

Учреждение образования  
«Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина»

**А.А. Волчек, Т.А. Шелест**

# **ПАВОДКИ НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ**

Монография

Брест  
БрГУ имени А.С. Пушкина  
2016

УДК 556.166 (476)

ББК 26.233

В 67

*Рекомендовано редакционно-издательским советом Учреждения образования  
«Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина»*

*Рецензенты:*

главный научный сотрудник лаборатории трансграничного загрязнения  
и климатологии ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси»,  
академик НАН Беларуси, доктор географических наук, профессор

**В.Ф. Логинов**

заведующий кафедрой общего землеведения и гидрометеорологии  
Белорусского государственного университета,  
доктор географических наук, профессор

**П.С. Лопух**

**Волчек, А.А.**

В 67 Паводки на реках Беларуси : монография / А. А. Волчек,  
Т. А. Шелест ; Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина. – Брест : БрГУ,  
2016. – 199 с.

ISBN 978-985-555-503-3.

В монографии представлены результаты многолетних исследований динамики максимальных расходов дождевых паводков на реках Беларуси. По результатам комплексного анализа данных гидрометеорологических наблюдений за период инструментальных наблюдений выявлены закономерности пространственно-временных колебаний паводков на реках Беларуси в условиях изменяющихся естественных и антропогенных факторов, а также разработаны прогнозы их изменений.

Издание адресуетея специалистам в области водного хозяйства, природопользования, гидрологии и климатологии, а также студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

**УДК 556.166 (476)**

**ББК 26.233**

**ISBN 978-985-555-503-3**

© УО «Брестский государственный  
университет имени А.С. Пушкина», 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ФОРМИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ .....	9
1.1 История изучения паводков .....	9
1.2 Водный режим рек Беларуси .....	13
1.3 Гидрологическое районирование Беларуси .....	15
1.4 Механизм формирования дождевых паводков .....	21
1.5 Модули стока дождевых паводков .....	26
1.6 Факторы формирования дождевого паводочного стока .....	28
1.6.1 Метеорологические факторы .....	29
1.6.2 Факторы подстилающей поверхности .....	32
1.7 Условия формирования паводков в разные сезоны года .....	39
2 НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЛЕБАНИЙ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ .....	47
2.1 Источники исходной информации .....	47
2.2 Методика анализа пространственно-временных колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков .....	49
2.3 Методы прогнозирования дождевого паводочного стока .....	55
2.4 Особенности картографирования водных ресурсов .....	58
2.5 Оценка репрезентативности и однородности временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков .....	60
3 ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ И ОЦЕНКА ИХ ИЗМЕНЕНИЙ .....	68
3.1 Многолетние колебания максимальных расходов воды дождевых паводков .....	68
3.2 Оценка изменений величины максимальных расходов воды дождевых паводков .....	72
3.3 Пространственно-временные изменения паводкообразующих осадков .....	80
3.4 Роль типов циркуляции атмосферы в формировании дождевых паводков на реках Беларуси .....	85
3.5 Оценка асинхронности в формировании максимальных расходов воды дождевых паводков .....	88
3.6 Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков.....	92
3.7 Зимние паводки на реках Беларуси .....	97

4	МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ .....	108
4.1	Методы расчета максимального дождевого стока при отсутствии данных наблюдений .....	109
4.2	Определение модулей максимальных расходов воды дождевых паводков с использованием гидрографических характеристик водосборов .....	119
4.3	Анализ гидрографов дождевых паводков рек Беларуси .....	124
4.4	Построение гидрографов дождевых паводков .....	127
5	МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ .....	135
5.1	Соотношение величин максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий рек Беларуси .....	135
5.2	Цикличность максимальных расходов воды дождевых паводков	144
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	151
	ГЛОССАРИЙ .....	154
	ЛИТЕРАТУРА .....	157
	ПРИЛОЖЕНИЯ .....	170
А	Основные статистические характеристики временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси .....	170
Б	Многолетние колебания максимальных расходов воды дождевых паводков .....	172
В	Суточные атмосферные осадки 1 %-ной обеспеченности за различные периоды .....	179
Г	Годы с дождевыми паводками различной обеспеченности .....	180
Д	Годы с зимними паводками различной обеспеченности .....	183
Е	Гидрографы дождевых паводков рек Беларуси .....	185

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых опасных видов природных бедствий в мире являются наводнения. Они занимают ведущее место среди природных стихийных бедствий по повторяемости, охвату территорий и материальному ущербу. Несмотря на значительные капиталовложения в защитные мероприятия, ущербы от наводнений имеют тенденцию к росту. Основная причина этого – интенсивное освоение земель, для которых существует опасность наводнений.

На территории Беларуси также нередко отмечаются наводнения, которые формируются во время как весенних половодий, так и дождевых паводков.

В средствах массовой информации и даже в научной литературе половодья, паводки и наводнения часто называются одним термином – «паводок», несмотря на то что между этими явлениями имеются существенные отличия.

Согласно современным научным представлениям, половодье – это фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды и вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и атмосферных осадков. Главной особенностью половодья, обусловленной снеговой природой его происхождения, является то, что оно образуется только один раз в году.

Паводок – это фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года и характеризуется интенсивным, обычно кратковременным, увеличением расходов и уровней воды, вызывается дождями (дождевой паводок) или снеготаянием во время оттепелей. Паводки, в отличие от половодий, бывают по несколько раз в году и случаются часто неожиданно. В отдельные годы паводков может и не быть.

Относительная кратковременность прохождения паводков, меньшие объемы стока по сравнению с половодьем и различное время прохождения их в течение года на одной и той же реке составляют главное отличие паводков от половодий.

Формирование паводков на реках Беларуси прежде всего связано с западным переносом воздушных масс. Со стороны Атлантического океана вместе с циклонами, образующимися на полярном и арктическом фронтах, на территорию страны приходят длительные и интенсивные дожди и ливни, которые формируют дождевые паводки на реках. В зимнее же время с циклонами связаны оттепели, которые вызывают таяние снега и льда на реках, выпадение осадков и, как следствие этого, зимние паводки.

При высоких дождевых паводках затапливаются и подтапливаются большие площади посевов сельскохозяйственных культур, пастбищ, населенные пункты, повреждаются промышленные и транспортные объекты. Наибольшую опасность представляют летне-осенние паводки, которые формируются в период роста и уборки основных сельскохозяйственных культур. Ущерб от дождевых паводков превышает ущерб от весенних половодий. Самым паводкоопасным регионом Беларуси является ее южная часть – Белорусское Полесье, где неглубокое залегание грунтовых вод, плоский, практически без уклонов рельеф создают условия, при которых даже относительно небольшие дожди вызывают затопления в понижениях поймы.

В отдельные годы максимальные расходы воды дождевых паводков являются наибольшими в году и знание их необходимо при решении многих научных и практических задач (проектирование и эксплуатация мелиоративных систем, автомобильных и железных дорог, нефте- и газопроводов, оценка водных ресурсов и др.). От объективности оценки максимальных расходов воды зависит как безопасность гидротехнических сооружений, так и их экономическая эффективность.

Исследование условий и закономерностей формирования дождевого паводочного стока имеет длительную историю. Интерес к ним не ослабевает со временем, а наоборот, по мере совершенствования форм и роста освоения водных ресурсов, накопления новых фактов и углубления представлений о характере процессов, обуславливающих движение паводочных вод, появляются новые разработки и практические рекомендации по расчетам и прогнозам дождевых паводков.

Основное внимание ученых при изучении паводков было направлено на расчет максимальных расходов воды. Исследование же пространственно-временных закономерностей формирования паводков, условий их образования, роли различных факторов в их формировании является открытым вопросом. Это существенно затрудняет обоснование и разработку мероприятий по борьбе с катастрофическими паводками, масштабы разрушения и причинения ущерба от которых постоянно растут. Необходимо сфокусировать внимание на научно-исследовательских работах в области изучения паводков, а также организационных и практических работах, направленных на уменьшение ущерба от них. Предотвратить данное стихийное явление практически невозможно, но, зная заранее район и время возникновения паводка, можно принять неотложные меры, что уменьшит затраты на ликвидацию последствий от них.

Одним из актуальных направлений в области современных гидрологических расчетов является дальнейшее развитие и совершенствование существующих и разработка новых методов определения расчетных зна-

чений основных гидрологических характеристик. При этом существует проблема обобщения исходной гидрологической информации во времени и пространстве за многолетний период, в результате чего исходные данные гидрометрических наблюдений за последние 30–40 лет в должной мере не используются при решении ряда научных и практических задач инженерной гидрологии (при проектировании, строительстве, эксплуатации гидротехнических сооружений). А это существенно снижает точность определения расчетных гидрологических характеристик [132]. Подобная проблема является актуальной и для территории Беларуси, где также требуется уточнение параметров водохозяйственных объектов с учетом наблюдений последних десятилетий. Кроме того, в связи с наблюдаемыми изменениями в условиях формирования стока (вследствие увеличения антропогенной нагрузки, потепления климата) возникла необходимость оценки произошедших изменений в речных бассейнах и уточнения существующих методов расчета гидрологических характеристик в современных условиях.

В практических расчетах приходится сталкиваться либо с короткими рядами наблюдений, продолжительность которых не обеспечивает получения результата с требуемой точностью, либо с отсутствием гидрологических наблюдений (особенно часто на малых реках), что вызывает необходимость поиска новых эмпирических связей между дождевым паводочным стоком реки и факторами, его обуславливающими.

Таким образом, актуальность изучения дождевого паводочного стока обусловлена двумя обстоятельствами. Во-первых, паводки могут иметь большую высоту и разрушительную силу, причиняя значительный ущерб экономике страны, что требует не только объективной оценки и прогноза высокого дождевого стока, но и проведения противопаводочных мероприятий. Во-вторых, в отдельные годы максимальные расходы воды дождевых паводков являются наибольшими в году, что необходимо учитывать при решении многих научных и практических задач. Кроме того, дождевой паводочный сток может составлять значительную долю годового стока, соизмеримого со стоком весеннего половодья.

Накопленные за более чем 100-летний период данные наблюдений позволяют провести необходимые обобщения и установить закономерности пространственно-временных колебаний дождевого паводочного стока на реках Беларуси.

Монография посвящена анализу пространственно-временных колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков за период инструментальных наблюдений, оценке изменения их величины под влиянием как природных, так и антропогенных факторов. Использование современных методов обработки гидрометеорологической информации позволило разработать методику определения максимальных модулей

стока дождевых паводков и усовершенствовать методику построения гидрографов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

Авторы выражают искреннюю благодарность научным рецензентам – академику НАН Беларуси доктору географических наук, профессору В.Ф. Логинову и доктору географических наук профессору П.С. Лопуху за ценные замечания и пожелания, высказанные в ходе рецензирования рукописи.

# ГЛАВА 1

## ФОРМИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ

### 1.1 История изучения паводков

Оценка дождевых паводков является одной из важнейших и вместе с тем сложных проблем гидрологической науки. История изучения паводков представляет собой пример развития научной дисциплины, тесно связанной с практическими запросами хозяйственной деятельности, а именно гидроэнергетики, транспорта, сельского хозяйства, мелиорации, коммунального хозяйства и др.

Первыми источниками сведений о паводках современной эпохи являются исторические документы и летописи, а также археологические материалы. Накопленные в прошлом сведения о паводках имеют значение для выяснения некоторых важных и в настоящее время вопросов, в частности о повторяемости катастрофических паводков. Кроме исторических летописей, данные о паводках можно найти в трудах ученых разных специальностей. Путешественники-географы оставили описание характерных паводков, которые им пришлось наблюдать.

Учение о паводках многим обязано ученым-климатологам, среди которых ведущая роль принадлежит русскому ученому А.И. Воейкову, который изучал проблему атмосферной циркуляции, имеющей актуальное значение и для учения о паводках. Ему принадлежит идея известной гиперболической зависимости интенсивности ливней от их продолжительности (закон Воейкова), применяемую в расчетах паводков. Следует также отметить труды метеорологов Г. Вильда, М.М. Рыкачева, Б.И. Срезневского, А. Клоссовского, Э.Ю. Берга и др., в которых был поставлен вопрос о повторяемости и географическом распределении ливней.

Из других смежных областей науки имеют отношение к проблеме паводков геоморфология, почвоведение, учение о лесе. Здесь следует отметить труды русского ученого В.В. Докучаева.

Проблема паводков в практическом ее понимании, т.е. в смысле разработки расчетных методов, поставлена инженерами и учеными, работающими в области технических наук. С развитием техники стал актуальным вопрос о максимальном стоке в связи со строительством мостов, развитием железнодорожного и автомобильного транспорта, коммунального хозяйства.

Расчетные формулы максимальных расходов воды дождевых паводков очень многочисленны, а история их развития берет начало со второй половины XIX в. и связана с началом строительства в России железных дорог. Очень активно паводки изучались в первой половине XX в. Много-

численные исследования посвящены разработке методов расчета максимальных расходов воды неизученных рек [145; 149].

Так, первой расчетной формулой, которую Министерство путей сообщения России в 1882 г. ввело в действие для определения норм ливневого стока (несмотря на явную необоснованность) и которая была обязательной для всех железных дорог России, была формула австрийского инженера Кестлина (1868). В 1911 г. она была усовершенствована Л.Ф. Николаи. Первые известные нам методы, предложенные русскими инженерами, появились в России с введением норм Б.А. Риппаса (1867), Н.Н. Белинского (1877) и А.Н. Пушечникова для ливневых расходов (1883). В нормах Б.А. Риппаса и Н.Н. Белинского была сформулирована косвенно и в весьма грубом виде связь расхода с площадью водосбора.

Первым сделал попытку разработать теорию ливневого стока на основе учета добегаания при неустановившемся движении Ф.Г. Зброжек (1902). Детальным же исследованием стока в природной обстановке впервые начал заниматься Н.Е. Долгов (1906–1913).

Разработкой норм ливневого стока занимались Г.Д. Дубелир (1928), М.М. Протодяконов, а также Н.Н. Чегодаев и Е.В. Болдаков, которые более детально обосновали методику расчета величин осадков и полевое определение потерь стока заменили нормативными расчетными значениями и ввели в расчет переменную величину инфильтрации.

Значительный вклад в развитие методов расчета максимального дождевого стока внесли А.Д. Карачевский-Волк (1920–1940-е), М.Ф. Срибный (1950-е.), М.А. Великанов (1931), А.Н. Бефани (1939), Д.Л. Соколовский (1945), Г.А. Алексеев (1941), Г.Д. Ростомов (1959), И.И. Херхеулидзе (1959), А.В. Огиевский (1945), П.Ф. Вишневецкий (1955), И.А. Железняк (1965) и др.

А.Н. Бефани наиболее полно разработал теорию склонового стока ливневых вод, опираясь на уравнение динамического равновесия и неразрывности, или уравнение водного баланса склона. Его исследования являются наиболее фундаментальными в области теории ливневого склонового стока, содержащими подробный физико-математический анализ рассматриваемого процесса [17; 18].

Г.А. Алексеев (1940–1950-е гг.) основное внимание уделял разработке практически удобных схем расчета дождевого стока и внес ряд предложений, основанных на использовании модели изохрон стока [5; 6].

Д.Л. Соколовский вслед за А.Н. Костяковым (1931) для расчета максимального расхода воды принимает так называемую объемную формулу, которую обосновывает исходя из объема паводка и заданной схематизации его формы. При этом Д.Л. Соколовский основное внимание уделял учету с практической точностью лишь основных, ведущих факторов дождевого

стока, и его формула нашла широкое распространение в практике гидрологических расчетов [146–149].

Широкое применение получили региональные эмпирические зависимости, в которых в качестве главного аргумента, определяющего величину максимального стока, принимается площадь водосбора (Д.И. Кочерин, Б.В. Поляков, Д.Л. Соколовский, А.В. Огиевский, К.П. Клибашев и др.).

Статистическую (пространственно-временную) структуру полей жидких осадков изучали А.И. Воейков, Н.Е. Долгов, П.Ф. Горбачев [55], М.М. Протодьяконов, В.В. Лебедев, З.П. Богомазова и З.П. Петрова [22], В.К. Давыдов, Г.А. Алексеев [6], Д.Л. Соколовский, Ж.Д. Алибегова [9] и др. В их исследованиях были количественно оценены основные статистические соотношения, характеризующие убывание интенсивности ливней с увеличением их продолжительности и в связи с вероятностью повторения.

Важным и наиболее трудно поддающимся оценке элементом расчета дождевого стока является инфильтрация воды в почву. Исследованием этого процесса занимались А.Н. Костяков (1932), Н.Ф. Созыкин (1940), М.М. Протодьяконов (1932), С.А. Коль (1950), С.Ф. Федоров и особенно детально А.Н. Бефани (1949). Наиболее полный теоретический анализ процесса инфильтрации воды в почву выполнил Г.А. Алексеев. Экспериментальные исследования скорости стекания воды по склонам проводили П.А. Дудкин, Н.Д. Юневич, Н.В. Лалыкин и др.

В 60-х гг. XX в. в Государственном гидрологическом институте проведен анализ и обобщены существовавшие к тому времени методы расчета паводков, и в 1970 г. под руководством профессора А.И. Чеботарева был подготовлен первый общесоюзный нормативный документ для строительного проектирования по расчету максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии материалов гидрологических наблюдений. Он вошел составной частью в СН 435–72. Изложенные в нем методы расчета были несколько усовершенствованы в 1970-х гг. и приняты для практических расчетов в нормативном документе СНиП 2.01.14–83 [143].

Из зарубежных исследований расчетам паводков посвящены работы А. Хазена, В. Майерса (США), Д. Родда (Великобритания), Ж. Родье [129], Ж. Франку [163], М. Рош (Франция), С. Банерджи [13], Д. Гупта (Индия), К. Дьякону (Румыния) и др.

Одновременно с разработкой формул для расчета максимальных расходов воды проводились исследования с целью создания методов моделирования формы паводков и половодий (Д.И. Кочерин, Д.Л. Соколовский, В.Г. Андреев, Г.А. Алексеев и др.).

С конца 60-х – начала 70-х гг. XX в. развиваются методы математического моделирования гидрографов паводков с использованием ЭВМ

(Л.С. Кучмент, В.И. Корень, Ю.Б. Виноградов и др.) и электро моделирующих установок (Г.П. Калинин, А.Г. Левин, И.А. Шикломанов и др.) [91–93].

В 1967 г. в г. Ленинграде проходил Международный симпозиум по паводкам и их расчетам, в котором приняли участие ученые из более чем 30 стран. На нем рассматривались вопросы теории формирования и методики расчета паводков, а также влияния характеристик бассейнов на элементы паводочных гидрографов.

К настоящему времени в мире накоплен значительный материал по расчетам и прогнозам дождевых паводков, особенно на реках паводкоопасных регионов. Все они адаптированы к местным условиям. Так, фундаментальные научные труды в части прогнозирования и расчета характеристик максимального стока в Украине принадлежат А.В. Огиевскому, В.И. Мокляку, А.Н. Бефани и др. Значительный вклад в изучение паводков внесли также П.Ф. Вишневский, О.М. Мельничук, О.Г. Иваненко, М.Н. Соседко, Н.В. Лалыкин, П.М. Лютик и др. [149]. Весьма актуальна проблема паводков на реках Дальнего Востока, где паводки часто становятся причиной катастрофических наводнений.

Сбором и систематизацией сведений о наводнениях занимались А.Б. Авакян, Б.Д. Зайков, Г.И. Швец и др. [1–3; 70; 166]. Р.А. Нежиховский описывал наводнения, составил классификацию по масштабам подъема уровня воды в реках во время прохождения паводков, большое внимание уделял прогнозам наводнений и способам борьбы с ними [115]. Сбором и систематизацией данных о наводнениях и наносимых ими ущербах занимается также А.А. Таратунин [157; 158]. Большое количество работ посвящено проблеме наводнений в мире [2; 3; 158 и др.].

Среди белорусских ученых, занимающихся изучением стока рек, оценке влияния мелиораций и изменяющегося климата на характеристики режима рек, следует отметить Г.В. Азяву, А.Г. Булавко, К.А. Ключеву, В.Ф. Логинова, П.С. Лопуха, Ю.М. Покумейко, А.П. Станкевича, В.Ф. Шебеко, Г.С. Чекана и др. [4; 24; 26; 82–84; 101; 115; 122; 154; 156; 168; 169]. Исследованием закономерностей колебаний максимального стока весеннего половодья рек Беларуси занимается Ан.А. Волчек [46; 47].

Изученность механизма формирования дождевого паводочного стока в современных условиях изменяющегося климата, а также методы его расчета при отсутствии данных инструментальных наблюдений отстают от возрастающих потребностей практики. Эти трудности в изучении дождевого стока возникают из-за сложности механизма его формирования, многообразия стокоформирующих факторов, которые изменяются во времени и пространстве, а также из-за недостаточной сети гидрометрических наблюдений.

## 1.2 Водный режим рек Беларуси

Водный режим рек Беларуси в годовом разрезе характеризуется высоким весенним половодьем, относительно низкой летней меженью, периодическими паводками. В осенне-зимний период обычно наблюдается несколько повышенная водность рек в результате выпадения значительных осадков. Во внутригодовом распределении стока выделяются два максимума (весенний и осенний) и два минимума (летний и зимний).

*Половодье* – это фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды и вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и атмосферных осадков. В период половодья отмечается значительное увеличение водности реки, вызванное главным образом таянием накопленного за зиму снега. На половодье приходится в среднем 50–70 % годового стока. Наибольшие расходы воды отмечаются в основном весной. Начало половодья хорошо выражено и совпадает с первым днем интенсивного повышения водности реки. Окончание половодья, как правило, относят к моменту перехода от интенсивного снижения расходов воды (в период спада половодья) к более замедленному [100].

*Межень* – это фаза водного режима реки, наблюдающаяся в летне-осенний или зимний сезоны, характеризующаяся наличием относительно малых, устойчивых по величине расходов воды. В меженный период включаются паводки, если величина объема каждого из них не превышает 10–15 % объема стока за меженный период, предшествующий и последующий этому паводку. При частых и различных по величине паводках (пилообразный вид гидрографа) в меженный период не включаются паводки с максимальными расходами воды, превышающими предшествующие среднесуточные минимумы более чем в 3–5 раз [39].

*Паводок* – это фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года и характеризуется интенсивным, обычно кратковременным, увеличением расходов и уровней воды, вызывается дождями (дождевой паводок) или снеготаянием во время оттепелей. Паводки, в отличие от половодий, могут формироваться по несколько раз в году и случаются часто неожиданно.

На реках Беларуси паводки бывают почти ежегодно и наблюдаются в различное время года. Высота паводков в среднем составляет 0,4–0,7 м над уровнем межени. На реках Поозерья вода во время паводков может подниматься до 2 м, на Полесье – до 1 м. В отдельные годы высота летних паводков может достигать до 4–7 м над меженным уровнем [128].

На дождевые паводки приходится в среднем 15–20 % годового стока рек, в отдельные годы – до 40 % и более. Так, например, на р. Уборть – д. Краснобережье в 1988 г. объем дождевого паводка составил около 47 % от годового стока, в 1993 и 2007 гг. – около 38 %. В 2005 г. на р. Березовка – д. Саутки объем паводка составил 42 % от годового, на р. Улла – д. Бочейково – 33 %.

В зимний период сток на реках страны формируется главным образом за счет сработки запасов подземных вод, аккумулированных в пределах бассейна. На реках устанавливается зимняя межень, а осадки, выпадающие в виде снега, в дальнейшем участвуют в формировании весеннего половодья. Однако зимой нередки оттепели, вызывающие интенсивное таяние снежного покрова и разрушение льда на реках, которые часто сопровождаются выпадением осадков в жидком виде. Во время оттепелей на реках страны формируются зимние паводки.

Для количественной характеристики водного режима рек используют *гидрограф* – хронологический график изменения расходов (уровней) воды в реке. На рисунке 1.1 представлен типовой гидрограф рек Беларуси, который отражает общие черты внутригодового распределения расходов воды.

