419
Устье р. Лая	1 123	526	565	418
Устье. Ижма	1 355	493	537	375
Устье р. Пижма	1 391	487	529	368
Устье р. Цильма	1 395	475	513	360
Устье р. Шапкина	1 694	462	491	345
Устье р. Сула	1 769	443	483	338
Устье р. Печора	1 790	430	471	326

С применением цифровой модели высот Hydrolk были определены координаты центров тяжести водосборов (таблица Д.4), в которой сопоставляются значения годового стока в бассейне Печоры за 1980 год, полученные в результате интерполяции методом ординарного кокригинга, с величинами, измеренными на гидрологических постах, и оцениваются ошибки интерполяции в опорных точках.

Сравнительные данные по объему стока р. Печора, полученные в среде ГИС и по опубликованным данным ГВК и РВП

Используя программные модули Spatial Analyst и 3D Analyst программы ArcGis, по цифровым картам бассейна (рисунок Д.2) были определены объем и средний слой стока (таблица Д.5). Из таблицы видно, величины объема годового стока, рассчитанные с помощью ГИС-технологии, при сравнении с опубликованными ранее данными, полученными традиционными способами показали вполне удовлетворительную сходимость.

Продемонстрированные в примере методы расчетов могут применяться не только в отношении природных, но и административных регионов, что позволяет произвести оценку их водных ресурсов.

Таблица Д.4 (фрагмент). Результаты интерполяции слоя годового стока в бассейне Печоры за 1980 г. методом ординарного кокригинга и оценка ошибок в опорных точках

№ поста	Координаты центров водосборов гидрологических постов, град.		Годовой слой стока, мм		Ошибка, мм	Стандартная ошибка	Нормированная ошибка
	широта	долгота	измеренный	интерполированный			
70540	67,06	50,09	293	274	–19	90	–0,21
70505	67,20	55,54	253	316	63	111	0,57
70535	65,92	49,59	293	269	–24	64	–0,38
70238	63,76	51,42	259	252	–7	65	–0,10
70246	63,08	51,81	260	273	13	73	0,18
70522	63,49	53,04	265	269	4	51	0,08
70518	64,02	54,36	275	252	–22	60	–0,38
70176	62,38	54,26	267	264	–3	61	–0,06
70451	62,73	55,58	280	228	–52	28	–1,86
70589	64,50	55,69	309	306	–3	42	–0,07
70595	64,69	55,79	306	316	10	39	0,26
70570	62,57	57,33	340	347	7	49	0,14
70421	63,26	57,49	374	347	–27	41	–0,67
70447	63,13	57,64	350	390	40	38	1,05
70414	62,42	57,64	368	345	–23	47	–0,48
70466	66,82	63,28	532	487	–45	82	–0,55
70501	67,31	57,97	302	355	53	74	0,72
70410	61,86	58,19	360	381	21	46	0,45
70408	61,90	58,52	395	406	11	39	0,29
70444	62,76	58,54	441	438	–3	44	–0,08
70498	65,07	58,57	539	618	79	66	1,20
70439	61,67	58,66	421	380	–41	46	–0,89
70468	66,49	61,86	460	440	–20	66	–0,31
70442	62,86	58,79	468	480	12	45	0,26
12417	61,15	60,29	255	251	–4	79	–0,05
70525	63,15	53,20	290	252	–38	48	–0,80
70486	66,20	61,13	478	423	–55	48	–1,15
70455	63,64	59,35	645	597	–48	76	–0,63

Таблица Д.5. Гидрологические характеристики бассейна Печоры

Год	Определенные с помощью ГИС		Опубликованные в [ГВК. РПВ, 1987, 2003]	Расхождение объема стока, процент
	средний слой стока, мм	Объем стока, км^3	Объем стока, км^3	
Среднемноголетний (за период с 1960 по 1990 годы)	430	137	135	1.5
1986 (многоводный)	471	149	150	0.7
1980 (маловодный)	326	103	98	6.1

Список используемых источников

1. Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Издание официальное. — М.: Госстрой России, 2004. — 73 с.
2. Методические указания по оценке влияния хозяйственной деятельности на сток средних и больших рек и восстановлению его характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 130 с.
3. Методические рекомендации по учету влияния хозяйственной деятельности на сток малых рек при гидрологических расчетах для водохозяйственного проектирования. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. —167 с.
4. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. — Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. — 133 с.
5. СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения». Минстрой России, Москва, 1997. — 44 с.
6. СП 11-103-97 «Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства». Госстрой России, Москва,1997. — 29 с.
7. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 64 с.
8. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 248 с.
9. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных наблюдений. — С-Петербург: Ротапринт ГНЦ ААНИИ, 2007. — 66 с.
10. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 78 с.
11. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 448 с.
12. Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Использование материалов кратковременных гидрометеорологических изысканий в расчетах стока. Метеорология и гидрология, № 12.1991, с. 84–92
13. Рождественский А.В., Ежов А.В., Сахарюк А.В. Оценка точности гидрологических расчетов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. — 276 с.
14. Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — 270 с.
15. Лобанова А.Г., Рождественский А.В. Пространственные корреляционные функции речного стока рек бассейна Днепра. — Сборник работ по гидрологии, № 11. Л.: Гидрометеоиздат, 1973, с. 93–113.
16. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. — Л.: Гидрометеоидат,1962. — 545 с.
17. Виноградов Ю.Б. Перспективы использования математических моделей для расчета стока при строительном проектировании. Труды V Всесоюзного гидрологического съезда, том 6, — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — С. 34–43.

18. Виноградов Ю.Б., Кучмент Л.С., Рождественский А.В. Проблемы совершенствования теории и методов расчета стока. Генеральные доклады V Всесоюзного гидрологического съезда. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — С. 47–63.
19. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. — 190 с.
20. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 143 с.
21. Лобанов В.А. Общее динамическое моделирование пространственно-временных колебаний речного стока. Труды VI Всесоюзного гидрологического съезда, секция 5, — М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. — С. 219–223.
22. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализация корреляционных связей. — Л.: Гидрометеоиздат, 1971. — 363 с.
23. Алексеев Г.А. Методы оценки случайных погрешностей гидрометеорологической информации. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 94 с.
24. Лобанова А.Г. Оценка пространственной интерполяции годового стока рек бассейна Днепра. — Метеорология и гидрология, № 10, 1973, с. 104–109
25. Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Пространственно-временные колебания годового стока рек СССР. Труды V Всесоюзного гидрологического съезда, том 6, — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — С. 100–104.
26. Пространственно - временные колебания стока рек СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 376 с.
27. Владимиров А.М. Минимальный сток рек СССР.– Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 214 с.
28. Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года.– Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 296 с.
29. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. — 368 с.
30. Аржакова С.К. Зимний сток рек криолитозоны России. Санкт-Петербург: РГГМУ, 2001. — 209 с.
31. Сакович В.М., Сикан А.В., Малышева Н.Г.. Оценка влияния озерности водосборов на минимальный сток малых рек. СПб: РГГМУ, Ученые записки № 9, 2009.
32. Марков М.Л., Гуревич Е.В., О расчете минимального зимнего стока озерных рек // Сб. работ по гидрологии. — 2004. — С. 147–153.
33. Жукова М.А. Заторы льда на реках бассейна Северного Ледовитого океана и расчет наивысших заторных уровней воды. — Труды ГГИ, 1978, вып. 248, С. 129–138.
34. Бузин В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. — СПб., Гидрометеоиздат. 2004, 204 с.
35. Водный кодекс Российской Федерации. — (Собрание законодательства Российской Федерации, 2006, № 23, ст. 2380,2381) — М., 2008.
36. Методические указания управлениям гидрометслужбы № 56, 1960.
37. Вуглинский В.С. База данных ГГИ: Докладная записка 28.02.06 / ГГИ. — СПб., 2006. — 3 с.
38. Бурда Н.Ю., Лобанов В.А., Усачев В.Ф. Дистанционные средства слежения за наводнениями и географические информационные системы. — В кн.: ГИС