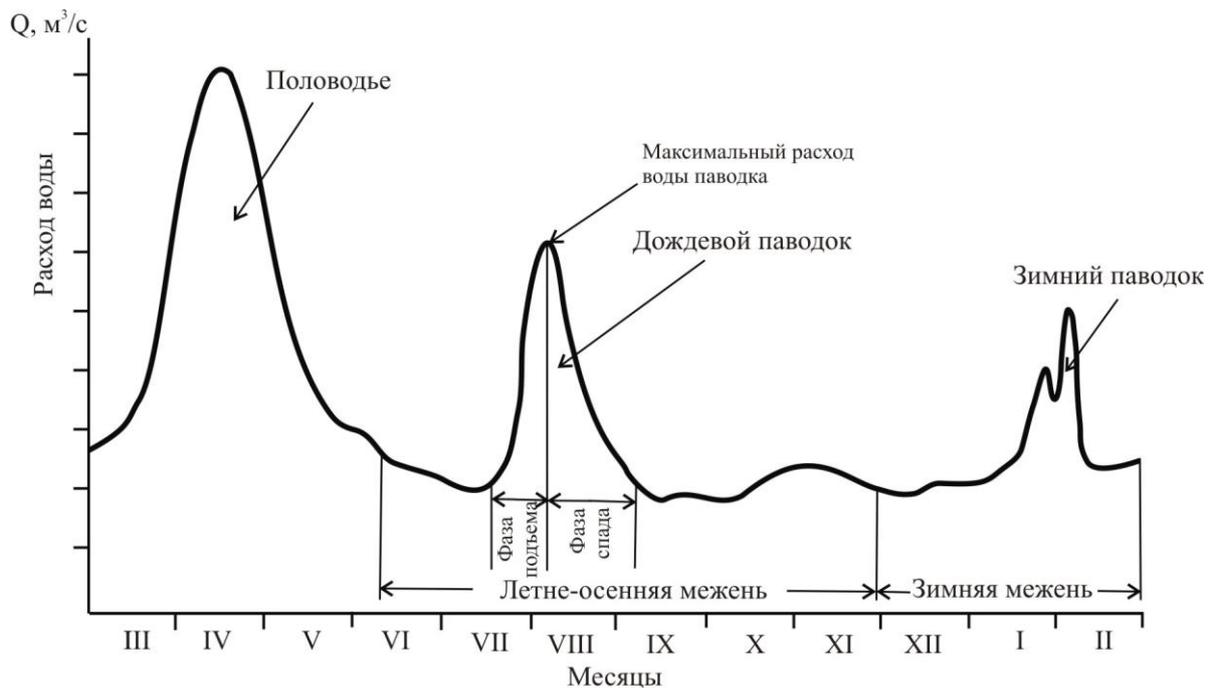


Рисунок 1.1 – Схема типовой гидрографа рек Беларуси

В настоящее время нет общепринятых признаков и норм в отношении того, какие подъемы воды следует считать паводками. При выборе и подсчетах паводков разными авторами принимаются разные подъемы воды. В общем к категории паводков относятся подъемы воды в реках любой высоты (и большие, и малые). На реках с малыми амплитудами колебания

уровней паводки, например, высотой 20 см будут заметны, а на реках с большими амплитудами колебания уровней такие паводки могут и не приниматься во внимание. Обычно за паводок принимаются такие подъемы воды, наибольшие расходы воды которых превышают среднегодовой расход данного года [86].

В соответствии с характером паводочного режима и с учетом методических рекомендаций следует отдельно рассматривать наибольшие единичные паводки в теплый период года и наибольшие дождевые или снего-дождевые паводки в холодный период года [128]. Под наибольшим понимается дождевой паводок, имеющий наиболее значительный максимальный расход воды среди всех паводков данного года (периода года). При выделении наибольших в году дождевых паводков за начало паводка принимается дата, предшествующая заметному подъему кривой на гидрографе. За окончание паводка принимается дата, соответствующая расходу воды на спаде паводка, равному предпаводочному. В тех случаях, когда все расходы воды на спаде паводка значительно больше предпаводочного расхода, на гидрографе строится «типовая» кривая спада паводка или кривая истощения стока, соответствующая характеру спада при отсутствии осадков в этот период. За дату окончания паводка принимается дата, соответствующая предпаводочному расходу, снятому с типовой кривой спада. Такое выделение границ паводка по «методу превышения» является формальным, т.е. начало и окончание паводка часто принимаются условно [128].

### **1.3 Гидрологическое районирование Беларуси**

По условиям гидрологического режима реки Беларуси принадлежат к типу равнинных с преобладанием снегового питания. Водный режим рек характеризуется большим разнообразием и находится в тесной связи как с метеорологическими условиями в данном районе, так и с особенностями подстилающей поверхности. В зависимости от величины стока, особенностей его внутригодового распределения, характера его связи с определяющими факторами территория Беларуси разделена на шесть гидрологических районов: Западнодвинский, Верхнеднепровский, Вилейский, Неманский, Центральноберезинский и Припятский (рисунок 1.2).

*Западнодвинский гидрологический район (I)* расположен на севере Беларуси и охватывает бассейн Западной Двины (рисунок 1.2).

Для него характерен молодой конечно-моренный ландшафт, рельеф которого сформировался под влиянием последнего поозерского оледенения. Возвышенности (Городокская, Витебская и др.) чередуются с плоскими низинами (Диснянская, Полоцкая и др.), выстланными донной мо-

реной и озерно-ледниковыми отложениями. Высоты колеблются от 120–160 м на западе до 160–220 м на востоке, что определяет общий уклон территории и сток с востока на запад. Основные подстилающие породы – известняки, доломиты, мергели и песчаники. Четвертичные отложения представлены главным образом валунными суглинками и глинами, частично флювиогляциальными и озерными песками [128; 120].

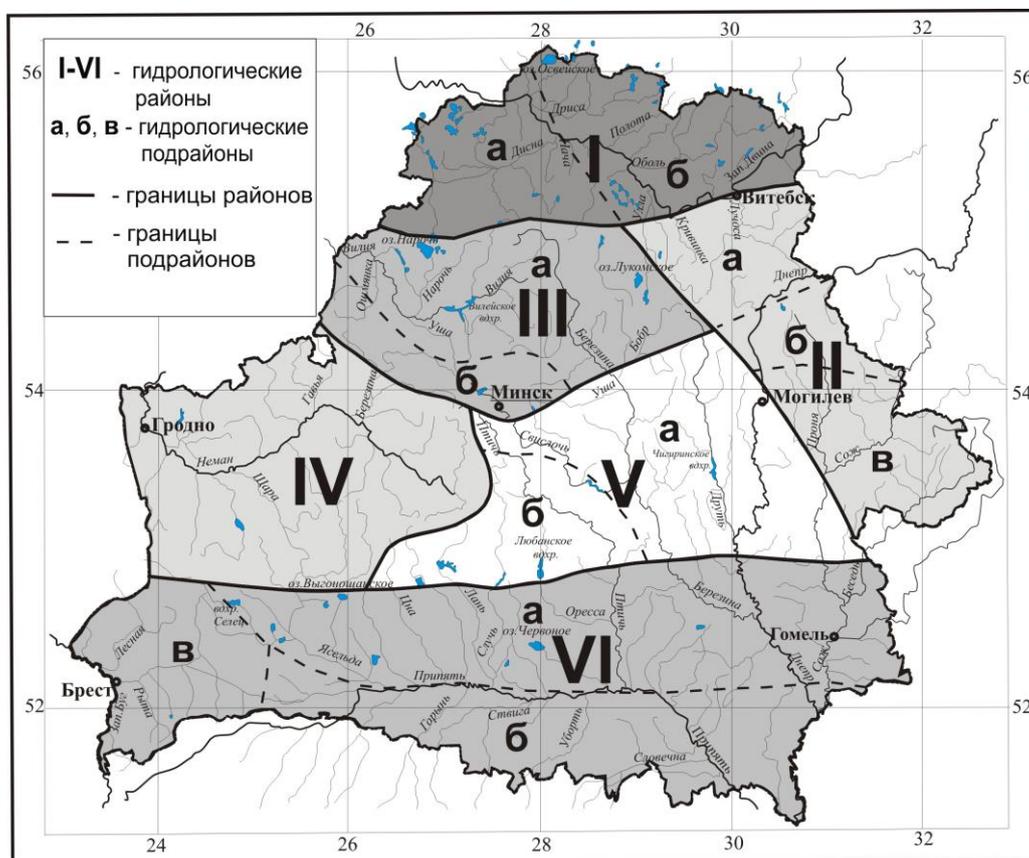


Рисунок 1.2 – Гидрологическое районирование Беларуси

Почвенный покров представлен суглинистыми и супесчаными разновидностями, частично встречаются тяжелые суглинки и глины. Имеются также торфяно-болотные и торфяные почвы.

Заболоченность района около 13 %. Болота в основном олиготрофные (верховые). Растительный покров характеризуется елово-дубовыми и еловыми лесами, местами встречаются сосновые боры. Лесистость района около 30 %.

Годовое количество осадков составляет 650 мм. На востоке отмечается максимальное количество дней со снежным покровом (около 120). Высота снежного покрова 25–30 см. Средний годовой дефицит влажности 2,6 мм. Средняя годовая температура воздуха 4,5–5,5 °С.

Характерной особенностью района является обилие на его территории озер, причем большая часть озер расположена в пониженной части района.

Средняя озерность района 3 %, максимальная – в бассейне р. Друйка (12 %). Большинство озер располагаются группами на водоразделах в истоках рек.

Район отличается хорошо развитой речной системой. Густота речной сети в среднем для района 0,47 км/км<sup>2</sup>, на возвышенностях она составляет 0,60–0,70 км/км<sup>2</sup>, в понижениях 0,35–0,40 км/км<sup>2</sup>. Реки в большинстве случаев вытекают из озер или протекают через них. Преобладающие уклоны рек 1,5–2 ‰, увеличиваются для отдельных малых водосборов или порожистых участков до 6–10 ‰. Долины рек отличаются молодостью, невыработанностью профиля, глубоко врезаны.

Реки района имеют, с одной стороны, некоторую естественную зарегулированность стока озерами, а с другой – хорошую обеспеченность поверхностным питанием. Средний многолетний модуль годового стока для более возвышенной (восточной) части района 7,5–10 л/(с·км<sup>2</sup>), для пониженной части – 6,8–7 л/(с·км<sup>2</sup>). Доля весеннего стока для большей части района составляет около 50 % от годового объема.

По условиям формирования стока и гидрологического режима рек район делится на два подрайона – Западный (а) и Восточный (б).

*Верхнеднепровский район (II)* расположен в восточной части Беларуси и включает бассейн Днепра (от Витебска до Могилева) и Сожа (до устья р. Проня) (рисунок 1.2).

Большая часть района расположена на Оршанско-Могилевской равнине. Рельеф грядово-холмистый, преобладают высоты 200–250 м. Северная часть района более возвышенная, поэтому наблюдается общий наклон поверхности с севера на юг. Основными породами, слагающими поверхность водосборов, являются суглинки и глины мощностью 20–50 м, местами до 100 м.

Почвы в основном подзолистые, глинистые и суглинистые, на юге района дерновые. Растительный покров представлен еловыми и елово-дубовыми лесами. Лесистость около 25 %. Заболоченность района низкая, около 7 %. Болота главным образом низинные. Озерность незначительная (менее 1 %). Озера преимущественно старичные.

Годовое количество осадков колеблется от 650 мм в северной части до 600 мм в южной. Средняя годовая температура воздуха повышается с севера на юг от 5,5 до 6,5 °С. Продолжительность устойчивого снежного покрова изменяется от 120 (на севере) до 100 дней (на юге), высота снежного покрова – от 25 до 20 см соответственно.

Гидрографическая сеть хорошо развита. На севере района начинается множество рек и ручьев. Рельеф и лёссовидные породы способствуют формированию глубоких оврагов, балок, ложбин стока. Густота речной сети близка к среднему показателю по стране – 0,44 км/км<sup>2</sup>. Преобладающие

уклоны рек 1–1,5 ‰. Средний многолетний модуль годового стока понижается с севера на юг от 6 до 5 л/(с·км<sup>2</sup>). В связи с низкой природной зарегулированностью стока реки отличаются высоким весенним половодьем и низким меженным стоком. Объем весеннего половодья достигает 70 % от общего годового стока.

В пределах Верхнеднепровского гидрологического района выделяют 3 подрайона, отличающиеся высотой над уровнем моря и условиями формирования стока – Северный (а), Центральный (наиболее возвышен) (б) и Южный (в).

*Вилейский гидрологический район (III)* расположен в северо-западной части территории Беларуси и охватывает бассейны рек Вилии, Березины (бассейн Днепра, до Борисова), верховья рек Уллы, Березины (бассейн Немана) и Свислочи (рисунок 1.2).

По характеру рельефа и геоморфологическим условиям район делится на две части – северную и южную. Северная часть включает Нарочано-Вилейскую и Верхнеберезинскую низины, южная – узкую полосу Минской и Ошмянской возвышенностей. В северной части преобладают высоты 180–220 м, в южной части достигают 300–345 м (наиболее высокая часть Беларуси).

Эти две части района соответствуют Северному (а) и Южному (б) гидрологическим подрайонам, различающимся по заболоченности и зарегулированности стока. Северный подрайон имеет заболоченность около 16 % и высокую естественную зарегулированность, южный подрайон – незначительную заболоченность, высокую искусственную зарегулированность стока (сток р. Вилия зарегулирован Вилейским водохранилищем и находится под влиянием забора части стока в Вилейско-Минскую водную систему) и нарушенный естественный сток.

Основными подстилающими породами являются мергели, глины, доломиты, песчаники и гипсы. Сверху они перекрыты водно-ледниковыми песчаными отложениями, что способствует выходу грунтовых вод в долинах рек.

Почвенный покров представлен в основном средне- и слабооподзоленными супесями, реже суглинками. На юге широко распространены лёссовидные породы и лессы. Лесистость района около 36 %, преобладают сосновые леса.

Годовое количество осадков составляет 650–700 мм. Средний годовой дефицит влажности воздуха около 2,9 мм. Средняя годовая температура воздуха около 6 °С.

Густота речной сети района 0,44 км/км<sup>2</sup>. Речная сеть представлена в основном короткими водотоками. Русла рек извилистые. Уклоны малых рек изменяются в пределах 3–5 ‰, средних – 0,4–0,8 ‰. Озерность района 1–2 %.

Сильное расчленение рельефа и повышенный эрозионный врез, а также озерное регулирование в Нарочано-Вилейской низине создают относительно устойчивый и высокий сток рек. Средний многолетний модуль годового стока составляет 6,5 л/(с·км<sup>2</sup>). Доля весеннего стока в годовом для рек северной части района в среднем составляет 46 %, южной части – 40 %. Минимальный сток рек наиболее высокий по сравнению с другими районами Беларуси. Вследствие значительных колебаний относительных высот и неоднородности глубин эрозионного вреза здесь могут наблюдаться значительные отклонения в распределении величины стока в годовом разрезе.

*Неманский район (IV)* расположен в западной части Беларуси и охватывает бассейн Немана от истока до границы с Литвой (рисунок 1.2).

Рельеф района грядово-холмистый и равнинный. Значительную часть занимают возвышенности (Новогрудская, Волковысская) древнего конечно-моренного происхождения, перекрытые водно-ледниковыми отложениями. Среди низменностей наибольшую площадь занимает Неманская. Преобладающие высоты 130–140 м. Четвертичные отложения представлены конечно-моренными образованиями, сложенными валунными суглинками и супесями.

Почвы преимущественно дерново-подзолистые супесчаные и песчаные, на возвышенностях преобладают суглинистые. Лесистость района 26 %, леса в основном сосновые. Около 10 % площади района занимают низинные болота. Озерность незначительная (менее 0,5 %). Крупных озер в районе нет.

Годовое количество 600–650 мм. Средний дефицит влажности около 3,0 мм. Средняя годовая температура воздуха 6–6,7 °С.

Густота речной сети 0,47 км/км<sup>2</sup>. Русла рек извилистые, не разветвленные. Преобладающие уклоны малых рек 2–3 ‰, средних – 0,3–0,6 ‰, больших – 7–9 ‰.

Подземное питание рек происходит главным образом за счет верхних горизонтов грунтовых вод, образующих большие скопления в толщах супесчаных, песчаных и легкосуглинистых отложений. Сток рек устойчивый и ровный на протяжении года. Средний многолетний модуль годового стока составляет 6 л/(с·км<sup>2</sup>). Доля весеннего стока составляет в среднем 44 % от годового.

*Центральноберезинский гидрологический район (V)* охватывает бассейны Днепра (от Могилева до Жлобина), Друти, Березины (от Борисова до устья р. Руднянка), Птичи (до устья р. Доколька), а также верховья Орессы, Случи, Морочи и Лани (рисунок 1.2).

Преобладающие высоты местности 150–160 м. Поверхность представляет собой обширную слабоволнистую равнину, сложенную в основном

песками водно-ледникового происхождения, мергелями и глинами меловой системы. Северо-западная часть района сложена известняками и доломитами девона, а южная окраина его – глинами третичной системы. Четвертичные отложения представлены в основном флювиогляциальными лёссовидными суглинками и лёссом значительной мощности.

Почвы разнообразны: супесчаные, песчаные, суглинистые, глинистые дерновые и легкосуглинистые. Для района типичны елово-широколиственные леса, значительные площади занимают также сосновые боры с общей лесистостью около 35 %. Заболоченность района колеблется от 17 (Предполесье) до 13 % (Центральноберезинская равнина).

Годовое количество осадков 600–650 мм. Средний годовой дефицит влажности около 3,1 мм. Средняя годовая температура воздуха 5,7 °С.

Густота речной сети 0,40 км/км<sup>2</sup>. Русла рек преимущественно устойчивые, неразветвленные. Преобладающие уклоны малых рек 0,8–1,5 ‰, средних 0,3–0,5 ‰. Средний многолетний модуль годового стока рек Центральноберезинской равнины 5,6 л/(с·км<sup>2</sup>), Предполесья – 4,9 л/(с·км<sup>2</sup>). Более выровненным стоком на протяжении года отличаются реки Центральноберезинской равнины, по которым доля весеннего стока составляет в среднем 53 % от годового объема. Реки Предполесья имеют более высокий сток весеннего половодья (около 59 % от годового) и более низкий в летне-осенний период.

Район делится на два подрайона – Березинско-Приднепровский (а) и Предполесский (б).

*Припятский гидрологический район (VI)* расположен на юге территории и охватывает бассейн Припяти без повышенных его окраин (верховья Птичи, Случи и др.), нижнее течение Березины (ниже устья р. Рудянки), Сожа (ниже устья р. Прони), Днепра (ниже Жлобина) и Западного Буга в пределах Беларуси (рисунок 1.2).

Район представляет собой плоскую древнеаллювиальную низину с чередованием отдельных гряд и обширных понижений. Преобладающие высоты местности 100–130 м. На северо-западе выделяется холмистый участок Прибугской равнины, на юго-востоке на фоне заболоченной низины – Мозырская и Хойникско-Брагинская гряды. Подстилающей породой является мел; над меловыми отложениями – пески, суглинки и пестрые глины. Четвертичные отложения – преимущественно пески аллювиального происхождения и лишь в незначительной мере суглинки и глины. Мощность четвертичных отложений достигает 30 м.

Почвы песчаные подзолистые и болотные. Лесистость района около 33 %. Преобладают сосновые леса, частично распространены дубово-грабовые леса. Большие площади заняты пойменными заливными лугами.

В гидрогеологическом отношении район характеризуется широко развитыми водоносными горизонтами, заключенными в четвертичных и коренных отложениях. Отдельные водоносные горизонты часто гидравлически связаны между собой и представляют единый водонасыщенный комплекс пород с мощностью в несколько десятков метров. Характерно высокое стояние уровня грунтовых вод (0,1–3 м от дневной поверхности). Обильные запасы грунтовых вод верхних горизонтов являются основными источниками подземного питания рек, однако вследствие неглубокого эрозионного вреза последних и очень малых уклонов подземный сток здесь замедленный и невысокий.

Район характеризуется наибольшей заболоченностью (в среднем 28 %), однако восточная и западная части заболочены меньше.

Густота речной сети района по сравнению с остальной частью территории Беларуси самая низкая – около 0,30 км/км<sup>2</sup>. Реки характеризуются очень низкой величиной падения, имеют широкие и плоские слабо выраженные долины, низкие заболоченные берега, медленное течение.

В отдельные годы наблюдается пересыхание рек с площадью водосбора до 1000–1200 км<sup>2</sup> и промерзание с площадью до 54 км<sup>2</sup>.

Годовое количество осадков 550–600 мм, средний дефицит влажности 3,3 мм. Средняя годовая температура воздуха 6,6 °С.

Средняя норма годового стока рек на севере 4,1 л/(с·км<sup>2</sup>), на юге – 3,5 л/(с·км<sup>2</sup>). Наименьшей естественной зарегулированностью стока отличаются реки северной части района, где весенний сток составляет 65 % годового объема. Здесь наблюдается наименьший в Беларуси меженный сток. Несколько большей зарегулированностью стока отличаются реки южной части района. Доля весеннего стока здесь составляет около 56 % от годового. В западной части района (бассейн Западного Буга) сток в течение года наиболее выравнен (весенний – около 46 % от годового).

В пределах Припятского гидрологического района выделяют 3 подрайона – Северный (а) (левобережные притоки Припяти), Южный (б) (правобережные притоки Припяти), Западно-Бугский (в).

#### **1.4 Механизм формирования дождевых паводков**

В формировании стока дождевых паводков можно выделить следующие основные процессы [51]:

- поступление воды на поверхность почвы;
- потери дождевых вод на впитывание в почву, поверхностное задержание и испарение при стекании воды по склонам;
- стекание воды с поверхности водосбора;
- стекание воды по руслам рек.

Характерной особенностью дождевых паводков является их генетическая неоднородность, под которой подразумеваются различные условия их формирования, динамики развития и режима стекания. А.Н. Бефани [17] предложил следующую генетическую классификацию видов склонового дождевого стока:

1) сток равнин при глубоком залегании грунтовых вод, возникающий от дождей более интенсивных, чем поверхностная фильтрация («подвешенный» сток);

2) поверхностный сток с равнин, возникающий при подъеме грунтовых вод к поверхности (равнинный «подпертый»);

3) надмерзлотный сток болотно-тундровых вод (преимущественно поверхностный) и смешанный болотный сток;

4) «подвешенный» поверхностный сток горных районов;

5) «подпертый» поверхностный сток с горных склонов, возникающий после насыщения рыхлых отложений, лежащих на относительном водопоре коренных пород или на мерзлоте;

6) «контактный» сток в слое рыхлых отложений, имеющий различные формы (дренажный, жильный, пластовый и т.д.);

7) внутрпочвенный сток равнин.

Часто разные виды стока сочетаются, переходят из одного вида в другой. Даже в пределах одного бассейна условия формирования паводков непостоянны, изменяясь в зависимости от интенсивности и слоя стокообразующего дождя, предшествующего увлажнения, состояния поверхности.

В условиях Беларуси из указанных видов склонового дождевого стока встречаются пять: поверхностный («подвешенный» и «подпертый»), внутрпочвенный («подвешенный» и «подпертый») и болотный. В связи с неглубоким залеганием грунтовых вод преобладающим является «подпертый» поверхностный сток, и водообразование определяется не столько разностью осадков и впитывания, сколько особенностями пространственного распределения емкости зоны аэрации и слоем дождя в период подтопления. На малых открытых водосборах может образовываться и «подвешенный» ливневый сток [19].

Для формирования паводка необходимо некоторое критическое количество выпавших осадков. Если осадков выпадает меньше этого количества, то паводка на реке не будет. Этот предел меняется с изменением площади и увлажненности водосбора, а также в зависимости от продолжительности и интенсивности осадков. Таким образом, осадки должны обладать параметрами, достаточными для зарождения и поддержания устойчивого или эффективного стокообразования, при котором формируется избыточная влага, расходуемая затем на питание паводков.

К началу дождя водосбор обладает определенной предельной поглотительной способностью, которая зависит от предшествующей гидрометеорологической обстановки и определяет начальные потери паводочного стока (потери, предшествующие началу стокообразования). Начальные потери стока связаны с расходами воды на заполнение неровностей поверхности водосбора, инфильтрацию, испарение. В условиях сухих грунтов и большого испарения происходят быстрые потери воды, поэтому даже большое количество осадков не всегда приводит к формированию дождевого паводка. Данные наблюдений показывают, что есть случаи, когда выпадение осадков в количестве более 80 мм за сутки не вызывало паводка на реках. И наоборот, в дождливую осень осадки менее 10 мм обращались в сток с минимальными потерями. Таким образом, при одинаковом количестве осадков в одних случаях может сформироваться значительный паводок, в других – паводка может и не быть.

От количества, интенсивности, продолжительности осадков, их распределения по площади водосбора зависит как объем стока паводка, так и его распределение во времени, т.е. форма гидрографа. Так, паводки, вызванные сильными ливнями, характеризуются высоким и резким подъемом и спадом, а вызванные обложными дождями являются плавными и продолжительными.

Для описания простейшего механизма формирования паводков используется генетическая формула стока (метод изохрон). Поскольку формирование дождевых паводков (как и снеговых) происходит в результате стекания дождевых вод по склонам, их добегаания по гидрографической сети и суммирования элементарных расходов, то общая схема формирования паводков основана на учете времени добегаания.

Уравнение водного баланса за период дождевого стока имеет вид [19]:

$$Y = X - P, \quad (1.1)$$

где  $Y$  – слой дождевого стока от осадков  $X$ ,  $P$  – слой потерь.

Одной из главных проблем расчета паводков является расчет потерь паводочного стока.

Потери стока – это суммарное (за некоторый интервал времени) количество воды, временно или безвозвратно задержанное в поверхностных и внутрипочвенных емкостях, а также испарившееся с площади водосбора.

При поверхностном задержании вода расходуется на смачивание растительного покрова и заполнение разного рода отрицательных форм рельефа и микрорельефа. Оно зависит в основном от физико-географических характеристик водосбора (рельефа, растительности, степени водопроницаемости верхнего слоя грунта). Задержание внутри почвы зависит от вододерживающей способности и влажности грунтов. Испарение с площади бассейна определяется как физико-географическими характеристиками во-

досбора, так и метеорологическими факторами и играет роль главным образом в промежутках между дождями. Доля испарения в величине суммарных потерь сравнительно мала, поэтому при расчетах и прогнозах дождевых паводков ею пренебрегают.

Основные потери дождевого стока связаны с инфильтрацией воды в почву, а потери на поверхностное задержание учитываются косвенно посредством параметров в эмпирических формулах.

Можно выделить четыре основные фазы инфильтрации [149]:

1) поверхностное смачивание и накопление в неровностях почвы, а также задержание растительным покровом;

2) просачивание в крупные почвенные поры, трещины и корневые ходы под влиянием силы тяжести;

3) впитывание в почвенные капилляры под влиянием молекулярных и капиллярных сил;

4) фильтрация в почву при полном ее насыщении.

Длительность начальной фазы, обусловленной поверхностной аккумуляцией дождевых вод, составляет в зависимости от интенсивности дождя от 0 до 30 мин и более, а потери дождя на поверхностное смачивание и аккумуляцию в зависимости от состояния почвы, характера микрорельефа и растительного покрова – от 0 до 100 мм.