для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий. Материалы международной конференции «Интеркарто-4». Барнаул: Алтайский гос. университет, 1998, с. 527–533.
39. Усачев В. Ф. Применение последовательных аэрофотосъемок для исследования процесса затопления пойм. — Тр. ГГИ, вып.190, 1972, с. 57–71.
40. Энди Андерсон, Стив Джонсон. Настольная книга по Adobe Photoshop CS2. / перевод с англ. — Издательство НТ Пресс 2008, 808 с.
41. Электронный учебник по MapInfo Profession gost.e-ecolog.ru . ru/948589
42. Golden Software Surfer V. 8. gost.e-ecolog.ru
43. Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 15, вып. 2. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. — 408 с.
44. Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т. 3. Северный край. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 432 с.
45. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. — Ленинград, 1987. — 140 с.
46. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. — СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. — 115 с.
47. Методические указания управлениям гидрометслужбы № 56. Картометрические работы для получения гидрографических характеристик. — Л.: Гидрометеоиздат, 1960. — 97 с.
48. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972.– 663 с.
49. Digital Chart of the World. Disk 2 — Europe and Northern Asia [Electronic resource]: database — USA: Defense Mapping Agency., July 1992. — 1 электронно-оптический диск (CD-ROM); Системные требования: Pentium PC; Windows; CD-ROM — дисковод. — На англ. яз.
50. Hydro1k [Electronic resource]: global digital elevation model. — USA: USGS, 2000. — Режим доступа: gost.e-ecolog.ru . html. свободный. — На англ. яз.
51. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши — Том 1, вып. 5, бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер, Л., Гидрометеоиздат, 1986. — 688 с.

Содержание

Предисловие ... 3
Введение ... 4
1. Область применения ... 5
3. Термины и определения ... 6
5. Общие положения ... 8
5.1. Исходная гидрометеорологическая информация ... 8
5.2. Оценка качества исходной гидрометеорологической информации ... 10
5.3. Оценка качества определения расчетных гидрологических характеристик ... 12
5.4. Основные методы определения расчетных гидрологических характеристик ... 13
6. Годовой сток ... 20
6.1. Карты параметров распределения годового стока ... 21
6.2. Карты изолиний годового стока за конкретные годы ... 23
6.3. Поправочные коэффициенты к картам параметров распределения для малых рек ... 24
6.4. Региональные зависимости параметров распределения годового стока от основных факторов ... 26
6.5. Определение коэффициентов вариации, асимметрии и автокорреляции ... 27
6.6. Определение параметров стока на основе метода оптимальной линейной интерполяции ... 29
6.7. Определение значений стока по интерполяции по длине реки ... 30
6.8. Расчеты годового стока на основе суммы сезонных компонент ... 30
6.9. Учет влияния хозяйственной деятельности ... 32
7. Внутригодовое распределение стока ... 33
8. Максимальный сток рек ... 39
8.1. Весеннее половодье ... 40
8.2. Дождевые паводки ... 43
8.3. Гидрографы стока воды рек весеннего половодья и дождевых паводков ... 47
9. Минимальный сток воды рек ... 49
10. Расчет наивысших уровней воды рек ... 55
10.1. Полевые изыскания ... 55
10.2. Определение расчетных наивысших уровней воды, обусловленных весенним половодьем и дождевыми паводками на реках ... 55
10.3. Расчет наивысших зажорных и заторных уровней воды ... 56
11. Определение расчетных уровней воды за безледоставный период для установления границ водоохранных зон и прибрежных защитных полос ... 63
11.1. Основные положения, регламентирующие порядок определения границ водоохранных зон и прибрежных защитных полос ... 63
11.2. Методика определения береговой линии водных объектов при отсутствии данных наблюдений ... 65
12. Определение зон затопления для уровней воды различной обеспеченности ... 67
Приложение А. Примеры ... 72
А.1. Установление зависимостей параметров распределения годового стока