Если фаза аккумуляции хронологически выделяется и относится к начальной фазе дождя, то вторая и третья фазы собственно инфильтрации могут происходить одновременно или последовательно в различном порядке в зависимости от характера почв. В последующем при насыщении почв инфильтрация переходит в установившуюся и практически постоянную величину фильтрации.

В первый период дождя (после поверхностного смачивания) интенсивность инфильтрации в капиллярные и некапиллярные поры почвы, свободные от воды, весьма велика. В последующем инфильтрационная способность почв в связи с заполнением почвенных пор водой резко падает и асимптотически приближается к установившейся величине фильтрации (рисунок 1.3).

Величина инфильтрации зависит от степени предшествующего увлажнения, интенсивности выпадения осадков, механических и водно-физических свойств почвы. Вполне понятно, что чем меньше дефицит влажности почвы и чем больше интенсивность дождя, тем резче будет происходить снижение интенсивности инфильтрации.

Теории инфильтрации посвящено большое количество исследований, в каждом из которых предложена та или иная схематизация почвогрунтов. Существует множество формул для определения интенсивности инфильтрации (А. Дарси, Г.А. Алексеев, Д. Филип, Р. Хортон, Е.Г. Попов и др.).

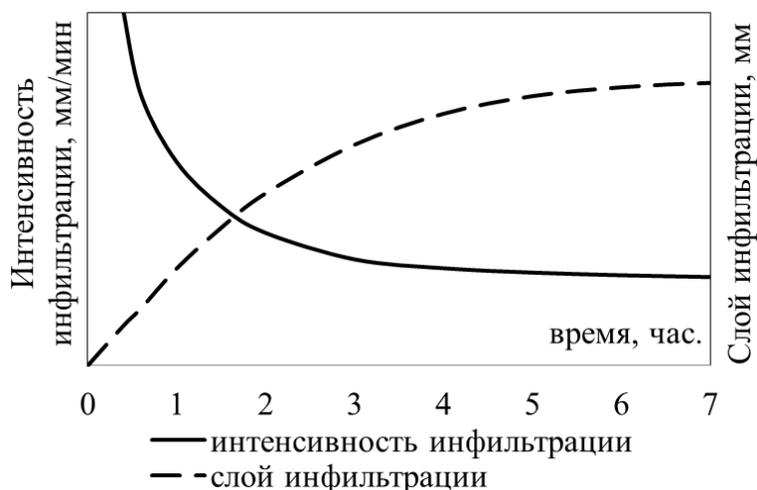


Рисунок 1.3 – Кривые зависимости интенсивности и слоя инфильтрации от продолжительности

Почвенное задержание – это слой воды, расходуемый на увлажнение почвы от предпаводочной до наименьшей влагоемкости. С этого момента и возникает подповерхностный сток. Средний по площади слой задержания зависит как от степени предшествующего увлажнения почвогрунтов, так и от осадков.

Следующей стадией формирования дождевых паводков, зависящей от свойств подстилающей поверхности, является стекание дождевых вод по склонам и добегание по руслу к замыкающему створу. Концентрируясь на склонах в мелкие ручейки, она стекает в ближайшие тальвеги, а по ним в ручьи и реки.

В условиях Беларуси, расположенной в лесной зоне, склоновое стекание происходит, как правило, внутрипочвенным или грунтовым путем. Паводки здесь формируются не от коротких ливней, аккумулирующихся в лесной, травяной, или моховой подстилке, а от продолжительных ливневых или обложных дождей.

Исследования стока в природной обстановке, выполненные Н.Е. Долговым в начале XX в., не потеряли своей актуальности. Он разграничивает понятие «идеального» стока, происходящего по непроницаемой поверхности бассейна при равномерной интенсивности ливня, и действительного стока, происходящего в природных условиях.

Явление идеального стока в случае, когда продолжительность дождя больше времени добегания, состоит из четырех фаз.

Первая, или начальная, фаза (рисунок 1.4) продолжительностью  $\tau_1$  охватывает период от начала выпадения дождя до начала образования стока по поверхности земли непрерывным слоем после заполнения углублений и неровностей поверхности.

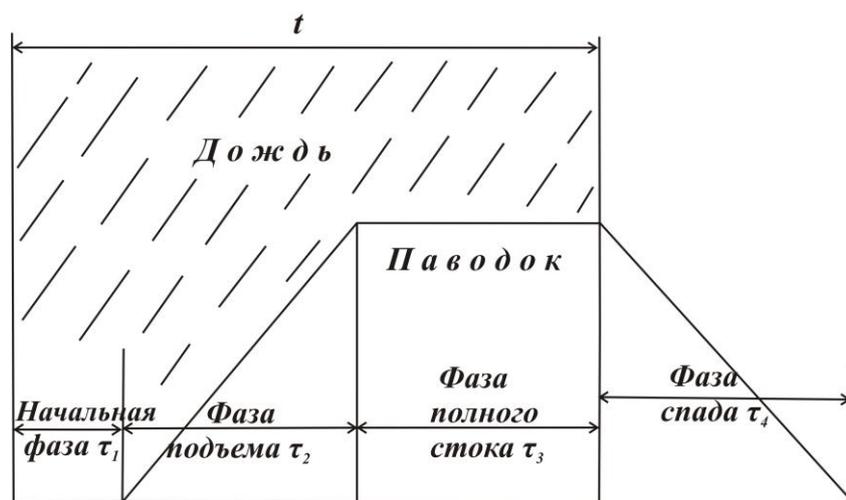


Рисунок 1.4 – Схема формирования дождевого паводка (по Н.Е. Долгову)

Вторая фаза продолжительностью  $\tau_2$  длится от начала образования стока непрерывным слоем до момента подхода к рассматриваемому сечению струй с отдаленных частей бассейна или до начала полного стока (т.е. фаза подъема).

Третья фаза продолжительностью  $\tau_3$  представляет собой период полного стока при стекании ливневой воды со всей площади бассейна, и, следовательно, во время этой фазы площадь стока равна площади бассейна. Явление полного стока прекратится в момент окончания дождя, когда площадь стока начнет убывать.

Четвертая фаза (фаза спада) продолжительностью  $\tau_4$  представляет период стока по прекращении дождя до окончания стока.

### 1.5 Модули стока дождевых паводков

Основной гидрографической характеристикой является *расход воды*  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  – объем воды, протекающий через живое сечение потока в единицу времени. Исходным для расчетов обычно является гидрометрический расход воды, измеренный или подсчитанный за 1 сутки и соответствующий наблюдаемому уровню воды, помещенному в таблицах ежедневных расходов воды за конкретный год. В гидрологических расчетах обычно используют статистические характеристики расхода воды, осредненные за сутки, месяц, сезон, год или другие периоды в многолетнем разрезе. Расход воды является базовой характеристикой для определения таких гидрологических характеристик, как модуль, слой и объем стока.

*Модуль стока*  $q$  – это количество воды, стекающей в единицу времени с единицы площади водосбора. Единицей измерения расходов воды в системе СИ является  $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ . Однако в силу установившихся традиций

достаточно часто модули стока выражаются в л/(с·км<sup>2</sup>)<sup>1</sup>. Модуль стока рассчитывают по формуле:

$$q = \frac{Q}{A}, \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2), \quad (1.2)$$

где  $A$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

Модули стока широко используют при анализе изменений количества стока по территории, сопоставлении стока различных рек, исследовании связи стока с определяющими его физико-географическими факторами и построении карт стока.

Важнейшей характеристикой паводочного стока является его максимальный расход. Различают наибольший средний суточный и наибольший мгновенный срочный расход воды. Эти величины существенно различаются на малых водотоках; чем крупнее река, тем это различие меньше.

Согласно нормативным документам расчетным расходом дождевого паводка является максимальный расход 10 %-ной обеспеченности. Поэтому на основе многолетних данных наблюдений на реках Беларуси нами определены модули максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности, а их пространственная структура представлена на рисунке 1.5.

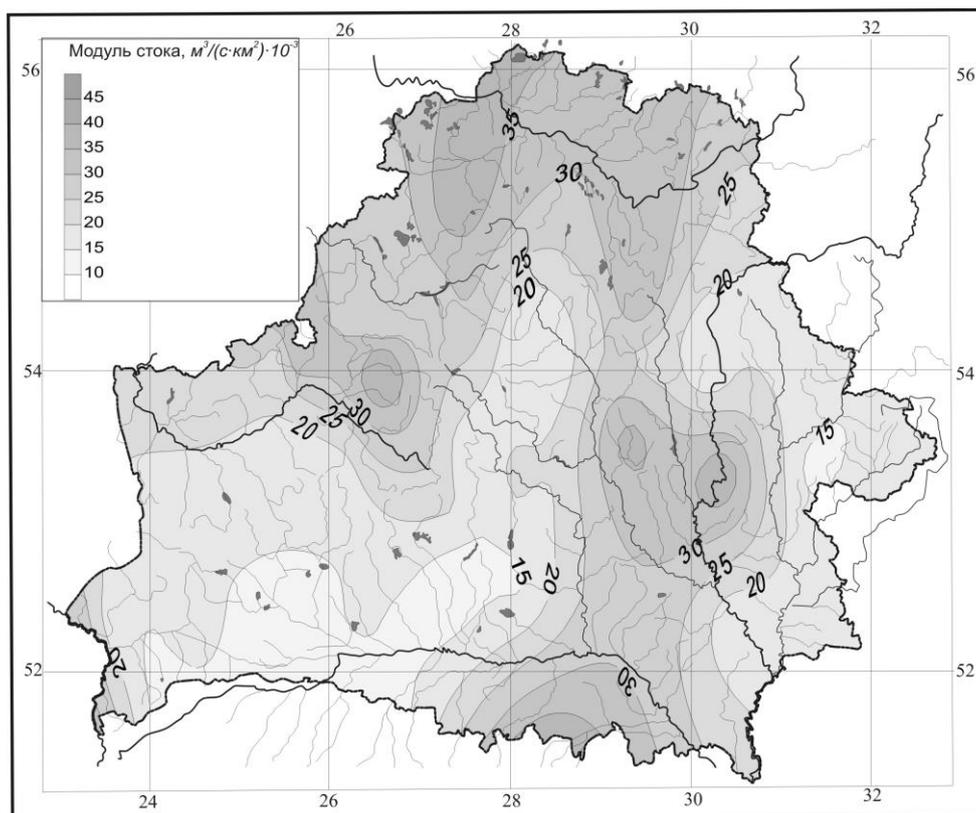


Рисунок 1.5 – Модули максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности

<sup>1</sup> Для перехода от л/(с·км<sup>2</sup>) к м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>) используется коэффициент 10<sup>-3</sup>.

Средние значения модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности на реках Беларуси составляют 20–25 л/(с·км<sup>2</sup>), причем они варьируют в широких пределах. Наибольшие значения модулей наблюдаются в бассейнах Западной Двины и Днепра (30–35 л/(с·км<sup>2</sup>)). На западе страны, в бассейне Немана, средняя величина модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности равна средней по стране, причем наименьшие значения отмечаются на левобережных притоках. В бассейне Припяти величина модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности наименьшая (10–20 л/(с·км<sup>2</sup>)), она возрастает на правобережных притоках до 30–35 л/(с·км<sup>2</sup>). В бассейне Западного Буга значения модулей стока паводков составляют 15–25 л/(с·км<sup>2</sup>).

Значения максимальных модулей стока дождевых паводков изменяются вместе с изменением количества осадков, температуры, испарения, характера рельефа, водно-физических свойств почв и др. Величина модулей также зависит от площади водосбора: обычно чем больше площадь, тем максимальный модуль стока меньше. На малых водосборах максимальные модули стока паводков могут достигать значительных величин. Так, на р. Исlochь – д. Боровиковщина ( $A = 624 \text{ км}^2$ ) модуль максимального расхода воды паводка 10 %-ной обеспеченности составляет 43,9 л/(с·км<sup>2</sup>), на р. Олышанка – д. Богданово ( $A = 201 \text{ км}^2$ ) – 41,3 л/(с·км<sup>2</sup>). На крупных реках модули максимальных расходов паводков небольшие: на р. Припять – г. Мозырь 6,5, на р. Сож – г. Гомель 10,6, р. Неман – г. Гродно 15,2 л/(с·км<sup>2</sup>).

Величина модулей максимальных расходов воды дождевых паводков зависит также от большого числа различных факторов, роль которых рассмотрена ниже.

## **1.6 Факторы формирования дождевого паводочного стока**

Формирование дождевых паводков на реках происходит под влиянием большого числа различных факторов, как природных, так и антропогенных, встречающихся в сложных сочетаниях, неповторимых во времени и индивидуальных в каждом бассейне. Поэтому четко выявить роль каждого из них путем анализа гидрометрического материала практически невозможно. Действие отдельных факторов на сток обусловлено совокупностью остальных, т.е. физико-географическими и гидрологическими особенностями водосборов [15]. В разных природных условиях одни и те же факторы могут оказывать различное влияние на сток как по величине, так и по направлению. Роль каждого фактора может быть оценена

только в сочетании с другими, т.е. функциональным выражением, отражающим природу взаимодействия факторов.

Факторы паводочного стока можно разделить на две основные группы:

I – метеорологические,

II – гидрографические (факторы подстилающей поверхности).

### **1.6.1 Метеорологические факторы**

Размеры паводков определяются в первую очередь метеорологическими факторами, главную роль среди которых играют стокообразующие осадки и предшествовавшие им метеорологические условия, сформировавшие влагозапасы бассейна, включая почвенную влажность, запасы подвешенных приповерхностных вод, задержание в депрессиях. Эти факторы являются зональными, т.к. величина их определяется географическими координатами бассейна. Они характеризуют водообмен бассейна с атмосферой – приход (осадки) и расход (испарение) влаги. Из метеорологических факторов основными являются атмосферные осадки – их количество, интенсивность, продолжительность и распределение по площади водосбора.

Территория Беларуси характеризуется достаточным увлажнением. Среднегодовое количество осадков составляет 600–700 мм, изменяясь от 520–550 мм на юго-западе до 720–790 мм на северо-востоке и 650–700 мм в центральной части [81; 175]. В течение года осадки распределяются неравномерно. Большая часть осадков (70–75 %) выпадает в теплый период года (с апреля по октябрь).

Величина стока зависит от вида осадков и их распределения во времени. Летом значительная часть выпадающих осадков испаряется, поэтому на реках страны формируется летняя межень. Осенью осадков выпадает меньше, но в связи с уменьшением испарения большая часть их идет на формирование стока.

Зимняя погода отличается неустойчивостью: оттепели с метелями сменяются морозными солнечными днями. Средняя температура января  $-6,7^{\circ}\text{C}$ . Случаются оттепели довольно часто (в среднем на них приходится почти треть зимнего времени) и могут длиться от 2 до 20 дней. Во время оттепели температура воздуха обычно повышается до  $+2^{\circ}\text{C}$  и более, что приводит к интенсивному таянию снега.

Лето в Беларуси теплое и влажное, и, как и зима, отличается неустойчивой погодой. Средняя температура июля  $+17,8^{\circ}\text{C}$ , причем она повышается с севера на юг (от  $+17,5$  до  $+18,5^{\circ}\text{C}$ ). Летом нередко на территорию страны вторгаются циклоны, зарождающиеся над Атлантическим океаном, которые приносят более холодный морской воздух и снижают температуры, иногда на  $3-4^{\circ}\text{C}$ . Именно с циклонами связана большая часть летних осадков.

Особенность климата Беларуси – отчетливая выраженность в годовом ритме переходных сезонов (весны и осени). Осень отличается морозящими, самыми продолжительными в течение всего года дождями. Однако осенняя сумма осадков ниже весенней и совсем незначительно превышает зимнюю. Для осени характерны низкая плотная облачность, туманы.

Дожди и ливни с точки зрения эффективности образования стока делят на три типа:

- ливни – короткие и интенсивные дожди продолжительностью до 2–4 часов и средней интенсивностью  $\geq 10$ –20 мм/час;
- ливневые дожди – продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток со средней интенсивностью  $\geq 2$ –10 мм/час;
- обложные дожди – как правило, продолжительностью 3–5 суток и больше с небольшой интенсивностью,  $< 2$  мм/час [31; 57; 65].

Ливни отличаются большой пестротой и локальностью распределения, охватывая одновременно, как правило, небольшие площади, порядка десятков, реже сотен квадратных километров. Благодаря небольшой площади охвата и резкому убыванию интенсивности от центра к периферии ливни могут вызвать значительные паводки лишь на малых водосборах.

В Беларуси среднее количество дней в году с ливневыми дождями составляет более 80 [176]. При этом наибольшее количество их выпадает на наветренных склонах возвышенностей (Новогрудской, Минской, Городокской), а также в западной и центральной частях Белорусского Полесья. Наибольшее суточное количество осадков на протяжении всего периода наблюдений на территории Беларуси зафиксировано в июле 1973 г. на метеостанции Славное (Витебская область) – 148 мм [81], в июле 1993 г. на станции Новогрудок (Гродненская область) – 147,6 мм, в августе 1970 г. на станции Бобруйск (Могилевская область) – 146 мм.

Ливневые и обложные дожди обычно охватывают обширные пространства и могут вызывать паводки на средних и больших реках. При слабых, хотя и продолжительных дождях почва в состоянии поглощать всю воду и значительные паводки не образуются, поэтому паводки от обложных дождей значительно уступают паводкам от ливневых дождей, являющихся наиболее паводкоопасными. Если дожди следуют друг за другом в течение нескольких дней, например в случае прохождения серии циклонов, то каждый последующий дождь будет более эффективным с точки зрения формирования стока, так как насыщенность бассейна влагой постепенно повышается.

Между указанными типами дождей имеется много промежуточных типов.

С точки зрения формирования дождевых паводков особый интерес представляют ливни и ливневые дожди. Интенсивность их сильно изменя-

ется во времени. В их ходе можно выделить начальную часть дождя (с относительно небольшой интенсивностью), центральную часть, или ядро (с максимальной интенсивностью), и хвостовую часть, или шлейф.

В формировании максимумов дождевых паводков основное значение имеет центральная часть, или ядро, ливневого дождя с наибольшей интенсивностью. В начальную часть дождя происходит первоначальное увлажнение почвы и заполнение депрессий микрорельефа, шлейф ливня вызывает некоторое удлинение спада или добавочные небольшие подъемы на спаде.

Продолжительность центральной части ливневого дождя обычно невелика и составляет небольшую часть продолжительности всего ливневого дождя, однако слой дождя, выпадающий за это время, составляет 80–90 % и более от всего слоя дождя.

Так, например, дождь в Бресте 23–24 мая 2013 г. (рисунок 1.6) длился 13 часов 20 минут и составил 68,4 мм осадков, а его наиболее интенсивная ливневая часть длилась 3 часа и составила около 30 мм осадков.

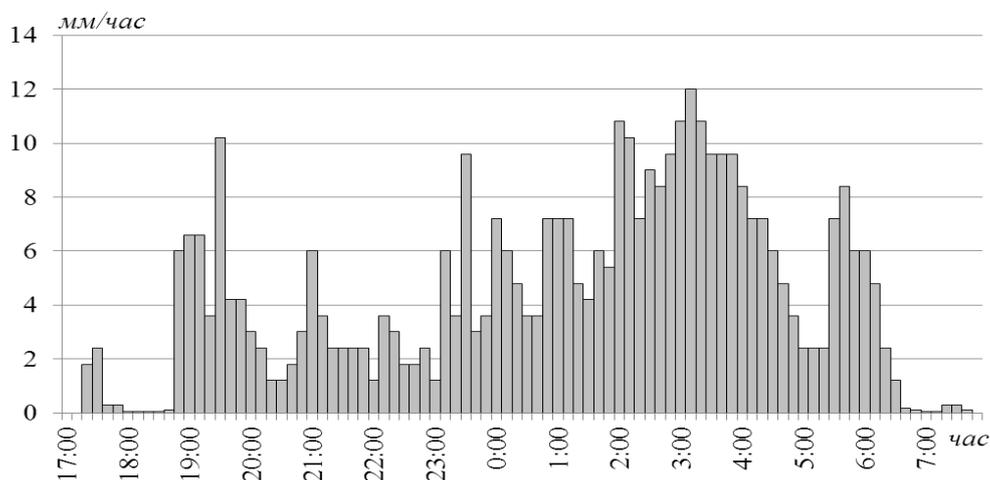


Рисунок 1.6 – Ливневый дождь на метеостанции Брест (май 2013 г.)

Таким образом, общая продолжительность дождей недостаточна для их характеристики применительно к оценке их стокового эффекта: необходимо учитывать продолжительность их эффективной части, во время которой интенсивность дождя превышает интенсивность инфильтрации, т.е. так называемую продолжительность водоотдачи, во время которой и происходит процесс стока.

Можно также различать ливни и ливневые дожди без перерывов и прерывистые с одним, двумя или несколькими перерывами. Сочетание всех этих характеристик ливневых дождей и создает их природное многообразие.

Как отмечалось выше, особенностью ливней и ливневых дождей является их переменная интенсивность во времени. Связь между интенсивно-

стью за отдельные отрезки времени и продолжительностью этих отрезков обратная: с увеличением продолжительности дождя уменьшается его интенсивность.

Слой осадков зависит не только от продолжительности выпадения, но и от площади орошения. Это объясняется тем, что влагонасыщенность ливневого облака, как правило, убывает от его центра к периферии. Поэтому слой осадков уменьшается с увеличением площади, т.е. имеет место редукция слоя осадков с увеличением площади бассейна. Характер редукции зависит от типа дождя. Ливни, обладающие большой пестротой и локальностью распространения, более резко убывают с увеличением площади, чем ливневые дожди, охватывающие одновременно огромные площади.

### 1.6.2 Факторы подстилающей поверхности

Среди гидрографических факторов (факторов подстилающей поверхности) можно выделить азональные (морфометрические): площадь водосбора, длина реки и др., и интразональные: лесистость, почвенный покров, озерность, заболоченность, густота речной сети. Величина интразональных факторов в общем связана с зональными условиями, но внутри каждой зоны или каждого региона варьируется, характеризуясь некоторой кривой распределения. Для больших бассейнов эти сочетания почти постоянны и являются типичными для их зоны, на малых же они могут быть весьма различными [15].

Интразональные факторы, в свою очередь, можно разделить на две группы: факторы склонового и руслового стока. К первым относятся залеженность, заболоченность, карст и др., способные повлиять на продолжительность и слой притока воды со склонов в русловую сеть. Среди факторов руслового стока следует, прежде всего, выделить озера, водохранилища и пруды, которые осуществляют трансформацию максимальных расходов за счет регулирующей призмы.

Если метеорологические факторы динамичны, то гидрографические являются постоянными и служат основой для наложения метеорологических факторов. Многие из факторов стока представляют собой сложную совокупность природных условий, оказывающую множественные воздействия на процесс развития стока.

Дождевые паводки, как и другие гидрологические явления, обусловлены весьма большим числом факторов, учесть степень влияния каждого из которых практически невозможно, да и в большинстве случаев нецелесообразно, поэтому в настоящем исследовании рассматривались лишь наиболее значимые факторы:

$A$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;

$H_{cp}$  – средняя высота водосбора, м;

$L$  – длина реки от истока до пункта наблюдений, км;

$\rho$  – густота речной сети, км/км<sup>2</sup>;

$i_p$  – средний уклон реки, ‰;

$A_b$  – заболоченность водосбора, ‰;

$A_{оз}$  – озерность водосбора, ‰;

$A_l$  – лесистость водосбора, ‰.

Помимо гидрографических факторов рассматривались и географические координаты центров тяжести водосборов:  $\varphi$  – широта створа, км;  $\lambda$  – долгота створа, км.

Для выявления роли гидрографических факторов в формировании дождевых паводков проведен корреляционный анализ между модулями максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности и гидрографическими факторами.

Поскольку территория Беларуси характеризуется разнородностью условий формирования паводочного стока, анализ степени влияния рассматриваемых факторов выполнен как для всех рек страны в целом, так и в пределах отдельных крупных речных бассейнов: Западной Двины, Немана, Днепра, Припяти и Западного Буга. Для повышения значимости рассматриваемых факторов корреляционный анализ проведен и для логарифмического преобразования модулей максимальных расходов паводков 10 %-ной обеспеченности и гидрографических факторов (таблица 1.1).

Анализ корреляционной матрицы зависимости модулей максимальных расходов воды дождевых паводков от гидрографических характеристик водосборов показал, что статистически значимыми факторами в формировании максимальных модулей стока паводков рек Беларуси в целом являются средний уклон реки, длина реки от истока до пункта наблюдений и площадь водосбора. Однако одни и те же факторы в бассейнах разных рек являются более значимыми или не значимыми вовсе, они также могут оказывать как прямое, так и обратное влияние на величину модулей.

Одним из важнейших факторов дождевого паводочного стока является *площадь водосбора ( $A$ )*, а также *длина реки от истока до пункта наблюдений ( $L$ )*. Эти факторы целесообразно рассматривать вместе, т. к. они тесно коррелируют между собой ( $r = 0,77$ ), а логарифмы их имеют коэффициент корреляции  $r = 0,91$ . Роль этих факторов аналогична: с увеличением площади водосбора и длины реки уменьшается (редуцируется) и слой стока за паводок, и, еще сильнее, – максимальный модуль стока. Редукция слоя стока связана с убыванием среднего по площади количества осадков с ростом бассейна, а также с увеличением времени добега и продолжительности паводка, т.е. с его распластыванием. На малых водосборах даже относительно кратковременные дожди вызывают подъем уровней. Вероятность полного охвата таких водосборов ливнями гораздо

выше, чем больших. На малых реках время добегания небольшое, паводки кратковременные и редко один ливневый паводок накладывается на другой. В больших бассейнах происходит уменьшение объема паводочного стока в связи с пойменным задержанием и последующим испарением воды. Кроме того, рост уровня воды на большой реке напрямую зависит от подъема воды на притоках. Размер площади водосбора характеризует продолжительность добегания лишь приближенно, поскольку при различной форме бассейна, а особенно петлеобразной долине, одной и той же площади могут соответствовать весьма различные пути добегания. Поэтому в качестве индекса редукции максимального стока иногда используют не площадь, а длину реки ( $L$ ) [15].