от факторов его обуславливающих 72
А.2. Расчет годового стока и его параметров распределения по годичным картам 83
А.3. Расчет годового стока по трем постам наблюдений на основе пространственной интерполяции 83
А.4. Расчет рядов годового стока методом оптимальной линейной интерполяции 84
А.5. Расчет максимальных, средних годовых, минимальных летних и зимних расходов и уровней воды по интерполяции по длине реки при отсутствии наблюдений в пункте исследования р. Обь — д. Медведево 85
А.6. Расчет годового стока в виде суммы сезонных составляющих по стокоформирующим факторам при отсутствии данных гидрометрических наблюдений 100
А.7. Расчет внутригодового распределения стока методом среднего распределения стока за годы характерной градации водности 102
А.8. Расчет внутригодового распределения стока методом реального года 105
А.9. Расчет внутригодового распределения стока методом компоновки 109
А.10. Расчет внутригодового распределения стока методом компоновки для лет маловодной и очень маловодной градаций водности 115
А. 11. Определение параметров n и А1 редукционной формулы (8.3) для расчета максимальных расходов весеннего половодья 118
А.12. Расчет максимальных расходов весеннего половодья р. Перовка — д. Гончарово 120
А.13. Пример расчета гидрографа весеннего половодья р. Перовка — д. Гончарово 123
А.14. Расчет минимального 30-суточного стока 126
А.15. Расчет минимального стока малых рек при наличии эпизодических и кратковременных экспедиционных наблюдений 127
А.16. Расчет минимального летнего 30-ти суточного стока ежегодной вероятности превышения 95% озерной реки 133
А.17. Расчет максимального заторного уровня воды 134
А.18. Расчет уровня озера 135
А.19. Расчет наивысшего уровня воды обеспеченностью 1%, 5%, 10%, на участке проектируемого мостового перехода на р. Лена 136
А.20. Расчет береговой линии водного объекта при отсутствии данных наблюдений 138
А.21. Расчет зон затопления 142
А. 22. Расчет максимальных расходов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений ручья Чернецкий у деревни Ситенка по формуле предельной интенсивности 150
Приложение Б. Таблицы 154
Б.1. Примерные сроки и продолжительность основных гидрологических сезонов для России и прилегающих территорий 154
Б.2. Условия применения расчетных формул по определению максимального расхода воды дождевого паводка заданной вероятности превышения 155
Б.3. Гидравлические параметры, характеризующие состояние и шероховатость русла водотока 156
Б.4. Коэффициент $m_{ск}$ 156
Б.5. Значения параметров α и n' в формуле для расчета коэффициента δ_1 156
Б.6. Значение параметра β в формуле для расчета коэффициента δ_2 157

Б.7. Отношение максимального мгновенного расхода весеннего половодья к максимальному среднесуточному расходу весеннего половодья в зависимости от природной зоны и площади водосбора 157
Б.8. Значения коэффициентов λ и a в зависимости от коэффициента несимметричности гидрографа K_s 157
Б.9. Относительные ординаты расчетного гидрографа стока воды $y = Q_i / Q_{p\%}$ при различных коэффициентах λ и k_s 158
Б.10. Относительные ординаты гидрографа внутрисуточного хода стока весеннего половодья y при различных коэффициентах $k_\tau = Q'_{p\%} / Q_{p\%}$ 159
Б.11. Примерное значение уклона водной поверхности реки (‰) вблизи створа в равнинных районах 160
Б.12. Шкала шероховатости речных русел и пойм 161
Приложение В. Рекомендации по оценке параметров формул I-го типа 162
Приложение Г. Порядок уточнения ординат кривых редукции осадков и параметров формулы предельной интенсивности 164
Приложение Д. Пространственная интерполяция гидрологических характеристик с использованием ГИС-технологии 166
Д.1. Статистический анализ исходной информации 167
Д.2. Детерминированные методы пространственной интерполяции 172
Д.3. Статистические методы интерполяции 175
Д.4. Оценка точности интерполяции 177
Д.5. Выбор метода интерполяции 177
Д.6. Пример определения морфометрических и гидрологических характеристик бассейна Печоры с использованием ГИС-технологии 178
Список используемых источников 188

gost.e-ecolog.ru