Таблица 1.1 – Корреляционная матрица модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности рек Беларуси ( $q_{10\%}$ ) и гидрографическими факторами

Гидрографическая характеристика	Преобразования	Бассейн реки									
		Все реки Беларуси		Зап. Двина		Неман		Днепр		Припять и Зап. Буг	
		$q_{10\%}$	$lgq_{10\%}$	$q_{10\%}$	$lgq_{10\%}$	$q_{10\%}$	$lgq_{10\%}$	$q_{10\%}$	$lgq_{10\%}$	$q_{10\%}$	$lgq_{10\%}$
Площадь водосбора ( $A$ )	$A$	<b>-0,39</b>		-0,27		-0,44		<b>-0,58</b>		-0,33	
	$lgA$		<b>-0,62</b>		-0,46		-0,45		<b>-0,85</b>		<b>-0,69</b>
Средняя высота водосбора ( $H_{cp}$ )	$H_{cp}$	0,01		0,10		<b>0,73</b>		-0,14		-0,18	
	$lgH_{cp}$		-0,02		0,07		<b>0,59</b>		-0,12		-0,23
Длина реки от истока до пункта наблюдений ( $L$ )	$L$	<b>-0,43</b>		-0,24		<b>-0,53</b>		<b>-0,62</b>		-0,38	
	$lgL$		<b>-0,50</b>		-0,17		-0,19		<b>-0,83</b>		<b>-0,57</b>
Густота речной сети ( $\rho$ )	$\rho$	0,08		0,12		-0,10		0,05		0,02	
	$lg\rho$		0,12		0,06		0,09		-0,01		0,06
Средний уклон реки ( $i_p$ )	$i_p$	<b>0,66</b>		0,48		<b>0,89</b>		<b>0,91</b>		<b>0,84</b>	
	$lgi_p$		<b>0,71</b>		0,45		<b>0,84</b>		<b>0,85</b>		<b>0,79</b>
Заболоченность водосбора ( $A_b$ )	$A_b$	-0,12		-0,03		-0,23		0,04		-0,08	
	$lg(A_b+1)$		-0,18		-0,07		-0,18		-0,08		0,01
Озерность водосбора ( $A_{oz}$ )	$A_{oz}$	-0,17		<b>-0,70</b>		-0,38		<b>-0,69</b>		-0,35	
	$lg(A_{oz}+1)$		-0,23		<b>-0,63</b>		<b>-0,50</b>		<b>-0,69</b>		<b>-0,44</b>
Лесистость водосбора ( $A_l$ )	$A_l$	0,13		-0,33		-0,19		0,31		-0,14	
	$lg(A_l+1)$		-0,00		-0,38		-0,19		0,23		-0,10
Ширина створа ( $\varphi$ )	$\varphi$	0,09		-0,34		0,41		-0,07		-0,22	
	$lg\varphi$		0,23		-0,36		0,39		-0,05		0,13
Долгота створа ( $\lambda$ )	$\lambda$	0,06		-0,12		0,22		-0,15		0,08	
	$lg\lambda$		0,09		-0,08		0,21		-0,08		-0,03

Примечание – Выделенные статистически значимые коэффициенты корреляции на 5 %-ном уровне значимости

Многообразно влияние на паводки факторов *рельефа*. Территория Беларуси расположена на западе Восточно-Европейской равнины и характеризуется средней абсолютной высотой 159 м с колебаниями от 346 м (гора Дзержинская на Минской возвышенности) до 80 м (врез воды р. Неман на границе с Литвой). Наибольшие высоты свойственны центральным районам страны, в направлении на север и юг рельеф заметно снижается. В общем виде рельеф Беларуси представляет собой полого-волнистую равнину, осложненную системой гряд и холмов и расчлененную долинами рек. Количественными характеристиками рельефа являются средняя высота водосбора, уклон склонов водосбора, густота речной сети.

Влияние *средней высоты водосбора ( $H_{cp}$ )* на величину модулей стока дождевых паводков на реках Беларуси в целом не значительно. Наибольшая корреляция высоты водосборов с модулями максимальных расходов воды паводков отмечена на реках бассейна Немана ( $r = 0,73$ ). Прямое влияние высоты на величину модуля стока дождевых паводков можно объяснить, во-первых, связью с уклонами рек, а также увеличением количества осадков на повышенных элементах рельефа.

К числу наиболее значимых факторов, определяющих величину модулей стока дождевых паводков рек Беларуси, относится *средний уклон реки ( $i_p$ )*, который тесно коррелирует со средним уклоном водосбора ( $r = 0,71$ ). С увеличением крутизны склонов возрастают скорости стекания воды, сокращается продолжительность добегаания и тем самым уменьшаются потери воды на испарение и инфильтрацию, что ведет к увеличению максимального модуля стока дождевых паводков. На малых водосборах, где склоновое добегаание играет значительную роль, этот фактор оказывается весьма существенным. Но на более крупных водотоках с ростом водосбора и русловой трансформации влияние уклона как фактора склонового добегаания постепенно редуцируется. Средний уклон рек является статистически значимым фактором для всех рек Беларуси, кроме Западной Двины.

Между модулями максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности  $q_{10\%}$  рек Беларуси и уклонами рек  $i_p$  существует прямая тесная зависимость, т.е. с увеличением уклонов рек происходит увеличение модулей стока паводков (рисунок 1.7).

Уклоны рек трудно поддаются территориальному обобщению, т.к. они зависят от размеров рек. Как правило, уклоны рек убывают от истока к устью, поэтому чем длиннее река, тем меньше ее средний уклон. Для рек бассейнов Западной Двины и Немана они больше, чем для рек бассейна Днепра (с Припятью). Коэффициент корреляции уклонов рек Беларуси с площадью водосборов составляет  $r = -0,32$ , с длиной реки  $r = -0,40$ . В целом изменение уклонов соответствует изменению рельефа.

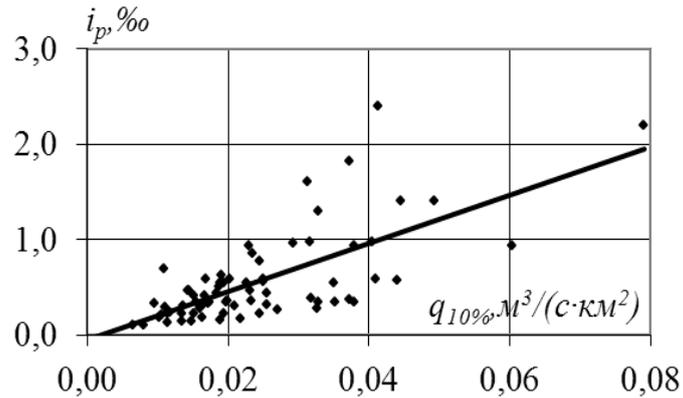


Рисунок 1.7 – Зависимость модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности от уклонов рек

Густота речной сети  $\rho$  не является статистически значимым фактором в формировании максимальных модулей стока дождевых паводков на реках Беларуси. Диапазон колебаний этого параметра не велик на разных водосборах страны.

Одним из важнейших факторов подстилающей поверхности, влияющих на формирование дождевых паводков, является характер *почвогрунтов и растительного покрова*, определяющий интенсивность инфильтрации в почву. По условиям стока бассейны с супесчаными и песчаными почвами значительно отличаются от бассейнов с суглинистыми почвами. В бассейнах с преобладанием песчаных почвогрунтов гидрограф стока более сглажен и максимальный сток соответственно ниже, чем в бассейнах с глинистыми и суглинистыми почвогрунтами.

В целом по территории Беларуси преобладают дерново-подзолистые почвы на разных по механическому составу коренных породах. Широко развиты также торфяно-болотные и дерново-подзолистые заболоченные почвы. В северной части Беларуси, преимущественно в бассейне Западной Двины и в верхней части бассейна Сожа, преобладают дерново-подзолистые почвы, глинистые и суглинистые. В бассейне Сожа наряду с дерново-подзолистыми почвами на суглинках развиты почвы на песках и супесях, особенно в его нижней части. В бассейне Березины и Поднепровье преобладают дерново-подзолистые почвы на супесях и песках, реже на суглинках, значительные площади занимают торфяно-болотные почвы. В бассейне Немана почвы представлены в основном суглинками и супесями, причем суглинки преобладают в юго-западной части бассейна. В бассейне Припяти преобладают дерново-подзолистые почвы на песках, а также торфяно-болотные почвы [128].

Влияние *леса* на величину максимальных модулей стока дождевых паводков больше косвенное, через его воздействие на другие факторы. Оно ограничивается перехватом дождевых капель кронами деревьев и травя-

ным покровом, что составляет лишь небольшую долю потерь, а также созданием той или иной гидравлической шероховатости по сравнению с расположенными рядом безлесыми пространствами. Это вызывает торможение движения нижних слоев влажного воздуха, вследствие чего повышается количество выпадающих осадков. Кроме того, лес в результате рыхлящего действия корней, а также влияния лесной подстилки существенно изменяет водно-физические свойства почвы, а именно увеличивает их общую скважность и водопроницаемость. Благодаря этому лесные почвы переводят значительную часть поверхностного стока дождевых вод в грунтовой и существенно снижают величину максимальных расходов воды паводков [31; 149].

Количественный эффект влияния лесных почв зависит от характера леса и почв, а также степени залесенности водосбора. Влияние леса сказывается сильнее на водосборах с тяжелыми глинистыми и суглинистыми почвами, которые широко распространены на севере Беларуси, чем на водосборах с легкими песчаными почвами, встречающимися в южной части страны. Это обусловлено тем, что под влиянием леса сильнее изменяются водно-физические свойства тяжелых почв, чем легких песчаных, обладающих и без лесного покрова значительной скважностью и водопроницаемостью. Так, коэффициент корреляции модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности с лесистостью водосбора наибольший в бассейне Западной Двины и составляет  $-0,33$ .

*Заболоченность водосборов ( $A_6$ )* рассматривалась как суммарный фактор площади болот и заболоченных земель (необлесенных). Коэффициент корреляции модулей максимальных расходов воды дождевых паводков с заболоченностью водосборов для рек Беларуси составляет  $r = -0,12$ .

Болота, аккумулируя значительную часть дождевых вод, способствуют снижению пиков дождевых паводков. Причем это влияние зависит как от типа паводка, так и от предшествующей паводку высоты уровня грунтовых вод. Так, максимальные расходы воды дождевых паводков, формирующихся в конце весны или в начале лета при высоком стоянии уровня грунтовых вод (после прохождения весеннего половодья) значительно снижаются под влиянием болот (вследствие меньшей аккумуляции воды болотами), чем расходы воды паводков, формирующихся при пониженном стоянии уровня грунтовых вод. Летние паводки, вызванные короткими и интенсивными ливнями, могут полностью погашаться в болотном микрорельефе вследствие своего малого объема. Максимумы дождевых паводков, вызванных длительными дождями, выпадающими в период низкого стояния грунтовых вод, снижаются под влиянием болот в большей степени [67; 149].

Особое место в ряду факторов стока занимает зарегулированность *озерами ( $A_{03}$ )* и *водохранилищами* как фактор задержания и русловой транс-

формации уже поступившего склонового притока. Озера, как и болота, снижают величину максимальных модулей стока дождевых паводков благодаря аккумуляции дождевых вод. Наибольшая корреляция озерности с модулями максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности характерна для рек бассейнов Западной Двины (-0,70) и Днепра (-0,69).

В бассейне Западной Двины, имеющей наибольший показатель средней озерности водосбора (около 3 %), роль озер в снижении величины максимальных расходов воды дождевых паводков так же велика, как и в бассейне Днепра, показатель озерности которого ниже (менее 1 %). Это обусловлено тем, что в бассейне Днепра большое количество озер приурочено к поймам основных долин и многочисленных притоков. Крупные озера лежат в плоских заболоченных понижениях, окруженных торфяными болотами. И в таких условиях они выполняют регулирующую функцию гораздо эффективнее, чем в бассейне Западной Двины, где озера располагаются цепочками и группами в ледниковых впадинах между грядами. За счет временной аккумуляции воды в русловых озерах паводки распластываются, максимум стока по сравнению с максимумами притока снижается и наступает позднее. Кроме того, испарение с поверхности озер больше по сравнению с испарением с суши, что приводит к росту потерь и тем самым к снижению величины максимальных расходов воды дождевых паводков.

Таким образом, характер влияния озер на максимальный сток паводков зависит от размеров озер, их количества, расположения на водосборе по отношению к замыкающему створу, водности года, увлажненности территории и других факторов. Наибольшее водорегулирующее значение они приобретают при расположении в нижнем течении реки.

*Широта и долгота центров тяжести водосборов* оказались статистически незначимыми факторами. Наибольшее влияние географические координаты оказывают на метеорологические факторы, являющиеся зональными.

Таким образом, особенностью паводочного процесса является исключительная множественность действующих сочетаний факторов водообмена и стекания на всех разнообразных путях стока внутри каждого бассейна. К числу важнейших факторов, определяющих величину модулей максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси, относятся средний уклон реки, площадь водосбора и длина реки от истока до пункта наблюдений.

Специфические условия формирования дождевых паводков сложились в бассейне Западной Двины (по сравнению с остальной территорией Беларуси), где наиболее значимые факторы на других водосборах страны (средний уклон реки, площадь водосбора, длина реки до замыкающего створа) оказываются статистически незначимыми на данном водосборе, в то время как главным фактором здесь выступает озерность водосбора.

## 1.7 Условия формирования дождевых паводков в разные сезоны года

Синоптические ситуации, приводящие к формированию паводков на реках, очень многообразны; различаются и предшествующие паводку условия увлажнения в различные сезоны года. Вследствие большой изменчивости влажности почвы по территории в практике широко используются разного рода косвенные оценки степени увлажнения бассейнов. Самая простая и наиболее употребительная характеристика – индекс предшествующего увлажнения  $I_w$  (мм), основанная на использовании данных об осадках за достаточно длительный предшествующий период [20]. Упрощенная формула для расчета имеет следующий вид:

$$I_w = x_1 + 0,7 \cdot x_{2-4} + 0,5 \cdot x_{5-9} + 0,3 \cdot x_{10-14} + 0,2 \cdot x_{15-30} + 0,1 \cdot x_{31-60}, \quad (1.3)$$

где  $x_1$  – количество осадков за предшествующие расчетному дню сутки, мм;  $x_{2-4}$  – сумма осадков, выпавших за вторые – четвертые сутки до расчетного дня и т.д.

На основе анализа гидрографов дождевых паводков и условий их формирования выделено несколько типовых ситуаций, приводящих к формированию паводков на реках. При этом учитывались общая продолжительность осадков, приводящих к формированию паводка, слой осадков за период его формирования, индекс предшествующего увлажнения. Три описанные ситуации формирования паводков – осредненные и довольно общие.

*Весенние паводки.* Дождевые паводки в конце весны – начале лета формируются в условиях, когда сохраняется еще повышенная водность за счет весеннего половодья при насыщенных влагой почвогрунтах. В этом случае выпадение даже относительно небольшого количества осадков может вызвать большие паводки. Подъем воды при прохождении дождей на спаде половодья или сразу после его окончания начинается в первый же день выпадения осадков. Индекс предшествующего увлажнения составляет 45–50 мм. Общее количество осадков, приводящее к формированию весенних паводков, как правило, невелико: даже суточные осадки 20–30 мм могут вызвать значительные паводки на реках.

*Летние паводки.* Формирование летних паводков происходит обычно в результате выпадения ливневых дождей при достаточно высокой температуре воздуха, когда сохраняется повышенное испарение; почва в состоянии поглотить значительное количество воды. Однако, несмотря на большие потери, летние паводки в Беларуси наблюдаются довольно часто, что связано с преобладанием летних осадков. Осадки с суточным максимумом более 50 мм чаще отмечаются в июле и августе (около 34 и 26 % соответственно), несколько реже – в июне (около 20 %). Иногда за сутки

может выпасть месячная норма и даже 1,5–2 месячные нормы осадков. Большие летние паводки на реках формируются в случае выпадения серии дождей или при продолжительном дождливом периоде. Осадков за время паводка может выпасть до 150–200 мм. Индекс предшествующего увлажнения также сильно изменяется, его среднее значение 80 мм.

*Осенние паводки*, в отличие от летних, характеризуются меньшей высотой, но большей продолжительностью. Они возникают из-за частых обложных дождей. Вследствие преобладания пасмурной погоды при снижении температуры воздуха испарение уменьшается. Индекс предшествующего увлажнения составляет около 50 мм. Количество осадков, необходимое для формирования паводка, не очень велико. Осадки продолжительные, но их интенсивность невелика. Осенние паводки уступают летним и весенним по величине максимального расхода (за исключением некоторых катастрофических паводков).

Наиболее выдающиеся дождевые паводки на реках страны отмечались осенью 1974 г. (бассейн Западного Буга и верховья Припяти), весной 1975 г. (бассейн Припяти), летом 1993, 1998 (бассейн Припяти) и 2007 гг. (реки Брестской области).

На рисунке 1.8 приведен пример трансформации многопикового дождя в плавный паводок в разные сезоны года на р. Дисна – д. Шарковщина.

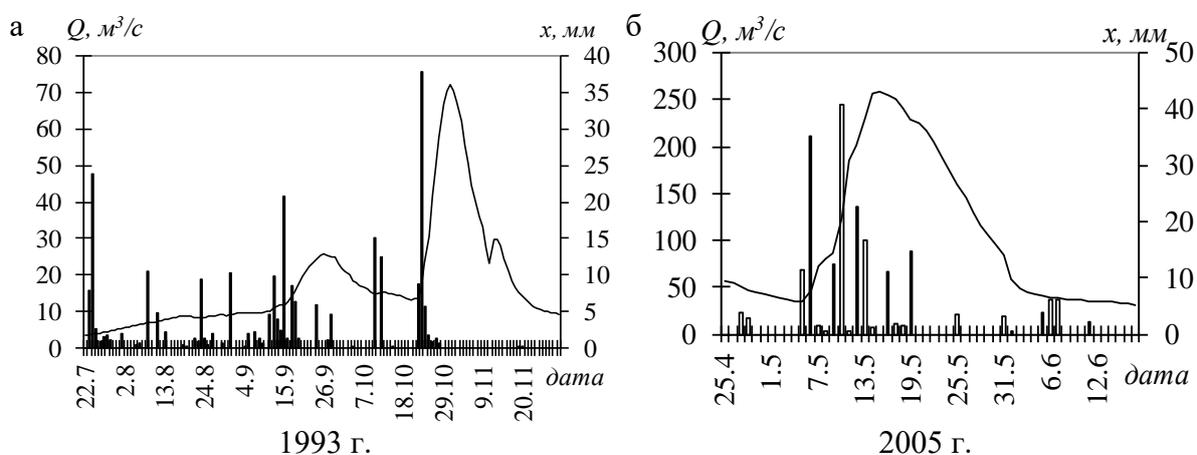


Рисунок 1.8 – Трансформация дождя в паводок на р. Дисна в створе д. Шарковщина

Формированию осеннего паводка 1993 г. (рисунок 1.8а) на Дисне предшествовало выпадение осадков в сентябре – начале октября, которые вызвали небольшой подъем уровней на реке. Выпадение осадков в начале третьей декады октября на протяжении трех суток в количестве около 50 мм привело к формированию паводка, соответствующего 19 %-ной обеспеченности. Таким образом, формирование октябрьского паводка про-

исходило в условиях достаточного насыщения почвогрунтов за счет предыдущих осадков.

Весенний паводок 2005 г. на р. Дисна – д. Шарковщина сформировался сразу после спада весеннего половодья (рисунок 1.8б), когда выпало около 150 мм осадков. Такое количество осадков, выпавшее на достаточно насыщенные влагой почвогрунты, привело к формированию паводка обеспеченностью 3 %.

В 2003 г. на р. Дисна – д. Шарковщина отмечалось два небольших дождевых паводка: первый в мае (обеспеченностью 40 %) – осадков за время подъема выпало около 65 мм, подъем начался сразу. В июле осадков за время подъема выпало около 130 мм, однако паводок был меньше весеннего (обеспеченностью 53 %), т.к. он сформировался на фоне летней межени в условиях сухих почвогрунтов.

Еще один пример отчетливо характеризует роль предшествующего увлажнения при формировании паводка. На водосборе р. Случь в мае 2005 г. выпало 85 мм осадков за 12 дней, в результате чего сформировался паводок обеспеченностью 11 %. Для сравнения: в августе этого же года за 12 дней выпало осадков в два раза больше, чем в мае (135 мм), однако сформировавшийся паводок соответствовал лишь обеспеченности 65 %.

Ниже даны *описания условий формирования наиболее выдающихся дождевых паводков*, отмечаемых на реках страны в разные сезоны года.

Один из катастрофических осенних паводков был в 1974 г. (рисунок 1.9). Формированию его способствовала следующая метеорологическая обстановка [115; 122; 156]. В конце сентября и в октябре над Беларусью прошла серия циклонов. Начиная с третьей декады сентября, в течение октября, а также в первой декаде ноября выпало значительное количество осадков. Только за октябрь в ряде пунктов Брестской области выпало от 3 до 6,5 месячных норм осадков, интенсивность ливней 30–31 октября достигала 48 мм в сутки. Осадки, выпавшие за пять декад осеннего периода, составили 30 % годовой суммы. Выпавшие осадки в конце сентября значительно увеличили запас общей влаги в почвогрунтах и повысили уровень грунтовых вод. Влагозапасы почвы в пониженных местах достигали полной влагоемкости. Все это привело к задержке инфильтрации выпавших осадков, застою воды на бессточных участках и увеличению стока дождевых вод в русла рек. В результате ряд дождевых паводков, последовательно наложившись друг на друга, образовали один общий подъем.

Особенно значительными были паводки на реках Брестской области. На реках Мухавец и Горынь вода поднялась на 2,8 м. В условиях насыщения почвогрунтов до полной влагоемкости и застоя воды на поверхности,

подъема и выхода грунтовых вод над поверхностью земли и разлива речных вод произошло слияние дождевых и речных вод, вызвавших образование большого паводка, перешедшего в наводнение. Поймы рек подверглись почти четырехмесячному затоплению. В некоторых местах вода стояла до середины лета следующего года.

Весенний дождевой паводок 1975 г. в бассейне Припяти развивался стремительно (рисунок 1.9). На малых реках (Сколодина, Меречанка, Неслуха, Словечна) продолжительность подъема воды составила 1–4 дня. Такой же резкий был и спад. Формированию паводка предшествовала дождливая осень, теплая зима с близким к норме количеством осадков с частыми оттепелями, ранняя и теплая весна. Высшие уровни весеннего половодья были низкими, а на многих реках Полесья весеннее половодье вообще не наблюдалось и до начала апреля удерживались низкие уровни зимней межени. Значительные осадки с суточными максимумами до 40 мм, выпавшие в последней пятидневке марта и в апреле, вызвали подъемы уровня воды на реках и сформировали большой паводок. В июле 1975 г. на многих реках Полесья наблюдался еще один паводок, который по своим размерам на некоторых реках (Чертень, Словечна, Сколодина, Меречанка, Оресса) приближался или практически был равен весеннему. На остальных реках июньский паводок был заметно меньше весеннего, хотя по величине своего максимального расхода сопоставим с паводками высокой обеспеченности.

Формированию летнего паводка 1993 г. (рисунок 1.9) способствовало выпадение экстремального количества осадков. В июле 1993 г. осадков выпало 1,5–2, а на юге страны 2,5–3 месячные нормы. И лишь на западе и юго-востоке осадков выпало в пределах нормы. Особенно дождливыми были вторая декада июля на территории Слуцкого и Любанского районов Минской области и третья декада в Столинском районе Брестской области. Здесь декадные суммы осадков превысили норму в 5–6 раз. В Житковичском и Столинском районах повышенное количество осадков выпало и в июне (около 1,5–2 месячные нормы), а в июле осадки наблюдались в виде ливней редкой повторяемости. Суточный максимум 23 июля в Житковичском районе составил 57 мм, а в Столинском 115 мм. За сутки 24 июля на территории Столинского района выпало 67 мм осадков.

Лето было холодное. Водность рек, которая была низкой к началу летнего периода, в результате выпадения частых и обильных дождей увеличилась и достигла средних многолетних значений, а в бассейне Припяти значительно превысила ее. Интенсивность подъема воды в сутки в середине июля составила 30–60 см. На условия формирования дождевого паводка оказали влияние и большие суммы осадков, выпавшие в Житомирской и Ровенской областях Украины. Начало подъема уровней воды

на Припяти и её притоках отмечено 12–15 июля, а 23 и 24 июля осадки достигали опасных значений (70–120 мм), что привело к затоплению больших территорий. Выход воды на пойму произошел на Уборти 22 июля, на Случи и Птичи – 25 июля, на Горыни – 26 июля, на Припяти у д. Черничи 8–11 августа, а у г. Мозыря – 16–17 августа. Максимальные уровни дождевого паводка на малых реках сформировались уже 28–30 июля, на Горыни – 31 июля, а на Припяти в середине августа. Наиболее высокие паводки сформировались на малых водотоках Столинского района и в бассейнах рек Горынь и Ствига. Превышение максимальных уровней паводка над меженными для Припяти составило около 3 м, на Горыни – 3,4 м, на малых водотоках 2,0–2,5 м.

1998 г. характеризовался обильными осадками на протяжении всего года, в результате чего на многих реках страны формировались дождевые паводки с выходом воды на пойму, наибольшие отмечены в бассейне Припяти (рисунок 1.9). В течение июня и июля на юге страны выпадали продолжительные и сильные дожди. Суточные максимумы осадков составили до 60 мм. Осадки продолжались на протяжении длительного периода, и каждый последующий дождь был более эффективным с точки зрения формирования стока, чем предыдущий. Начавшиеся в июне дождевые паводки в бассейне Припяти вызвали максимальные уровни воды в конце июля на притоках, на самой Припяти – в середине августа. Повсеместно вода из русел вышла на пойму. Спад уровня воды начался во второй половине августа и продолжался до конца сентября. На большинстве рек вода вошла в русло и лишь на Припяти (Житковичский район), в нижнем течении рек Ясельда и Птичь вода оставалась на пойме. Прошедшие в конце сентября и начале октября ливневые дожди вновь вызвали подъем уровней воды на большинстве рек, а в Припятском районе снова отмечен выход воды на пойму.

В 2006 г. на реках Беларуси сформировались дождевые паводки, особенно большие отмечены на притоках Западной Двины, Вилии и верховьях Днепра. Формирование их происходило в следующих метеорологических условиях. В третьей декаде августа на севере и северо-востоке страны выпало около 150 мм осадков, на северо-западе несколько меньше – около 80–90 мм. Осадки продолжились и в начале сентября, где 4–5 сентября в отдельных пунктах выпало до 50 мм осадков за сутки. На метеостанциях северной и северо-восточной части страны за 2 декады выпало около 150–200 мм осадков, в г. Витебске – 288 мм. Формирование дождевых паводков на реках началось в конце августа, пик пришелся на 7–10 сентября. Причем на крупных реках величина паводка оказалась больше, чем на их притоках: на Западной Двине около 7–8 %-ной обеспеченности, на Днепре обеспеченность составила около 5 %.

Значительный паводок был в июле 2007 г. на реках Брестской области (рисунок 1.9). Причиной его послужили катастрофические осадки в первой декаде июля, поддержанные серией менее обильных, но выпадающих на переувлажненную почву дождей. За три дня (5–7 июля) в большинстве районов области выпало от 80 до 200 мм осадков (почти треть годовой нормы), а за 20 дней – 224 мм. Суточные максимумы осадков составили 50–80 мм. Обеспеченность осадков первой декады июля составила 1–2 % и менее. Так, на Полесской станции 5 и 6 июля зарегистрирован абсолютный максимум количества осадков за сутки (81,2 и 86,3 мм) за весь период наблюдений. На метеостанции Ганцевичи максимальное количество осадков за сутки составило 106 мм.

К моменту выпадения осадков ситуация определялась предыдущим засушливым периодом, в результате которого уровни грунтовых вод находились на глубине 110–140 см и аккумулирующая емкость почвы была способна поглотить до 100 мм воды (исключение – Ивацевичский район, где в июне выпала полунормальная норма осадков). Однако скорость инфильтрации осадков в почву замедлялась в связи с заземлением почвенного воздуха и слабой смачиваемостью верхнего сухого слоя торфа, в результате чего быстро образовался поверхностный сток и произошло затопление бессточных понижений на полях. После промачивания торфа на большинстве территорий поверхностные воды ушли на подъем грунтовых вод. За 3–5 дней после выпадения дождей уровни грунтовых вод достигли в низовьях мелиоративных систем поверхности почвы. Выпавшие экстремальные суммы осадков способствовали росту уровней воды на реках и привели к длительному почвенному переувлажнению. На Горыни за несколько суток вода поднялась более чем на 2 м. Вследствие дискретности выпадения осадков и продвижения паводочной волны время наступления пика паводков на разных участках рек было различно.

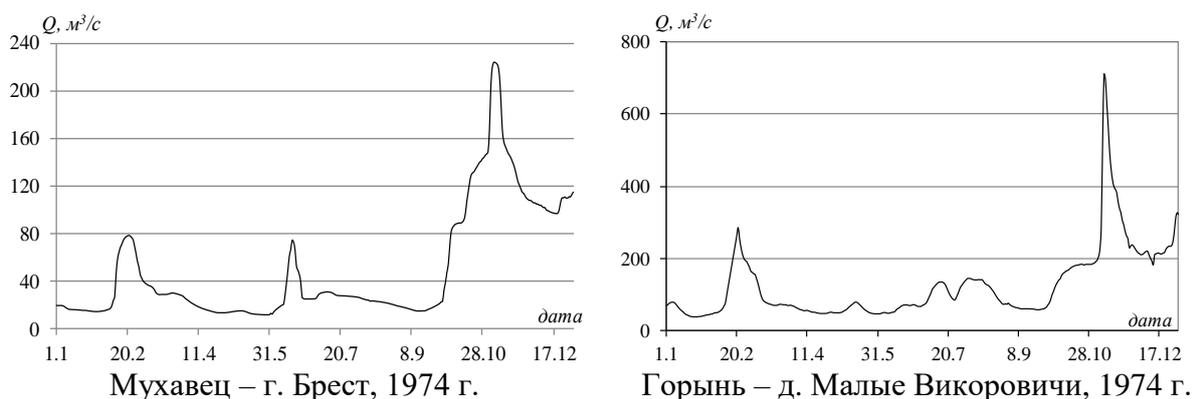
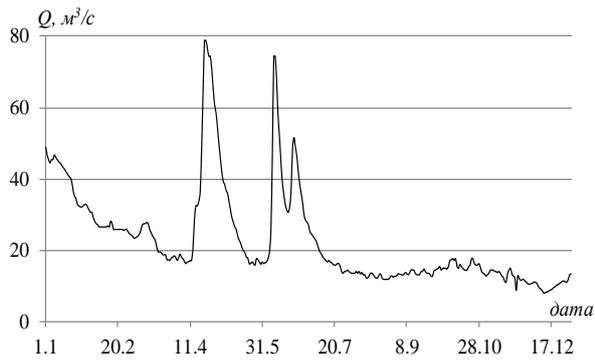
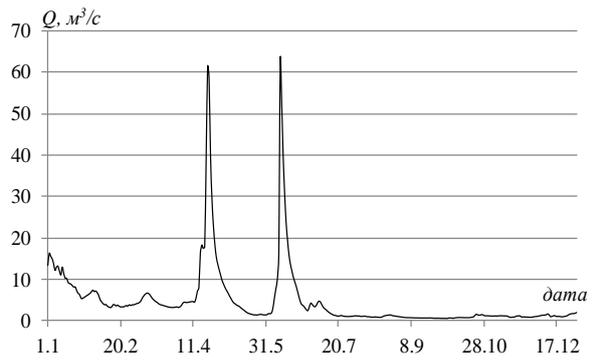


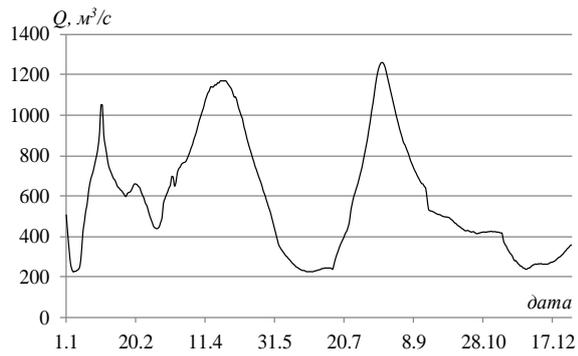
Рисунок 1.9 – Гидрографы рек Беларуси



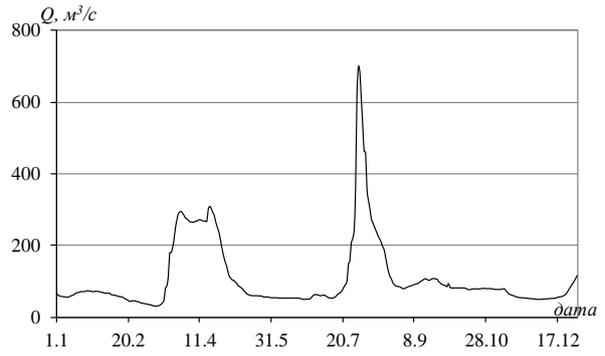
Оресса – д. Андреевка, 1975 г.



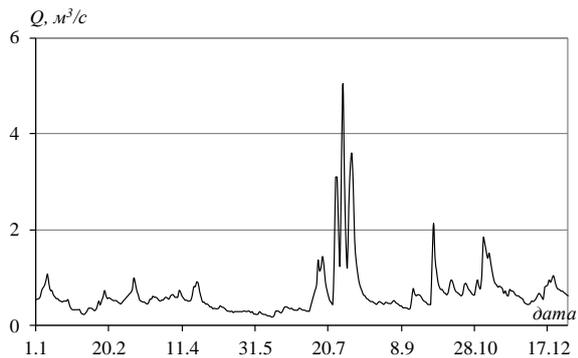
Словечна – д. Кузьмичи, 1975 г.



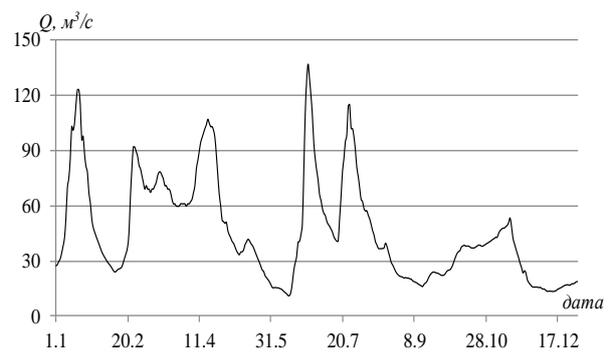
Припять – г. Мозырь, 1993 г.



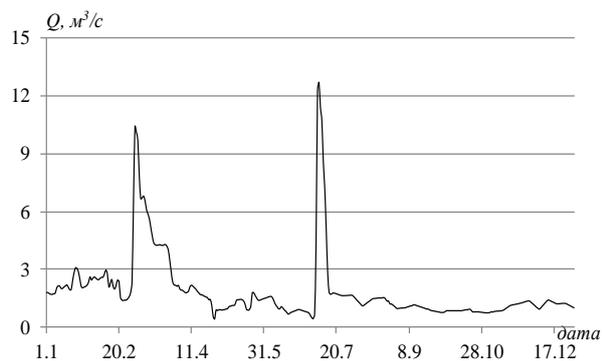
Горынь – д. Малые Викоровичи, 1993 г.



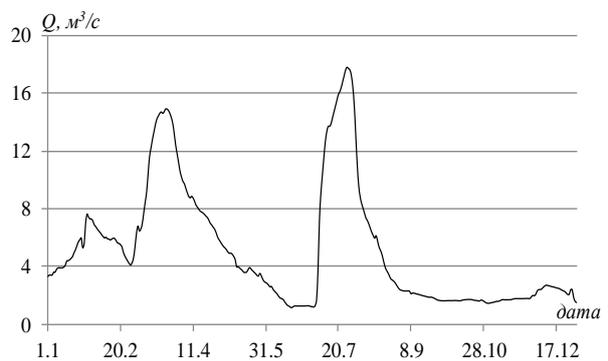
Мерчанка – д. Красеево, 1998 г.



Уборть – д. Краснобережье, 1998 г.



Неслуха – д. Рудск, 2007 г.



Цна – д. Дятловичи, 2007 г.

Рисунок 1.9. Окончание

Анализ метеорологических условий формирования наиболее выдающихся дождевых паводков на реках Беларуси показал, что образование их происходит при выпадении значительного количества осадков на большой площади территории на протяжении достаточно длительного периода, часто в условиях повышенной увлажненности предшествующего периода.

Наиболее благоприятные условия для формирования дождевых паводков наблюдаются после весеннего снеготаяния, когда почва увлажнена до состояния наименьшей влагоемкости и выпадение относительно небольшого количества осадков может вызвать большие паводки. Летом, когда почва иссушается испарением и транспирацией и способна интенсивно поглощать воду, формирование больших паводков происходит в случае выпадения серии дождей или при продолжительном дождливом периоде. Осенью вследствие уменьшения испарения в условиях пониженной инфильтрационной способности дождевые паводки обычно формируются в результате выпадения частых обложных дождей.

## ГЛАВА 2

### НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЛЕБАНИЙ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

#### 2.1 Источники исходной информации

Для исследования паводочного стока исходными данными послужили материалы наблюдений Республиканского гидрометеорологического центра Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

Инструментальные наблюдения за водным режимом на реках Беларуси ведутся с конца XIX в. Большая часть ныне действующих гидрологических постов была открыта в 20–30-е гг. XX в., что позволяет с достаточной степенью достоверности использовать многолетние ряды и оценивать различные гидрологические характеристики. Наиболее продолжительные ряды данных наблюдений за паводочным стоком имеются по крупным рекам: Западная Двина – г. Витебск (с 1877 г.), Неман – г. Гродно (с 1878 г.), Березина – гг. Борисов и Бобруйск, Припять – г. Мозырь (с 1881 г.), Днепр – г. Орша (с 1882 г.).

На многих реках наблюдения начали вестись только в послевоенный период. Количество гидрологических постов от начала наблюдений до настоящего времени постоянно изменялось. Общее количество постов, действующих в разное время на реках Беларуси, по которым имеются данные по дождевым паводкам, превышает 250. Продолжительность наблюдений по ним составляет от 1 до 140 лет. В настоящее время наблюдения за стоком рек Беларуси осуществляются на 123 гидрологических постах.

Согласно нормативным документам, определение расчетных гидрологических характеристик должно основываться на данных гидрометрических наблюдений, в том числе регулярных наблюдений последних лет, опубликованных в специальных документах в области гидрологии. Дополнительно должны учитываться данные инженерно-гидрометрических изысканий.

Кроме того, следует использовать достоверные данные наблюдений за гидрологическими характеристиками по архивным, литературным и другим материалам, относящимся к периоду до начала регулярных наблюдений. При этом необходимо указать источник, на основании которого установлена гидрологическая информация до начала регулярных наблюдений, и произвести тщательную оценку достоверности и точности полученных материалов.

К числу официальных документов по гидрологии, опубликованных Гидрометеорологическими службами СССР, БССР и Республики Беларусь, относятся следующие:

1. Справочники по ресурсам поверхностных вод СССР, состоящие из трех серий:

– «Гидрологическая изученность» (содержит сведения об основных гидрографических характеристиках, количестве и размере рек и озер, их стационарной и экспедиционной изученности, а также перечень основных опубликованных и хранящихся в архивах работ, в которых имеются данные о водных объектах);

– «Основные гидрологические характеристики» (содержит проверенные материалы наблюдений за режимом рек, озер и водохранилищ за период от начала наблюдений на станциях до 1980 г. включительно);

– «Ресурсы поверхностных вод СССР» (серия монографий, представляющих собой научные обобщения данных о режиме рек, озер и водохранилищ).

2. Гидрологические ежегодники; «Государственный Водный кадастр. Поверхностные воды. Ежегодные данные» (т. 3).

В дополнение к гидрологическим характеристикам при расчетах нередко используют и метеорологические данные, опубликованные Республиканским гидрометеорологическим центром.

При изучении паводочного стока рек Беларуси использовались следующие данные:

- максимальные расходы воды дождевых паводков;
- предпаводочные расходы воды;
- даты максимального расхода воды паводка;
- даты предпаводочного расхода;
- даты окончания паводка;
- продолжительность подъема паводка;
- продолжительность спада паводка;
- общая продолжительность паводка;
- среднесуточные расходы воды;
- слои стока за паводок;
- максимальные расходы воды зимних паводков;
- максимальные расходы воды весенних половодий;
- суточные атмосферные осадки;
- среднесуточные температуры воздуха;
- гидрографические характеристики водосборов рек (площадь водосбора, длина реки от истока до пункта наблюдений, средний уклон реки, средняя высота водосбора, густота речной сети, озерность, заболоченность, лесистость водосбора);
- обзоры режима рек.

При этом рассматривались данные наблюдений по характеристикам дождевых паводков по всем гидрологическим створам, по которым в разное время велись наблюдения за дождевым паводочным стоком, за период от начала инструментальных наблюдений до 2010 г. (приложение А). Метеорологические данные рассматривались за период 1965–2010 гг.

## **2.2 Методика анализа пространственно-временных колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков**

Дождевой сток, как и другие гидрологические процессы, обусловлен большим числом природных факторов, многие из которых представляют собой замкнутые или открытые множества со сложно переплетающимися элементами. В связи с этим для исследования паводков применяют два основных научных метода – генетический и статистический. Первый метод выявляет основные причинно-следственные закономерности паводков, обосновывая таким путем их математические модели. Статистический метод, опираясь на теорию случайных величин и процессов, раскрывает пространственно-временные закономерности распределения характеристик паводков и позволяет определить параметры генетической модели, связанной с действующими множествами и их пересечениями [16].

### *Методика оценки синхронности многолетних колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков*

Для выявления синхронности многолетних колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков использовался пространственный корреляционный анализ, т.е. построение матрицы парных коэффициентов корреляции между максимальными расходами воды дождевых паводков, на основе чего выделялись районы синхронных колебаний, для которых проводилась количественная оценка степени синхронности [137].

После построения матрицы парных коэффициентов корреляции между максимальными расходами воды дождевых паводков рек Беларуси выделялись группы рек, имеющие максимальную связанность (не ниже заданного уровня  $r_{кр} > 0,65$ ) в пределах группы. Таким образом, были сформированы ядра районов синхронных колебаний стока, которые имеют максимальную связанность с группой элементов, заключенных в ядро.

Для уточнения границ районов проводился детальный анализ с расчетом корреляционной матрицы по данным обо всех реках, в результате оставшиеся вне ядер реки были распределены по районам синхронных колебаний стока по принципу максимальной скоррелированности каждого конкретного элемента с ядром района.

Затем проведена проверка правильности отнесения рек к соответствующим районам. При этом средний коэффициент корреляции данной реки со всеми реками района, в который она входит, должен быть выше, чем средний коэффициент корреляции со всеми реками других районов.

Далее рассчитывались средние внутрирайонные коэффициенты корреляции между реками, входящими в один и тот же район, характеризующие внутрирайонную связь, и межрайонные коэффициенты корреляции, характеризующие межрайонную связанность.

В результате анализа корреляционной матрицы и расчета коэффициентов корреляции территория Беларуси была разделена на районы по характеру синхронности многолетних колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков с учетом положения водоразделов и географических особенностей территории.

*Метод количественной оценки эффекта пространственной асинхронности максимальных расходов воды паводков*

Для оценки асинхронности в колебаниях максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси использовался метод, разработанный Н.В. Сомовым [150]. Главным достоинством этого метода является возможность однозначного определения количественных параметров эффекта асинхронности в любых зонах кривой обеспеченности в отдельности и для всей совокупности значений исследуемой величины. В основу методики положено определение эффекта асинхронности по совмещенным кривым обеспеченных суммарных хронологического  $K_{j\,xp}(P)$  и равнообеспеченного  $K_{j\,po}(P)$  рядов значений максимальных расходов воды паводков. В качестве количественного показателя степени асинхронности используется коэффициент асинхронности

$$K_{\text{ан}}(P) = \frac{\sum_{j=1}^K K_{j\,xp}(P)}{\sum_{j=1}^K K_{j\,po}(P)}. \quad (2.1)$$

Построение кривой обеспеченности суммарного равнообеспеченного ряда осуществлялось путем суммирования расположенных в убывающем порядке значений максимальных расходов воды дождевых паводков. Затем определялась обеспеченность каждого члена такого ряда по формуле [124]:

$$P = \frac{m}{n+1} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где  $m$  – номер члена в ранжированном ряду;  $n$  – количество членов ряда.

При построении кривой обеспеченности суммарного хронологического ряда осуществлялось суммирование максимальных расходов воды дож-

девых паводков в хронологическом порядке, после чего полученный ряд ранжировался в убывающем порядке.

Оценка эффекта асинхронности осуществлялась с помощью функции пространственной асинхронности, которая аппроксимируется зависимостями [38]:

$$K_{ac}(P) = K_0(P) \cdot (\rho + 1)^{\alpha(P)}, \quad (2.3)$$

где  $K_0(P)$  – значение коэффициента асинхронности  $K_{ac}(P)$  при  $\rho = 0$ ;  $K_0(P) \rightarrow 1$ ;  $\alpha(P)$  – эмпирический коэффициент, зависящий от интервала осреднения и обеспеченности.

*Методика оценки однородности полей гидрологических величин  
максимальных расходов воды дождевых паводков*

Поля гидрометрических характеристик являются изменчивыми как в пространстве, так и во времени. Детерминировано задать интересующие нас величины в каждой точке и момент времени невозможно, поэтому гидрологическую величину рассматривают как случайную. Статистический подход требует отказа от попытки отдельного рассмотрения индивидуальных свойств случайного поля. Рассматриваются лишь их статистические характеристики, которые позволяют установить общие особенности, характерные для всего набора реализаций. Эти общие закономерности принято называть статистической структурой случайного поля [139]. На основе этого по сравнительно небольшому количеству данных можно судить о свойствах изучаемой гидрометрической характеристики в пределах большой территории.

Для описания связи между значениями поля в различных точках наиболее употребляемыми являются такие характеристики статистической структуры, как корреляционные, ковариационные и спектральные функции. Поскольку данные функции однозначно связаны между собой и равно пригодны для описания статистической структуры, предпочтение отдано корреляционным функциям как более точным и универсальным, отличающимся меньшей зависимостью от изменений географического и сезонного характера.

Любую гидрологическую характеристику, образующую поле, можно описать функцией пространственных координат и времени [76]:

$$\dot{I}_j = M(x_j; y_j; h_j; t_j). \quad (2.4)$$

Гидрологическое поле в определенный промежуток времени рассматривается как выборочное значение реализаций случайного поля. Если исходная точка  $M_0(x_0; y_0; h_0; t_0)$ , а любая текущая точка  $M_j(x_j; y_j; h_j; t_j)$ ,

то коэффициент корреляции для этих точек будет зависеть от 8 переменных и иметь вид:

$$r(0; j) = f(x_0; y_0; h_0; t_0; x_j; y_j; h_j; t_j). \quad (2.5)$$

Для стационарных полей введем переменную  $\tau = t_j - t_0$  и, считая начало координат в полюсе, введем новые координаты  $X = x_j - x_0$ ;  $Y = y_j - y_0$ ;  $H = h_j - h_0$ . Разностью отметок точек для условий Беларуси, вследствие небольших колебаний, можно пренебречь. Полученную пространственную корреляционную функцию (ПКФ) стационарного поля можно представить в виде:

$$r = f(x_0; y_0; X; Y; \tau). \quad (2.6)$$

Введя полярные координаты  $\rho = \sqrt{X^2 + Y^2}$  и  $\alpha = \text{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right)$ , получим:

$$r = f(x_0; y_0; \rho; \alpha; \tau). \quad (2.7)$$

Для однородных стационарных полей ПКФ не зависит от координат полюса и не меняется при параллельных его перемещениях, т.е.

$$r = f(\rho; \alpha; \tau). \quad (2.8)$$

Для однородных изотропных полей ПКФ зависит только от расстояния между точками, т.е.

$$r = f(\rho; \tau). \quad (2.9)$$

При этом ПКФ принимает одни и те же значения для любой пары точек с одинаковыми расстояниями, т.к. пары точек всегда могут быть совмещены друг с другом с помощью параллельного переноса, вращения и зеркального отображения.

Зафиксировав  $\tau$  и получив ПКФ как функцию  $r = f(\rho)$ , в поле координат  $(r, \rho)$  строится зависимость парных коэффициентов корреляции максимальных расходов воды дождевых паводков от расстояний между центрами тяжести водосборов. Полученная линия регрессии  $r = f(\rho)$  принимается за истинную зависимость, отвечающую природе пространственной корреляционной связности дождевых паводков. Принималось, что отклонения эмпирических точек от линии регрессии обусловлены случайными флуктуациями выборочных данных. Проверка нулевой гипотезы  $H_0$  об однородности ПКФ осуществлялась с помощью преобразования Фишера [133]:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} + \frac{r}{2(n-1)}, \quad (2.10)$$

где  $r$  – парный коэффициент корреляции;  $n$  – число совместных лет наблюдений.

Это преобразование дает хорошие результаты даже при небольшом числе совместных лет наблюдений и высоких значениях  $r$ , а выборочные значения  $Z$  распределены по нормальному закону с дисперсией [98; 133]:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}. \quad (2.11)$$

Далее рассчитывается количество точек, попавших в диапазон  $\pm\sigma_z$ ;  $\pm 2\sigma_z$ ;  $\pm 3\sigma_z$ , которое сопоставляется с теоретическими вероятностями для нормального закона распределения.

Если эмпирические и теоретические вероятности оказываются близкими, ПКФ признается однородной, т.е. исходная нулевая гипотеза не опровергается. В том случае, когда имеет место существенное расхождение между эмпирическими и теоретическими вероятностями, нулевая гипотеза опровергается и признается альтернативная гипотеза о неоднородности эмпирической ПКФ. В этом случае исходное поле стока должно быть разделено на более мелкие однородные районы, для каждого из которых необходимо вновь строить ПКФ и вновь оценивать ее на однородность [98].

#### *Скольльзящие средние и разностные интегральные кривые*

Эти методы широко используются для сглаживания временных рядов стока при исследовании закономерностей их колебаний [125; 133; 160]. Метод скользящих средних основан на переходе от начальных значений ряда к их средним значениям на интервале времени, длина которого выбрана заранее. При этом сам выбранный интервал времени скользит вдоль ряда. Получаемый таким образом ряд скользящих средних ведет себя более гладко, чем исходный ряд за счет усреднения отклонений исходного ряда.

Метод интегральных или разностных интегральных кривых базируется на интегральном ряде, члены которого равны  $(x_1)$ ,  $(x_1+x_2)$ ,  $(x_1+x_2+x_3)$ , ...,  $(x_1+x_2+\dots+x_n)$  или разностно-интегральном ряде с членами  $(d_1)$ ,  $(d_1+d_2)$ ,  $(d_1+d_2+d_3)$ , ...,  $(d_1+d_2+\dots+d_n)$ , при этом  $d_i = x_i - \bar{x}$ . Разностные интегральные кривые характеризуют изменения во времени нарастающей суммы отклонений модульных коэффициентов от его среднего многолетнего значения, равного единице.

Интегрирование (суммирование) периодических или циклических колебаний увеличивает их амплитуды пропорционально длине соответствующего периода и облегчает выделение низкочастотных колебаний. Недостатком этого метода является то, что вследствие увеличения внутривариаци-

ной связности суммируемых последовательностей  $x_i, d_i$ , может возникать ложная цикличность. Кроме того, даже при исходном бессвязном ряде в середине разностно-интегрального ряда дисперсия его членов будет наибольшей и наложение случайных ошибок может увеличивать амплитуду случайных колебаний в этой части ряда [10; 11; 133].

#### *Автокорреляционный анализ*

Автокорреляция – корреляция ряда гидрологических величин с этим же рядом, сдвинутым на некоторый интервал времени  $\tau$ . Коэффициент автокорреляции позволяет судить о случайности и независимости значений характеристики ряда.

Зависимость между коэффициентом автокорреляции и периодом запаздывания обычно представляется автокоррелограммой. Она помогает выбрать прогнозную модель. На автокоррелограмме отмечается диапазон в размере двух стандартных ошибок на каждом лаге. Величина автокорреляции более интересна, чем ее надежность, потому что интерес в основном представляют очень сильные (а следовательно, высоко значимые) автокорреляции.

#### *Спектрально-временной анализ*

Для обнаружения характерных ритмов, анализа их устойчивости или, наоборот, изменчивости во времени используется процедура спектрально-временного анализа (СВАН).

Сущность СВАН заключается в проведении спектрального анализа в скользящем временном окне, результаты которого изображаются в виде СВАН-диаграмм. Годы, отложенные на оси абсцисс такой диаграммы, соответствуют центрам временных окон. На вертикальной оси откладываются величины частот в циклах, отнесенных к единице времени. Каждый столбец гистограммы представляет собой амплитудный спектр Фурье, рассчитанный в заданном скользящем временном окне. Значения амплитуды отражены разными оттенками цвета. На оси ординат откладываются значения частот, измеренных в циклах за год.

Длина окна задается в зависимости от требуемой детальности и спектрального состава и выбирается исходя из требований получить данные о гармониках в наиболее широком частотном диапазоне. Она не должна быть слишком малой, поскольку при этом снижается точность спектрального анализа и теряется информация о низких частотах. В случае завышения длины окна происходит сглаживание высокочастотных колебаний. Наиболее оптимальной является величина окна, равная 0,25–0,33 от длины ряда.

Повторяемость доминирующих ритмов выражается в виде продолжительных затемненных полос. Этот признак показывает продолжительность

существования ритмических изменений. Легенды на СВАН-диаграммах отражают интенсивность процессов [106].

### *Использование тренда*

Анализ временного ряда обычно начинается с выделения тренда.

Поскольку тренды используются для оценки тенденции будущих значений ряда, исключение тренда – одна из основных задач анализа нерегулярных колебаний. Обычно тренд выделяется по методу наименьших квадратов способом скользящей средней или по определенной, характерной для данного ряда аналитической формуле, т.е. находятся средние  $\bar{x}_t$  и соответствующие отклонения аномалий  $d$  от среднего  $\bar{x}$  или уровня аналитической кривой  $x(t)$ . Алгебраически можно показать, что при переходе от уровней к их разностям  $d$  исключается влияние общей тенденции на изменение стока.

Экстраполяция динамики рядов или их тренда осуществляется в следующей последовательности:

– Проводится обобщающая линия, отражающая тенденцию ряда на основе визуального впечатления о расположении фактических точек.

– Определяется постоянство и рассчитывается средний абсолютный прирост за последние годы:  $\Delta = (y_n - y_1) / (n - 1)$ . Затем он последовательно прибавляется к оценке тренда на последний срок столько раз, на сколько периодов экстраполируется ряд. Можно также уменьшить последний член тренда на коэффициент роста в степени, пропорциональной периоду экстраполяции.

– Устанавливаются соотношения изменений показателей динамики сравниваемых рядов на основе корреляции между ними [103; 159].

## **2.3 Методы прогнозирования дождевого паводочного стока**

Для удобства анализа временного ряда и построения на его основе прогноза все методы обычно объединяют в одну программу, называемую ARIMA – Auto – Regressive Integrated Moving Average или АРПСС (авторегрессионное проинтегрированное скользящее среднее) [123; 160]. В прогнозной модели рассматриваются два основных процесса: процесс авторегрессии и скользящего среднего.

*Процесс авторегрессии.* Если во временном ряду при небольшом лаге существует положительная или отрицательная автокорреляция, то элементы ряда последовательно зависят друг от друга. Эту зависимость можно выразить следующим уравнением:

$$x_t = \xi + \varphi_1 \cdot x_{(t-1)} + \varphi_2 \cdot x_{(t-2)} + \varphi_3 \cdot x_{(t-3)} + \dots + \varepsilon, \quad (2.12)$$

где  $\zeta$  – константа (свободный член);  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – параметры авторегрессии;  $\varepsilon$  – вклад «белого шума».

Значение переменной  $x_t$  в ряду  $x$  есть сумма случайной компоненты (случайное воздействие  $\varepsilon$ ) и линейной комбинации предыдущих наблюдений. Процесс авторегрессии будет стационарным лишь в том случае, если его параметры лежат в определенном диапазоне. Соотношение параметров должно быть таким, чтобы ряд не уходил в бесконечность, а мог бы вернуться на достаточно большом интервале к некоторому среднему.

*Процесс скользящего среднего.* В процессе скользящего среднего каждый элемент ряда подвержен суммарному воздействию предыдущих ошибок (случайных флуктуаций). В общем виде это можно записать следующим образом:

$$x_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \cdot \varepsilon_{(t-1)} - \theta_2 \cdot \varepsilon_{(t-2)} - \theta_3 \cdot \varepsilon_{(t-3)} - \dots, \quad (2.13)$$

где  $\mu$  – константа;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  – параметры скользящего среднего.

Текущее наблюдение ряда представляет собой сумму случайной компоненты (случайное воздействие  $\varepsilon$  в данный момент) и линейной комбинации случайных воздействий в предыдущие моменты времени. Если в модели авторегрессии подразумевается функциональная зависимость значения  $x$  в момент  $t$  от предшествующего значения в момент  $t-1$ , то в модели скользящего среднего подразумевается его зависимость от чисто случайного процесса на «входе» в систему, который приводит к затухающей автокорреляционной функции. До некоторого лага (обычно небольшого) автокорреляционная функция или положительна, или отрицательна, а при лаге (сдвиге)  $k$  она становится равной нулю и далее не выходит за границы доверительного интервала. Параметры модели скользящего среднего определяются в программах через значения автокорреляции.

*Модель авторегрессии и скользящего среднего.* Общая модель включает как параметры авторегрессии, так и параметры скользящего среднего. Обычно рассматриваются три типа параметров модели: параметры авторегрессии ( $p$ ), порядок разности ( $d$ ) и параметры скользящего среднего ( $q$ ). В обозначениях авторов (Бокса и Джексона) модель записывается как АРПСС ( $p, d, q$ ).

Модель может рассчитываться для разности первого, второго и большего порядков. Поскольку для модели АРПСС желательно, чтобы ряд был стационарным (среднее – постоянно, а выборочные дисперсия и автокорреляция не меняются во времени), необходимо брать разности до тех пор, пока он не станет стационарным. Число разностей определяется параметром  $d$ . Построение модели следует начать или на основе одной авторегрессии, или на основе одного скользящего среднего, или на основе их комбинации, а в случае неудачи переходить к разностной схеме.

Чрезмерное количество взятых разностей приводит к менее стабильным оценкам коэффициентов. На этом этапе (*идентификации* порядка модели) необходимо решить, как много параметров авторегрессии ( $p$ ) и скользящего среднего ( $q$ ) должно присутствовать в эффективной и экономной модели процесса. Экономность модели означает, что она содержит наименьшее число параметров и наибольшее число степеней свободы среди всех моделей, которые подгоняются к данным. Модель не должна быть переопределена.

*Оценивание и прогноз.* Полученные в результате оценивания параметры модели используются на этапе прогноза для того, чтобы вычислить новые значения ряда и построить доверительный интервал для прогноза. Процесс оценивания проводится по преобразованным данным (подвергнутым применению разностного оператора). До построения прогноза нужно выполнить обратную операцию (интегрировать данные). Таким образом, прогноз методологии будет сравниваться с соответствующими исходными данными.

*Константа в моделях АРПСС.* Дополнительно модели АРПСС могут содержать константу, интерпретация которой зависит от подгоняемой модели. Так, при отсутствии в модели параметров авторегрессии константа  $\mu$  есть среднее значение ряда. В противном случае константа представляет собой свободный член. Если бралась разность ряда, то константа есть среднее или свободный член преобразованного ряда. Например, если использовалась разность первого порядка, а параметров авторегрессии в модели нет, то константа представляет собой среднее значение преобразованного ряда и, следовательно, коэффициент наклона линейного тренда от исходного.

*Число оцениваемых параметров.* До начала работ по оцениванию необходимо решить, какой тип модели будет подбираться к данным и какое количество параметров присутствует в модели, т.е. нужно идентифицировать модель АРПСС. Основными инструментами идентификации порядка модели являются графики, автокорреляционная функция (АКФ), частная автокорреляционная функция (ЧАКФ). Большинство встречающихся на практике временных рядов можно с достаточной степенью точности аппроксимировать одной из пяти основных моделей, которые можно идентифицировать по виду АКФ и ЧАКФ. В таблице 2.1 представлены эти модели.

*Оценивание модели. Анализ остатков.* Если значения вычисляемой  $t$  статистики не значимы, то соответствующие параметры в большинстве случаев удаляются из модели без ущерба подгонки. Другой оценкой надежности модели является сравнение прогноза, построенного по урезанному ряду с исходными данными. Однако качественная модель должна

не только давать достаточно точный прогноз, но быть экономной и иметь независимые остатки, содержащие только шум без систематических компонент. Анализ остатков чрезвычайно важен и необходим при анализе временных рядов. Процедура оценивания предполагает, что остатки некоррелированы и нормально распределены. Если остатки систематически распределены (например, отрицательны в первой части ряда и примерно равны нулю во второй) или включают некоторую периодическую компоненту, то это свидетельствует о неадекватности модели. Полученные оценки параметров используются на последнем этапе (этапе прогноза) для того, чтобы вычислить новые значения ряда и построить доверительный интервал для прогноза.

Таблица 2.1 – Критерии нестационарности процесса и выбора модели

Вид модели	АКФ	ЧАКФ
Авторегрессия первого порядка (АР(1))	Экспоненциально убывает	Имеет резко выделяющееся значение для лага 1
Авторегрессия второго порядка (АР(2))	Имеет форму синусоиды или экспоненциально убывает	Имеет резко выделяющиеся значения на лагах 1 и 2
Скользящее среднее первого порядка (СС(1))	Имеет резко выделяющееся значение на лаге 1, остальные значения нулевые	Экспоненциально убывает
Скользящее среднее второго порядка (СС(2))	Имеет резко выделяющиеся значения на лагах 1 и 2, остальные значения нулевые	Имеет форму синусоиды или экспоненциально убывает
Авторегрессия и скользящее среднее первого порядка (АР СС(1))	Экспоненциально убывает с лага 1	Экспоненциально убывает с лага 1

*Ограничения.* Модель АРПСС является подходящей только для рядов, которые являются стационарными, т.е. среднее, дисперсия и автокорреляция примерно постоянны во времени. Также предполагается, что параметры модели постоянны, т.е. не меняются во времени. Для нестационарных рядов следует брать разности. Рекомендуется иметь не менее 50 наблюдений в файле исходных данных.

## 2.4 Особенности картографирования водных ресурсов

Картографирование является одним из методов географических исследований. Карты отражают территориальные закономерности размещения исследуемых явлений, дают возможность учета природных условий и ресурсов, позволяют получить показатели по каждому виду исследований.

Главная особенность картографирования речного стока заключается в том, что изображаемые на карте значения характеристик стока относятся не к точке измерения, а к центру тяжести водосбора, т.к. расход воды, из-

меренный в гидрометрическом створе, представляет собой осредненный сток со всего речного бассейна. Чем больше градиент изменения характеристик речного стока по территории и чем больше площадь водосбора, тем больше погрешность их определения. В связи с этим при построении карт большие бассейны рек, имеющие разные значения характеристик в отдельных частях бассейна, не рассматриваются, а служат лишь для контроля точности построения [72].

Карты водных ресурсов делят на две группы: гидрографические и карты режима вод. К первой группе относят карты рисунка речной и озерной систем, густоты речной сети и озерности, ко второй – карты водного режима, твердого стока и др.

Наибольшее распространение и значение в практической гидрологии имеет площадной метод картографирования в модулях стока или слое стока. При построении карт площадного стока используют два метода: изолиний и районирования территории по количественным показателям.

Поскольку изменение величины стока в пространстве происходит плавно и непрерывно, при построении карт в основном использовался метод изолиний, который является наиболее обычным и универсальным. Исключение составила карта районирования, построенная методом районирования по количественным показателям, который имеет ограниченное применение, главным образом в двух случаях: если исходных данных недостаточно (они не позволяют провести изолинии) или если картографируемое явление особенно тесно связано с местными природными условиями. Метод районирования позволяет выявить районы с разными значениями осредненных характеристик стока на основе учета влияния местных азональных физико-географических факторов.

Картографическая основа карт построена в равнопромежуточной прямоугольной цилиндрической проекции, поскольку по параллели сечения ( $54^\circ$  с.ш.) и по всем меридианам нет искажения, а искажения севернее и южнее параллели сечения небольшие. Кроме того, географическая сетка параллелей и меридианов хорошо согласуется с сеткой программы *Surfer 6.0*.

Определение характеристик речного стока по картам осуществляют следующим образом. Сначала на карте оконтуривают исследуемый водосбор до замыкающего створа, т.е. проводят водораздельную линию. Далее находят центр его тяжести, который наносят на карту. Если в пределах водосбора проходят одна-две изолинии или водосбор находится между двумя изолиниями, характеристика речного стока определяется для центра тяжести водосбора путем линейной интерполяции между изолиниями. При пересечении водосбора несколькими изолиниями определяется средневзвешенное значение характеристики речного стока.

## 2.5 Оценка репрезентативности и однородности временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков

Поскольку длительность наблюдений за дождевым паводочным стоком ограничена каким-либо отрезком времени, статистический ряд гидрологических наблюдений в створе реки является лишь частью генеральной совокупности данных, и приходится иметь дело со статистическими зависимостями вместо стохастических. При определении гидрологических характеристик применяются главным образом методы статистического анализа с использованием законов теории вероятностей.

При наличии данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности определение расчетных гидрологических характеристик осуществляется путем применения эмпирических функций распределения ежегодных вероятностей превышения – кривых обеспеченностей.

Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения в верхней части значений обеспеченности используются теоретические кривые распределения. Для описания временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков в ходе исследований испытывались два типа теоретических распределений: распределение Пирсона III типа и трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого – Менкеля. В нашем случае наиболее приемлемо трехпараметрическое гамма-распределение. Оценка параметров теоретических кривых распределения осуществлялась по рядам наблюдений за максимальными расходами воды дождевых паводков методом наибольшего правдоподобия и методом моментов [124].

*Коэффициент вариации  $C_v$  и коэффициент асимметрии  $C_s$  для трехпараметрического гамма-распределения определяются методом приближенно наибольшего правдоподобия в зависимости от величин статистик  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , вычисляемых по формулам:*

$$\lambda_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \lg k_i}{(n-1)}, \quad (2.14)$$

$$\lambda_3 = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \lg k_i}{(n-1)}, \quad (2.15)$$

где  $n$  – число лет гидрометрических наблюдений;  $k_i$  – модульный коэффициент максимальных расходов воды дождевых паводков, определяемый по формуле:

$$k_i = \frac{Q_i}{Q_{\bar{n}\delta}}, \quad (2.16)$$

где  $Q_i$  – погодичные значения максимальных расходов воды паводков, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{cp}$  – среднее арифметическое значение максимальных расходов воды дождевых паводков, м<sup>3</sup>/с, равное

$$Q_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}. \quad (2.17)$$

По полученным значениям статистик  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  определяют коэффициенты вариации и асимметрии по номограммам [124].

*Коэффициенты вариации  $C_v$  и асимметрии  $C_s$  методом моментов определяют по формулам:*

$$C_v = \left( a_1 + \frac{a_2}{n} \right) + \left( a_3 + \frac{a_4}{n} \right) \cdot \tilde{C}_v + \left( a_5 + \frac{a_6}{n} \right) \cdot \tilde{C}_v^2, \quad (2.18)$$

$$C_s = \left( b_1 + \frac{b_2}{n} \right) + \left( b_3 + \frac{b_4}{n} \right) \cdot \tilde{C}_s + \left( b_5 + \frac{b_6}{n} \right) \cdot \tilde{C}_s^2, \quad (2.19)$$

где  $a_1, a_2 \dots a_6; b_1, b_2 \dots b_6$  – коэффициенты, определяемые для распределения Крицкого – Менкеля с помощью таблицы из [131];  $\tilde{C}_v$  и  $\tilde{C}_s$  – смещенные оценки, соответственно, коэффициентов вариации и асимметрии, определяемые по формулам:

$$\tilde{C}_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n-1}}, \quad (2.20)$$

$$\tilde{C}_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{\tilde{C}_v^3 \cdot (n-1) \cdot (n-2)}. \quad (2.21)$$

*Ошибка среднего определяется как*

$$\sigma_{Q_{\bar{n}\delta}} = \pm \frac{\tilde{N}_v}{\sqrt{n}} \cdot 100, \%; \quad (2.22)$$

*Ошибка определения коэффициента вариации*

$$\sigma_{C_v} = \pm \sqrt{\frac{3}{2n \cdot (3 + \tilde{N}_v^2)}} \cdot 100, \%. \quad (2.23)$$

Коэффициент автокорреляции между соседними членами ряда  $r(1)$  рассчитывается по формуле:

$$r(1) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - \bar{Q}_1) \cdot (Q_{i+1} - \bar{Q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - \bar{Q}_1)^2 \cdot \sum_{i=2}^n (Q_i - \bar{Q}_2)^2}}, \quad (2.24)$$

$$\text{где } \bar{Q}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} Q_i}{n-1}, \quad (2.25)$$

$$\bar{Q}_2 = \frac{\sum_{i=2}^n Q_i}{n-1}. \quad (2.26)$$

В приложении А представлены основные статистические параметры временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси.

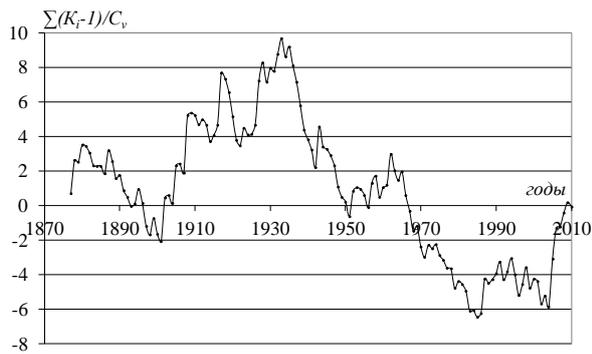
Продолжительность периода наблюдений за паводочным стоком считается достаточной, если рассматриваемый период репрезентативен, а относительная средняя квадратическая погрешность расчетного значения максимального расхода воды дождевого паводка не превышает 20 % [124].

Одним из способов выбора репрезентативного периода наблюдений является построение разностных интегральных кривых, позволяющих выделить временные циклические колебания гидрологических характеристик. При этом период наблюдений должен охватывать как минимум один полный цикл колебаний [31; 57; 78].

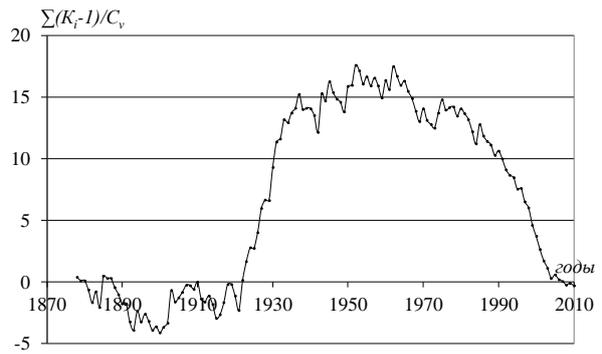
На рисунке 2.1 представлены разностные интегральные кривые максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси, имеющих наибольший период инструментальных наблюдений, на которых различимы довольно четкие, однозначно трактуемые границы циклов.

Так, на р. Западная Двина – г. Витебск полный цикл составляет 45 лет, на р. Неман – г. Гродно – 80 лет, на р. Днепр – г. Орша – 60 лет, на р. Сож – г. Славгород – 50 лет, на р. Березина – г. Бобруйск – 70 лет, на р. Припять – г. Мозырь – 120 лет. Таким образом, выделенные циклы имеют разную продолжительность и разный размах колебаний водности, что не позволяет выбрать единый расчетный период наблюдений для всех гидрологических постов на исследуемой территории.

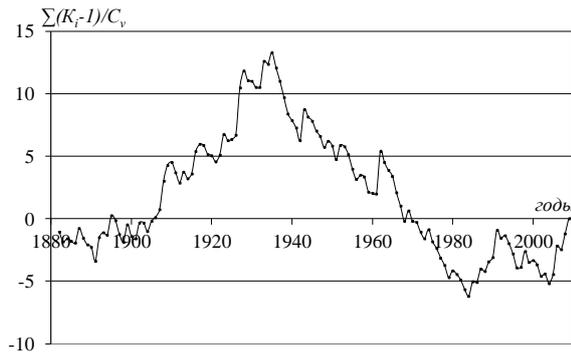
Поскольку дождевые паводки даже на соседних реках проходят несинхронно, продление рядов к более длительному периоду не осуществлялось. Проведен лишь расчет пропущенных значений в рядах наблюдений для получения целостных рядов.



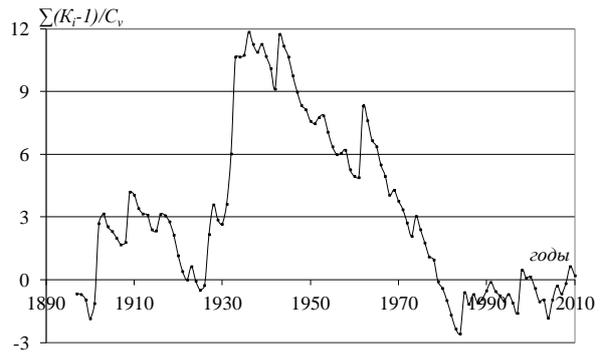
Западная Двина – г. Витебск



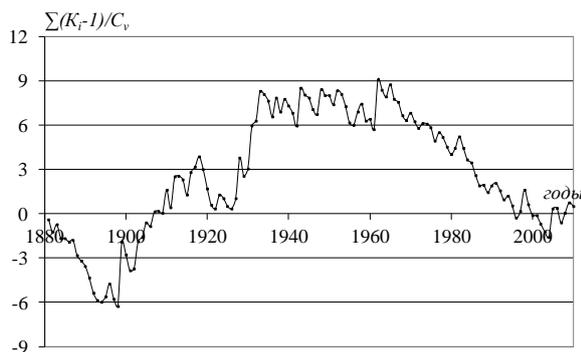
Неман – г. Гродно



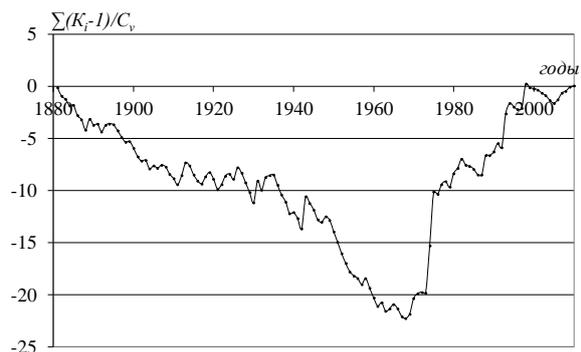
Днепр – г. Орша



Сож – г. Славгород



Березина – г. Бобруйск



Припять – г. Мозырь

Рисунок 2.1 – Разностные интегральные кривые максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси

Для оценки репрезентативности имеющихся рядов наблюдений максимальных расходов воды дождевых паводков определялась средняя квадратическая ошибка, расчет которой по 70 основным рекам Беларуси показал, что во всех случаях ошибка не превышает пороговых 20 %. Следовательно, рассматриваемые ряды максимальных расходов воды дождевых паводков являются репрезентативными.

Оценка однородности временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков осуществлялась на основе генетического и статистического анализов исходных данных наблюдений. Генетический анализ условий формирования речного стока заключается в выявлении физиче-

ских причин, обуславливающих неоднородность исходных данных наблюдений. Для количественной оценки статистической однородности применялись критерии однородности выборочных средних (критерий Стьюдента) и дисперсий (критерий Фишера) [124].

Первичный анализ однородности гидрологических рядов рекомендуется проводить графическими методами, которые предусматривают построение суммарных (интегральных) кривых связей от времени

$$\sum Q_{max} = f(t), \quad (2.27)$$

где  $\sum Q_{max}$  – нарастающее значение максимальных расходов воды дождевых паводков исследуемой реки во времени.

Резкое изменение угла наклона таких кривых характеризует начало изменения водного режима. Нарушение однородности рядов стока возможно как по причине изменения условий формирования водного режима рек, так и по причине естественных природных циклов изменения водности.

На рисунке 2.2 представлены графики изменения нарастающей суммы максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси во времени.

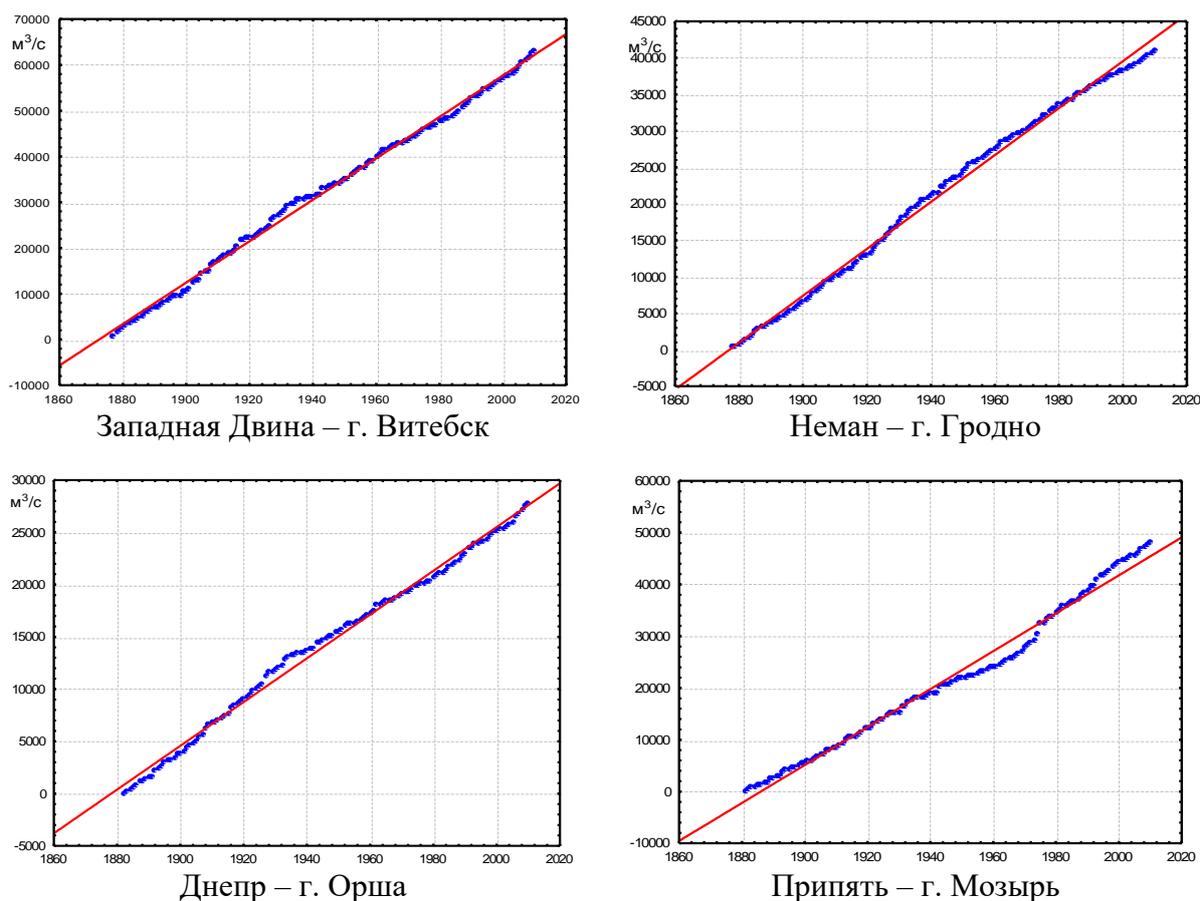


Рисунок 2.2 – Графики изменения нарастающей суммы максимальных расходов воды дождевых паводков во времени

В результате проведения первичного анализа (графического анализа) временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков оказалось, что из 70 временных рядов максимальных расходов воды паводков 42 являются однородными.

Для количественной оценки однородности исходных данных наблюдений использовались статистические критерии однородности средних значений и дисперсий для различных интервалов временных рядов с помощью критериев Стьюдента  $t_{cm}$  и Фишера  $F$  соответственно с последующим графическим представлением этих коэффициентов в зависимости от года деления временного ряда, которые рассчитывались по формулам:

$$t_{co} = \frac{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2}{\sqrt{t_1 \cdot \hat{\sigma}_1^2 + t_2 \cdot \hat{\sigma}_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{t_1 \cdot t_2 \cdot (t_1 + t_2 - 2)}{t_1 + t_2}} \quad t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{n_x \hat{\sigma}_x^2 + n_y \hat{\sigma}_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_x \cdot n_y \cdot (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}, \quad (2.28)$$

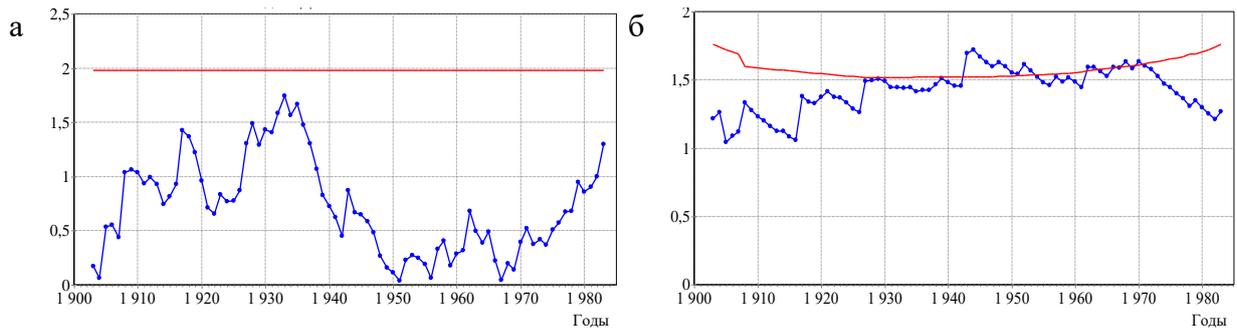
$$F = \frac{\hat{\sigma}_1^2}{\hat{\sigma}_2^2} \quad F = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \quad (2.29)$$

где  $\bar{Q}_1$  и  $\bar{Q}_2$  – выборочные средние максимальных расходов воды паводков за период  $t_1$  и  $t_2$  соответственно;  $\hat{\sigma}_x$  и  $\hat{\sigma}_y$ ,  $\hat{\sigma}_1^2$  и  $\hat{\sigma}_2^2$  – выборочные дисперсии;  $t_1$  и  $t_2$  – количество лет наблюдений за рассматриваемые периоды соответственно.

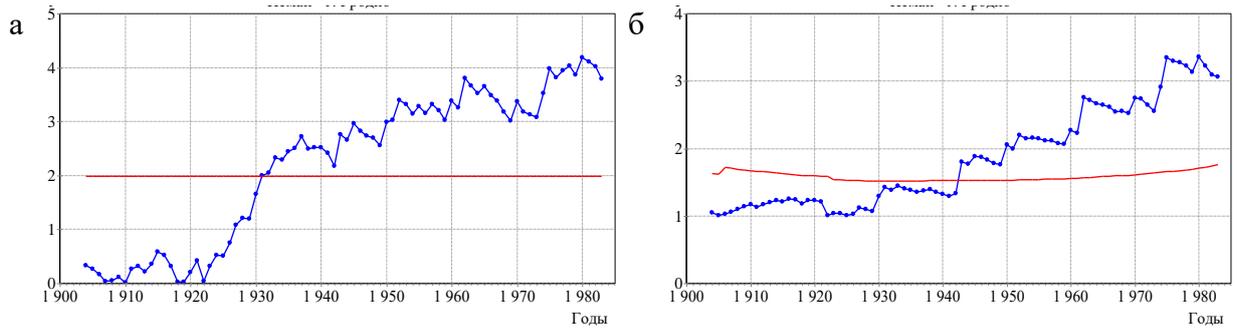
Полученные значения  $t_{cm}$ -критерия Стьюдента и  $F$ -критерия Фишера сравнивались с их критическими значениями при заданном уровне значимости  $\alpha = 5\%$ . Если  $t_{cm} > t_{\alpha}$ , то принимается гипотеза статистического различия двух выборочных средних. При  $F > F_{\alpha}$  принимается гипотеза статистического различия в колебаниях рассматриваемых рядов.

На первом этапе рассматриваемый временной ряд делился на два интервала: первый интервал начинался от начала периода наблюдений ( $i = 1$ ) и заканчивался  $i = 0,2 \cdot n$ , где  $n$  – длина исследуемого временного ряда. При этом длина интервала  $l_{1j} = 0,2 \cdot n - i + 1$ . Второй интервал начинался от  $i = 0,2 \cdot n + 1$  и заканчивался  $i = n$ , длина которого составила  $l_{2j} = 0,8 \cdot n - i + 2$ . Для этих интервалов определялись различия в средних и дисперсиях с помощью критериев Стьюдента и Фишера соответственно. На втором этапе принимается  $i = 2$ , определяются критерии Стьюдента и Фишера для новых величин интервалов. Процедура повторяется до  $i = 0,8 \cdot n$ .

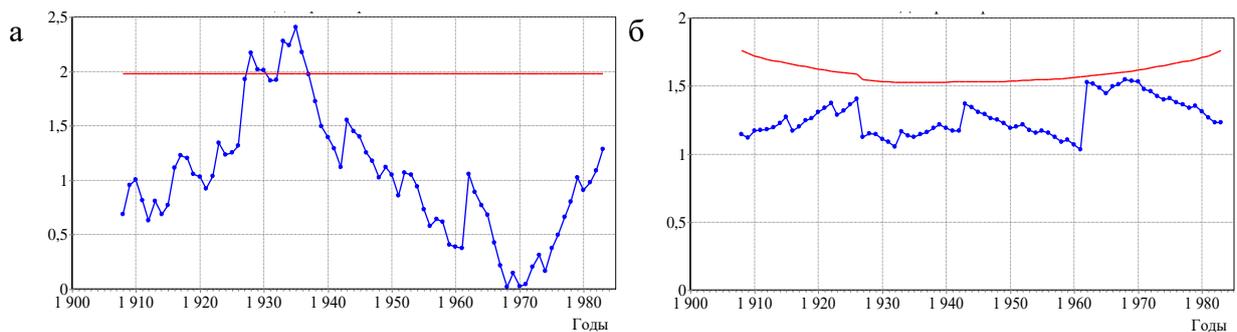
Результаты графического анализа временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси представлены на рисунке 2.3.



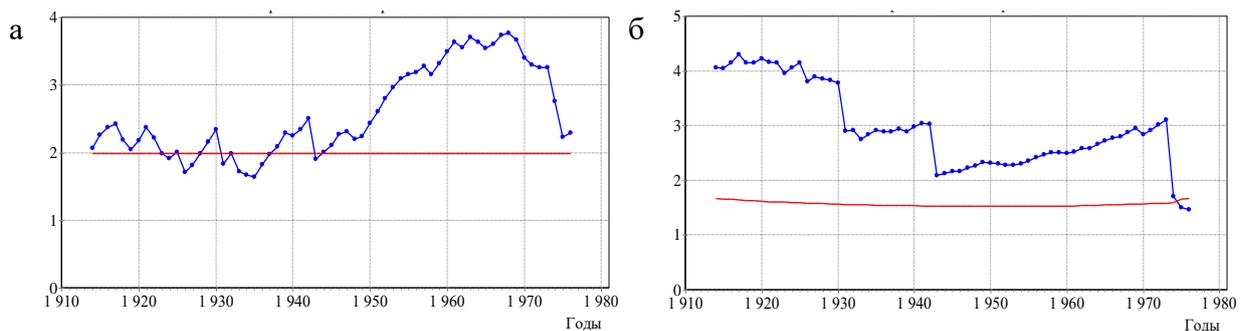
Западная Двина – г. Витебск



Неман – г. Гродно



Днепр – г. Орша



Припять – г. Мозырь

Рисунок 2.3 – Оценка однородности временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков:

а) зависимость  $t_{кр} = f(t)$ ; б)  $F = f(t)$ , где  $t$  – год расчленения ряда

Исследование временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси показало, что примерно в 50 % случаев отмеча-

ется неоднородность по критерию Стьюдента. Неоднородность по дисперсии (критерий Фишера) выявлена на большинстве рек страны.

Так, на р. Западная Двина – г. Витебск в периоды 1943–1953 и 1962–1969 гг. отмечаются статистически значимые различия в дисперсиях, а различия в средних являются статистически незначимыми на всем протяжении ряда.

На р. Неман – г. Гродно статистически значимые различия в средних начались в начале 30-х гг. прошлого века, а различия в дисперсиях – с первой половины 1940-х годов.

Для максимальных расходов воды паводков р. Днепр – г. Орша в период 1928–1936 гг. отмечаются статистически значимые различия в средних, в то время как по критерию Фишера ряд является однородным.

Исследования временного ряда максимальных расходов воды паводков р. Припять – г. Мозырь показали, что ряд является неоднородным на протяжении всего рассматриваемого периода.

Таким образом, выполненный статистический анализ однородности временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси показал, что на многих реках страны произошли нарушения однородности многолетних рядов наблюдений, вызванные природно-климатическими и антропогенными факторами. Для большинства исследуемых временных рядов имеет место наличие статистически значимых различий в средних и дисперсиях, начало которых приходится на разные годы.

# ГЛАВА 3

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ И ОЦЕНКА ИХ ИЗМЕНЕНИЙ

### 3.1 Многолетние колебания максимальных расходов воды дождевых паводков

На рисунке 3.1 и в приложении Б представлены графики многолетних колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси за период инструментальных наблюдений, на которых показаны линии трендов.

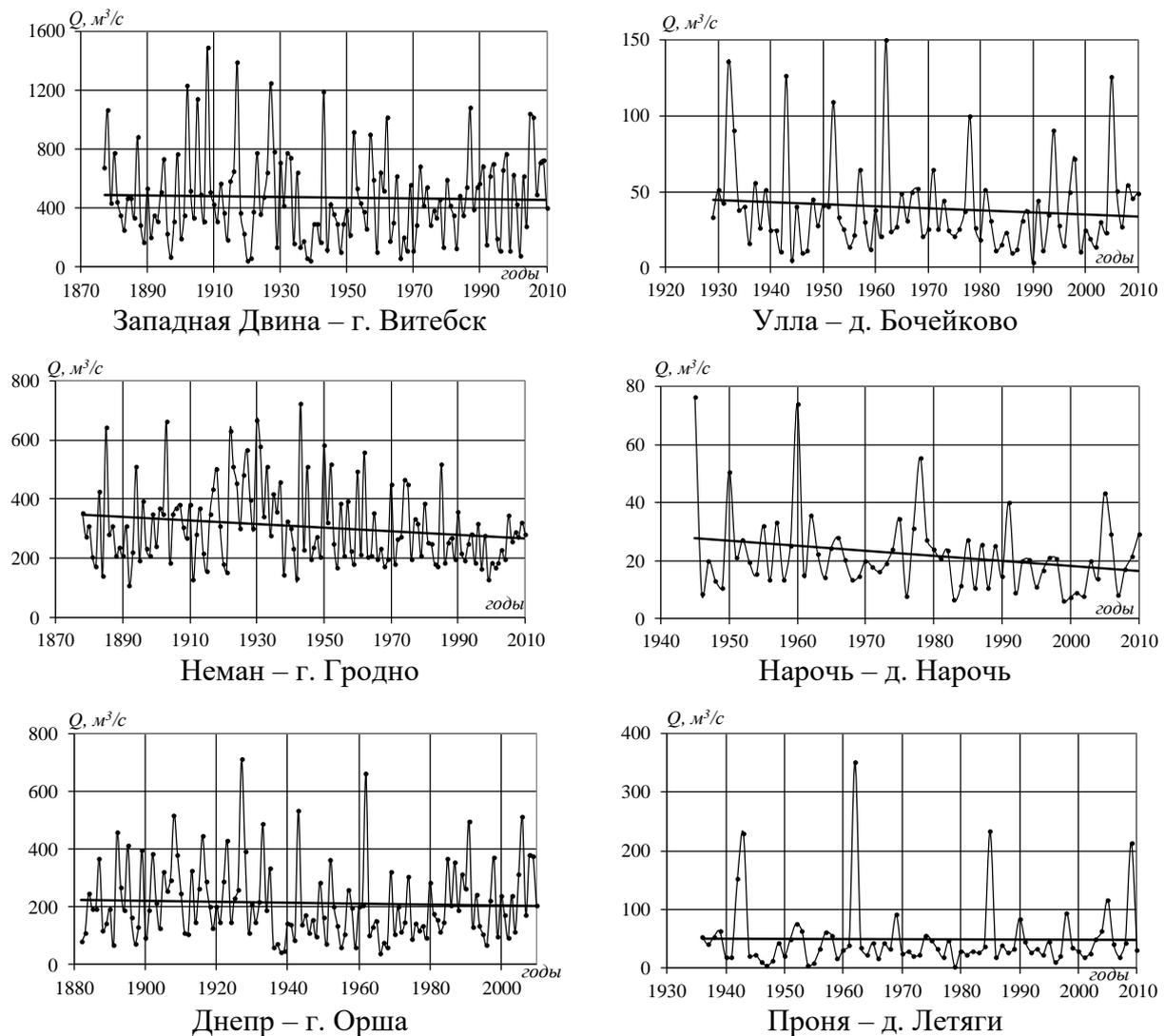


Рисунок 3.1 – Графики многолетних колебаний максимальных расходов  
воды дождевых паводков



Рисунок 3.1. Окончание

В таблице 3.1 и приложении Б приведены параметры линейных трендов рядов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси. Таблица 3.1 – Параметры линейных трендов максимальных расходов воды дождевых паводков

Река – створ	Градиент изменения стока $\alpha$ , (м <sup>3</sup> /с)/10 лет	Коэффициент корреляции $r$
Зап. Двина – г. Витебск	-0,25	0,03
Улла – д. Бочейково	-0,14	0,11
Неман – г. Гродно	-0,61	<b>0,18</b>
Нарочь – д. Нарочь	-0,17	<b>0,24</b>
Днепр – г. Орша	-0,17	0,05
Проня – д. Летяги	-0,01	0,01
Припять – г. Мозырь	1,74	<b>0,24</b>
Оресса – д. Андреевка	-0,02	0,03

*Примечание – Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции на 5 %-ном уровне значимости*

Анализ графиков показал, что для многолетних рядов колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков характерно чередование периодов с повышенной и пониженной водностью.

Так, на р. Западная Двина – г. Витебск наибольшие величины максимальных расходов воды дождевых паводков отмечены в первые десятилетия XX в. (1908, 1917 гг.), обеспеченность которых соответствует 1 %-ной и менее вероятности превышения. С 60-х гг. XX в. амплитуда колебаний максимальных расходов воды паводков заметно уменьшилась и величина расходов существенно меньше, чем в первой половине XX в. В 1930-е гг., а также с середины 1960-х до середины 1980-х гг. отмечались наименьшие дождевые паводки. Из паводков последних десятилетий своей величиной в многолетнем ряду выделяются дождевые паводки 1987, 2005 и 2006 гг. В целом для Западной Двины – г. Витебск тенденция к росту либо снижению величины максимальных расходов воды паводков не выражена.

Из притоков Западной Двины наиболее продолжительный ряд наблюдений за водным режимом имеется по рекам Полота, Нача, Улла (более 80 лет). Наибольшие паводки на притоках отмечены в 1962, 1978, 1994 и 2005 гг. В период с середины 60-х до середины 70-х гг. прошлого столетия на большинстве притоков наблюдались наименьшие паводки. Явно выраженной тенденции к росту либо снижению величины максимальных расходов воды дождевых паводков в бассейне Западной Двины не наблюдается. Так, на некоторых притоках отмечается увеличение паводочных расходов за период инструментальных наблюдений (рр. Оболь, Дрыса, Нища), на других – уменьшение (рр. Улла, Нача, Дисна), на некоторых – без изменений (рр. Полота, Березовка).

На р. Неман – г. Гродно наибольшие паводки отмечались в 1885, 1903, 20-е – начале 30-х гг. XX в., 1950, 1952, 1962 и 1985 гг. На притоках Немана, наблюдения по которым начали вестись в основном в послевоенный период, наибольшие паводки были на различных реках в разные годы. Так, на р. Гавья – д. Лубинята наибольшие паводки отмечены в 1960, 1975, 1977, 1978, 1980, 2005 гг. На р. Котра – Сахкомбинат самый большой дождевой паводок наблюдался в 1950 г., который по величине своего максимального расхода ( $87,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ) значительно превзошел все остальные дождевые паводки и сопоставим по величине с максимумами весенних половодий редкой обеспеченности. Наибольшие паводки на р. Щара – г. Слоним были в 1970, 1974, 1975, 1980 гг., несколько меньшие – в 1960, 1962, 1994, 2005 гг. На р. Нарочь – д. Нарочь своей величиной выделяются паводки 1945, 1950, 1960, 1978 и 2005 гг. Таким образом, на Немане и большинстве его притоков наблюдается тенденция к снижению величины максимальных расходов воды дождевых паводков, особенно заметная с середины 80-х гг. XX в. Лишь в бассейне Вилии в последние десятилетия отмечались большие дождевые паводки (1991, 1998, 2005, 2006).

Реки бассейна Западного Буга имеют менее продолжительный период наблюдений. Поэтому можно судить лишь о паводках с середины прошлого века. Здесь своей величиной в многолетнем ряду выделяются паводки второй половины 70-х гг. XX в. (1974, 1975, 1979, 1980).

На Днепре в период с конца XIX в. до 30-х гг. XX в. отмечались паводки значительной величины (наибольший в створе г. Орша в 1927 г.,  $Q_{max} = 713 \text{ м}^3/\text{с}$ ). С середины 60-х до середины 80-х гг. прошлого века – период с наименьшими дождевыми паводками. Очень большой дождевой паводок на Днепре отмечен в 1962 г. Со второй половины 80-х гг. XX в. величина паводков возросла. Значительные дождевые паводки отмечались в 1991, 1998, 2006, 2008, 2009 гг.

Наибольшие дождевые паводки на р. Березина – г. Борисов были в 1927 (максимальный,  $Q_{max} = 192 \text{ м}^3/\text{с}$ ), 1937, 1952 и 1962 гг., на р. Сож –

в первой половине XX в., особенно выделяется паводок 1933 г. (обеспеченностью 0,9 %). В период с середины 60-х до 90-х гг. XX в. величина дождевых паводков значительно снизилась. Из больших паводков последних десятилетий можно выделить паводки 1998, 2005, 2006 и 2009 гг. На притоках Сожа (рр. Уза и Беседь) наблюдается тенденция к уменьшению величины максимальных расходов воды дождевых паводков. На обеих реках наибольшие паводки отмечались в 1930-е гг., своей величиной также выделяются паводки 1958, 1969 и 1974 гг. На р. Свислочь – д. Теребуты наибольшие паводки отмечены в 1937, 1962, 1975, 1982, 1998 и 2005 (максимальный) гг., на р. Жадунька – г. Костюковичи – в 1953, 1958 и 1974 гг.

Таким образом, на реках бассейна Днепра явно выраженной тенденции в сторону увеличения либо уменьшения максимальных расходов воды дождевых паводков не наблюдается. Здесь величина паводков на протяжении всего периода инструментальных наблюдений на реках существенно не изменилась. На многих реках в период с середины 60-х до середины 80-х гг. XX в. наблюдается снижение величины максимальных расходов воды дождевых паводков.

На р. Припять – г. Мозырь наибольшие дождевые паводки по величине максимального расхода воды за период инструментальных наблюдений отмечались в 1974 и 1975 гг., несколько меньшие – в 1993, 1998 гг., а также в 1931 г. Причем величина максимального расхода воды дождевого паводка 1975 г. ( $1770 \text{ м}^3/\text{с}$ ) соответствует 0,8 %-ной вероятности превышения и значительно превышает величину остальных паводков. Период 1950–1960-е гг. характеризуется отсутствием либо небольшими дождевыми паводками, в дальнейшем отмечается период увеличения дождевого паводочного стока. В целом для р. Припять – г. Мозырь наблюдается тенденция к росту величины максимальных расходов воды дождевых паводков за период инструментальных наблюдений.

Наибольшие паводки на р. Горынь – д. Малые Викоровичи отмечались в 1924 и 1975 гг. ( $Q_{max} = 1150$  и  $1080 \text{ м}^3/\text{с}$  соответственно). В 50–60-е гг. XX в. наблюдались паводки незначительной величины. Лишь в 1969 и 1965 гг. отмечались паводки, соответствующие 10 и 17 %-ной вероятности превышения соответственно. Из паводков последних десятилетий своей величиной и размерами ущерба выделяются дождевые паводки 1988, 1993 и 1998 гг.

На р. Птичь – д. Лучицы несмотря на то, что тенденции к увеличению либо уменьшению не выражено, последние десятилетия характеризуются меньшими величинами максимальных расходов воды дождевых паводков в сравнении с особенно 1930-ми и 1960–1970-ми гг., когда отмечались наибольшие паводки за период инструментальных наблюдений. На притоке

Птичи р. Оресса – д. Андреевка многолетний размах колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков во многом напоминает р. Птичь. В многолетнем ряду максимальных расходов воды паводков р. Уборть – д. Краснобережье за период инструментальных наблюдений выделяются паводки 1933, 1975 и 1993 гг. Средняя величина паводков в целом не изменилась, характерно лишь чередование периодов повышенной и пониженной водности.

Таким образом, наибольшие дождевые паводки за период инструментальных наблюдений на многих реках страны отмечены в конце XIX – начале XX в., в 1930-е и 1970-е гг. Также широкое распространение по территории имели паводки 1952, 1957, 1962, 1965, 1975, 1998 и 2005 гг. На многих реках Беларуси наблюдается некоторое изменение величины максимальных расходов воды дождевых паводков, направление и масштабы которого на разных реках страны отличаются. Тенденция к уменьшению величины максимальных расходов воды дождевых паводков наблюдается в бассейнах Немана и Западного Буга. На Припяти и некоторых ее притоках (рр. Ясельда, Цна) выражена тенденция к увеличению максимальных расходов воды дождевых паводков за период инструментальных наблюдений, на большинстве же притоков Припяти изменений в сторону увеличения либо уменьшения не выявлено. Меньше всего величина паводков изменилась в бассейнах Днепра и Западной Двины.

### **3.2 Оценка изменений величины максимальных расходов воды дождевых паводков**

Для количественной оценки изменений величины максимальных расходов воды дождевых паводков во времени ряды наблюдений были разбиты на два периода: с начала наблюдений по 1965 г. и с 1966 г. по 2010 г. Эти два периода различаются в первую очередь по степени антропогенного воздействия на речные системы. Выбор 1965 г. в качестве переломного связан с началом крупномасштабных осушительных мелиораций. При этом выбраковывались ряды с периодом наблюдений менее 15 лет хотя бы за один из интервалов.

Для выявления пространственной структуры изменения максимальных расходов воды дождевых паводков величины изменения максимальных расходов были представлены в виде коэффициентов изменения стока

$$k_i = \frac{Q_{cp2} - Q_{cp1}}{Q_{cp}}, \quad (3.1)$$

где  $Q_{cp1}$  и  $Q_{cp2}$  – средние значения максимальных расходов воды дождевых паводков за период от начала инструментальных наблюдений на реках

до 1965 г. и с 1966 по 2010 г. соответственно;  $Q_{cp}$  – среднее значение максимальных расходов за весь период наблюдений.

Коэффициенты изменения стока  $k_i$  были картографированы с использованием координат центров тяжести водосборов исследуемых рек.

На рисунке 3.2 представлены коэффициенты изменения паводочного стока  $k_i$  за период 1966–2010 гг. в сравнении с периодом от начала инструментальных наблюдений на реках до 1965 г. Положительное значение коэффициента свидетельствует об увеличении средних значений максимальных расходов воды дождевых паводков во второй период по сравнению с первым, отрицательное – об уменьшении.

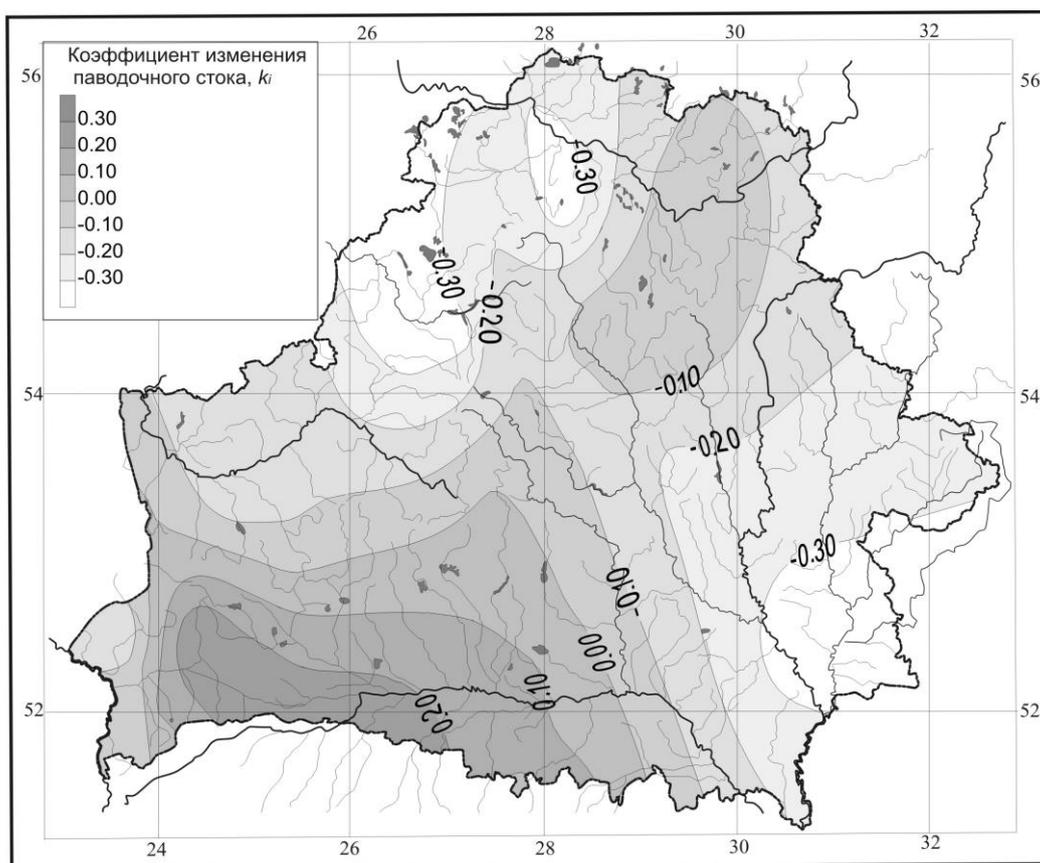


Рисунок 3.2 – Пространственная структура изменения максимальных расходов воды дождевых паводков за период 1966–2010 гг. по сравнению с периодом до 1965 г.

На большинстве рек Беларуси в период 1966–2010 гг. по сравнению с периодом от начала инструментальных наблюдений на реках до 1965 г. произошли изменения величины максимальных расходов воды дождевых паводков, масштабы и направления которых различны по территории (рисунок 3.2). Так, на реках бассейнов Западной Двины, Немана и Днепра отмечается уменьшение величины дождевых паводков. Самые существенные уменьшения наблюдаются в западной части водосбора Западной Двины,

правых притоках Немана и левых притоках Днепра – до 30 %. В остальной части указанных водосборов величина уменьшения менее значительна – в пределах 10–20 %.

Противоположная картина наблюдается в бассейне Припяти, где в период 1966–2010 гг. по сравнению с периодом до 1965 г. величина максимальных расходов воды дождевых паводков увеличилась на 10–20 %. Исключение составляет р. Птичь, на которой величина паводков практически не изменилась.

В бассейне Западного Буга дать точную оценку изменениям величин максимальных расходов воды дождевых паводков за рассматриваемые периоды не представляется возможным в связи с относительно короткими рядами наблюдений, в результате чего рассматриваемые ряды являются несопоставимыми по продолжительности. Отсутствие наблюдений в 20–30-е гг. XX в., когда на многих реках Беларуси отмечались наибольшие паводки, может привести к неверным результатам.

Анализ пространственной структуры изменения величин максимальных расходов воды дождевых паводков на реках Беларуси позволяет утверждать, что причины, вызвавшие изменение их величины, носят как природный, так и антропогенный характер. Подтверждением этому является тот факт, что в бассейне Припяти, где мелиоративные работы были наиболее интенсивными по сравнению с другими частями страны, коэффициенты изменения паводочного стока отличаются от общей ситуации по стране.

Влияние крупномасштабных мелиораций на Полесье, которые проявились в осушении обширных болотных массивов, на сток рек неоднозначно. Еще А.Г. Булавко [24] отмечал, что после мелиорации происходит некоторое увеличение речного стока. С одной стороны, увеличение густоты речной сети (произошло в результате строительства мелиоративных каналов) создает благоприятные условия для стока, а именно приводит к возрастанию скорости добега воды до речного русла во время паводка, снижению потерь и тем самым к росту максимальных расходов воды паводков. С другой стороны, снижение уровня грунтовых вод приводит к созданию дополнительного аккумулирующего влагу аэрированного слоя почвогрунта, задерживающего поступающие дождевые воды, повышается инфильтрационная способность почв, в результате чего происходит рост потерь воды, что обуславливает снижение максимальных расходов воды дождевых паводков. В результате мелиорации произошли разнонаправленные воздействия на сток, большинство из которых действует в направлении улучшения условий стекания, что способствует росту максимальных расходов воды паводков.

Таким образом, можно предположить, что в бассейне Припяти произошла компенсация двух разнонаправленных векторов: с одной стороны, под влиянием природных процессов произошло снижение максимальных расходов воды дождевых паводков (характерно для всей территории Беларуси), с другой – их увеличение в результате мелиоративных работ.

В связи с наличием тенденций к изменению величин максимальных расходов воды дождевых паводков выполнен сравнительный анализ изменения их обеспеченных величин за период 1966–2010 гг. в сравнении с периодом 1921–1965 гг. (для рек с более коротким периодом инструментальных наблюдений – от начала инструментальных наблюдений до 1965 г.). С помощью трехпараметрического гамма-распределения получены обеспеченные величины максимальных расходов воды дождевых паводков для рассматриваемых периодов, которые представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Обеспеченные величины максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси за различные периоды, м<sup>3</sup>/с

Река – створ	Период	Обеспеченность, %		
		5	10	50
Зап. Двина – г. Витебск	1921–1965	1140	907	379
	1966–2010	1060	734	428
	изменения, %	-7,0	-19,1	12,9
Улла – д. Бочейково	1929–1965	137	112	33,5
	1966–2010	97,2	67,5	27,5
	изменения, %	<b>-29,1</b>	<b>-39,7</b>	-17,9
Полота – д. Янково	1927–1965	29,5	21,1	7,32
	1966–2010	19,8	17,8	8,30
	изменения, %	<b>-32,9</b>	-15,6	13,4
Неман – д. Белица	1925–1965	418	373	185
	1966–2010	258	234	145
	изменения, %	<b>-38,3</b>	<b>-37,3</b>	<b>-21,6</b>
Неман – г. Гродно	1921–1965	656	580	324
	1966–2010	461	412	247
	изменения, %	<b>-29,7</b>	<b>-29,0</b>	<b>-23,8</b>
Виляя – д. Михалишки	1946–1965	289	276	127
	1966–2010	208	185	102
	изменения, %	<b>-28,0</b>	<b>-33,0</b>	-19,7
Нарочь – д. Нарочь	1945–1965	76,1	69,2	21,2
	1966–2010	42,3	32,4	19,8
	изменения, %	<b>-44,4</b>	<b>-53,2</b>	-6,6
Днепр – г. Орша	1921–1965	624	453	157
	1966–2010	464	378	174
	изменения, %	<b>-25,6</b>	-16,6	10,8
Днепр – г. Речица	1921–1965	891	731	309
	1966–2010	753	611	366
	изменения, %	-15,5	-16,4	18,5

Продолжение таблицы 3.2

Березина – г. Борисов	1921–1965	127	101	37,5
	1966–2010	80,4	61,3	36,2
	изменения, %	<b>–36,7</b>	<b>–39,3</b>	<b>–3,5</b>
Сушанка – д. Суша	1946–1965	17,8	8,34	2,11
	1966–2010	8,91	5,61	1,96
	изменения, %	<b>–49,9</b>	<b>–32,7</b>	<b>–7,11</b>
Сож – г. Гомель	1921–1965	554	448	179
	1966–2010	449	385	180
	изменения, %	<b>–18,8</b>	<b>–14,1</b>	<b>0,6</b>
Уза – д. Прибор	1928–1965	26,0	19,9	3,14
	1966–2010	14,4	9,90	3,91
	изменения, %	<b>–44,6</b>	<b>–50,3</b>	<b>24,5</b>
Припять – г. Мозырь	1921–1965	865	624	212
	1966–2010	1480	925	403
	изменения, %	<b>71,1</b>	<b>48,2</b>	<b>90,1</b>
Горынь – д. Малые Викоровичи	1922–1965	872	517	116
	1966–2010	707	674	150
	изменения, %	<b>–18,9</b>	<b>30,4</b>	<b>29,3</b>
Птичь – д. Дараганово	1921–1965	30,7	23,4	8,01
	1966–2010	27,8	22,1	8,96
	изменения, %	<b>–9,5</b>	<b>–5,6</b>	<b>11,9</b>
Оресса – д. Андреевка	1926–1965	63,5	55,1	23,4
	1966–2010	66,0	52,9	27,5
	изменения, %	<b>3,9</b>	<b>–4,0</b>	<b>17,5</b>

*Примечание – Выделены статистически значимые изменения*

Анализ таблицы 3.2 показал, что отмечаются существенные расхождения в обеспеченных величинах максимальных расходов воды дождевых паводков за рассматриваемые периоды. На большинстве рек Беларуси выявлено уменьшение величины максимальных расходов в период 1966–2010 гг. по сравнению с предшествующим периодом. Наиболее существенные уменьшения отмечаются в бассейне Немана. Меньше других рек изменения коснулись Западной Двины. Противоположная картина отмечается на Припяти, где в период 1966–2010 гг. величина рассматриваемых обеспеченных величин максимальных расходов воды дождевых паводков увеличилась в 1,5–2 раза по сравнению с предшествующим периодом. На притоках Припяти существенных изменений не выявлено. Таким образом, при разработке вероятностных прогнозов необходимо учитывать факт неоднородности временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков.

В последние десятилетия наблюдаются заметные изменения климата, проявляющиеся в повышении среднегодовой температуры воздуха. Особенно ощутимы они стали с середины 80-х гг. XX в. Эти изменения отразились на факторах формирования стока рек и гидрологическом режиме. Для выявления роли потепления климата в формировании дождевых па-

водков период 1966–2010 гг. был разделен на 2 интервала: 1966–1987 и 1988–2010 гг. Для них найдены средние значения максимальных расходов воды, представленные в виде коэффициентов изменения стока  $k_i$  (рисунок 3.3).

В период современного потепления климата (1988–2010) на реках севера и северо-востока страны произошло увеличение максимальных расходов воды дождевых паводков на 20–30 % по сравнению с периодом 1966–1987 гг. (рисунок 3.3). В бассейнах Вилии и Березины величина дождевых паводков практически не изменилась. На остальных реках Беларуси отмечается уменьшение величины дождевых паводков на 10–20 % на юге и на 20–30 % на западе. Самые существенные уменьшения выявлены в бассейне Западного Буга (50 % и более). Таким образом, можно выделить две зоны изменения величины максимальных расходов воды дождевых паводков в современный период потепления климата: зона роста величины дождевых паводков (север и северо-восток страны) и зона снижения (запад и юг).

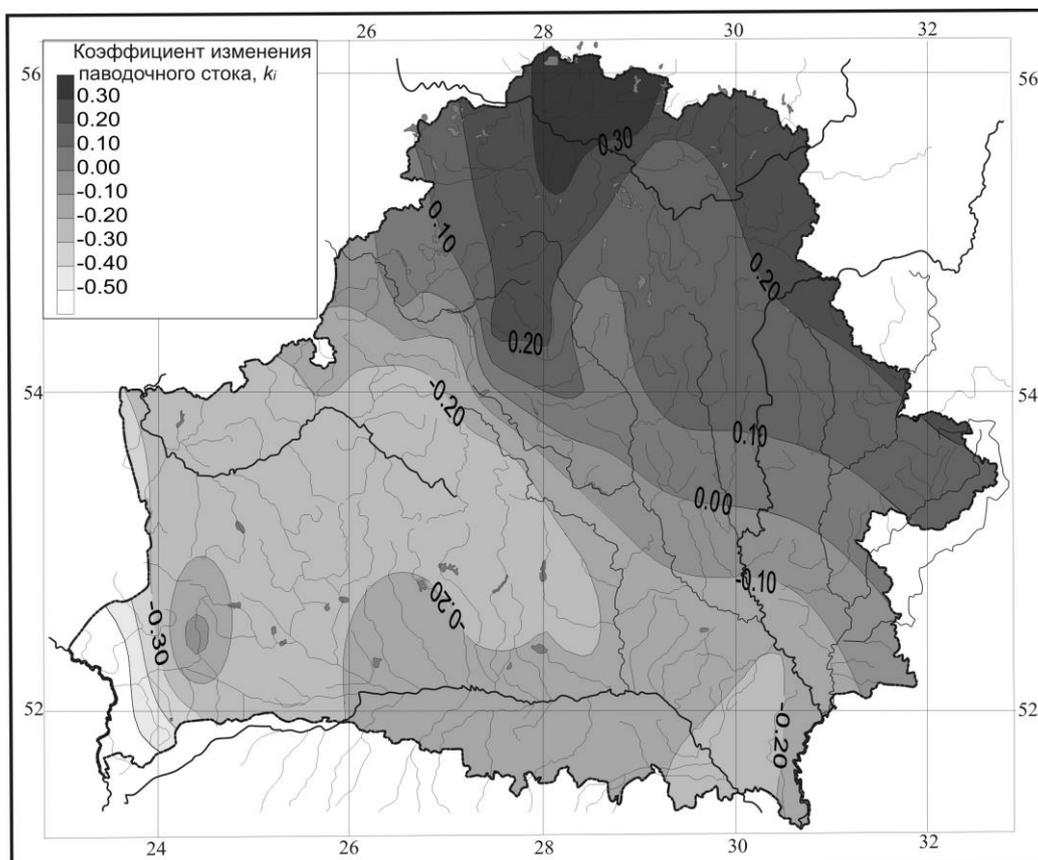


Рисунок 3.3 – Пространственная структура изменения максимальных расходов воды дождевых паводков за период 1988–2010 гг. по сравнению с периодом 1966–1987 гг.

Сформировавшееся распределение изменения величины паводков обусловлено изменением количества выпавших осадков и их внутригодовым перераспределением, а также повышением температуры воздуха, что привело к росту суммарного испарения и дефицита почвенной влаги. На севере и северо-востоке Беларуси рост осадков наиболее значительный, что при невысокой впитывающей способности почв (тяжелых по механическому составу, преимущественно суглинистых) привело к росту дождевых паводков. Уменьшение дождевых паводков на юге и западе страны вызвано снижением суточных осадков малой обеспеченности в июне и августе. Повлияло также уменьшение величины весенних половодий и смещение их на более ранние сроки, что приводит к иссушению почвогрунтов и росту их впитывающей способности, в результате чего на песчаных и супесчаных почвах вероятность формирования высоких дождевых паводков значительно уменьшается. Это особенно сказалось в июне, когда даже при благоприятных условиях для формирования дождевых паводков (еще сохраняется повышенная увлажненность ландшафтов водосбора после весеннего половодья) их величина значительно уменьшилась. Рост ливневых осадков в июле не всегда приводит к формированию больших паводков на реках вследствие повышения потерь воды на инфильтрацию и испарение. Кроме того, ливневые дожди нередко носят единичный характер и реже имеют развитие в виде последующего продолжения, что уменьшает вероятность формирования паводков на реках.

Помимо оценки изменения величин максимальных расходов воды дождевых паводков проводился анализ числа лет с наиболее высокими дождевыми паводками (обеспеченностью не более 25 %) за различные периоды (от начала инструментальных наблюдений на реках до 1965 г., 1966–1987 и 1988–2010 гг.) как отношение количества паводков рассматриваемой обеспеченности к количеству лет наблюдений за тот или иной период, выраженные в процентах. При этом рассматривались реки, продолжительность наблюдений за паводочным стоком по которым за каждый из периодов составляла не менее 15 лет. Полученные результаты представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Число лет с паводками (в %) обеспеченностью не более 25 % за различные периоды

Река – створ	Период, годы		
	от начала наблюдений до 1965	1966–1987	1988–2010
Зап. Двина – г. Витебск	27	9	35
Зап. Двина – г. Полоцк	21	9	48
Улла – д. Бочейково	24	23	30
Полота – д. Янково	28	18	26
Нача – д. Нача	33	9	26

Продолжение таблицы 3.3

Дисна – п.г.т. Шарковщина	38	18	22
Березовка – д. Саутки	31	18	26
Неман – г. Столбцы	36	23	4
Неман – д. Белица	37	27	4
Неман – г. Мосты	47	27	9
Неман – г. Гродно	32	23	0
Свислочь – д. Сухая Долина	28	32	17
Котра – Сахкомбинат	30	36	9
Вилия – г. Вилейка	35	18	26
Вилия – д. Михалишки	45	14	17
Нарочь – д. Нарочь	33	27	17
Копаяювка – д. Черск	18	36	22
Лесная – г. Каменец	40	32	4
Днепр – г. Орша	25	23	30
Днепр – г. Могилев	20	23	35
Днепр – г. Жлобин	20	18	39
Днепр – г. Речица	31	5	26
Ухлясть – д. Радьков	38	27	17
Друть – д. Городище	50	5	26
Березина – г. Борисов	28	9	30
Березина – г. Бобруйск	29	14	22
Свислочь – д. Теребуты	23	27	26
Сушанка – д. Суша	25	18	30
Сож – г. Славгород	25	18	35
Сож – г. Гомель	24	14	39
Остер – д. Ходунь	27	23	26
Проня – д. Летяги	33	14	22
Беседь – д. Светиловичи	22	23	35
Жадунька – д. Костюковичи	35	27	17
Уза – д. Прибор	32	27	13
Припять – д. Черниччи	14	36	30
Припять – г. Мозырь	19	41	35
Ясельда – г. Береза	29	27	22
Ясельда – д. Сенин	24	27	26
Горынь – д. Малые Викоровичи	20	41	17
Уборть – д. Краснобережье	28	23	22
Птичь – д. Дараганово	28	32	13
Птичь – д. Лучицы	27	41	9
Оресса – д. Андреевка	25	32	17

Количество дождевых паводков обеспеченностью не более 25 % сильно варьирует за различные периоды по разным рекам страны (таблица 3.3). Так, в бассейнах Западной Двины и Днепра наибольшее количество паводков рассматриваемой обеспеченности на реках отмечалось в первый (до 1965 г.) и третий (1988–2010) периоды. В бассейнах

Немана и Западного Буга количеством высоких дождевых паводков выделяются первые два периода, в то время как в третий период их число минимально. На реках водосбора Припяти наибольшее число высоких дождевых паводков наблюдалось во второй, несколько меньшее – в первый период.

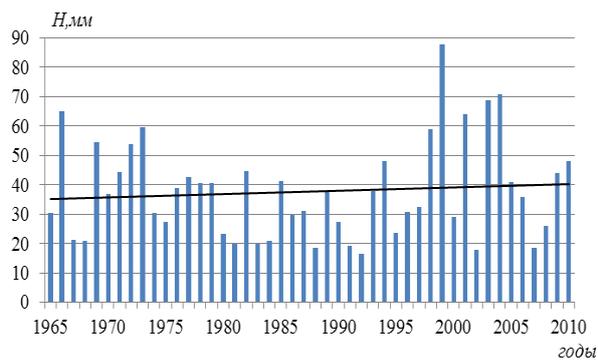
Выполненные исследования позволили выявить периоды и годы, когда отмечались наибольшие дождевые паводки на разных реках Беларуси. В первый период (до 1965 г.) на большинстве рек страны отмечались дождевые паводки значительной величины, особенно высокие были в конце XIX – 20–30-х гг. XX в. Во второй период (1966–1987) наибольшее количество дождевых паводков обеспеченностью до 25 % наблюдалось в бассейне Припяти, наименьшее – в бассейнах Западной Двины и Днепра. В третий период (1988–2010) наибольшее число высоких дождевых паводков отмечалось в бассейнах Западной Двины и Днепра, наименьшее – в бассейне Немана.

Таким образом, в бассейнах Западной Двины и Днепра величина дождевых паводков существенно не изменилась на протяжении всего периода инструментальных наблюдений, лишь в 60–80-е гг. XX в. наблюдалось снижение их величины. Уменьшение величины дождевых паводков произошло на реках бассейна Немана, особенно заметное – с середины 80-х гг. прошлого века. На реках бассейна Припяти, где антропогенные воздействия были наиболее существенными, в период потепления климата (с 1988 г.) отмечается снижение величины максимальных расходов воды дождевых паводков на 10–20 % по сравнению с предшествующим периодом 1966–1987 гг., когда наблюдались паводки наибольшей величины.

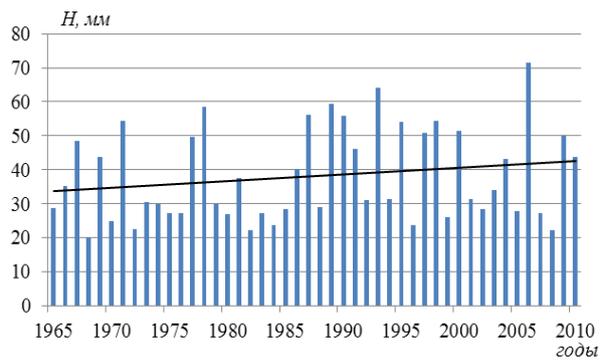
### **3.3 Пространственно-временные изменения паводкообразующих осадков**

Выявленные изменения величины дождевых паводков на реках Беларуси в современный период вызвали необходимость изучения особенностей распределения и изменения атмосферных осадков по территории страны.

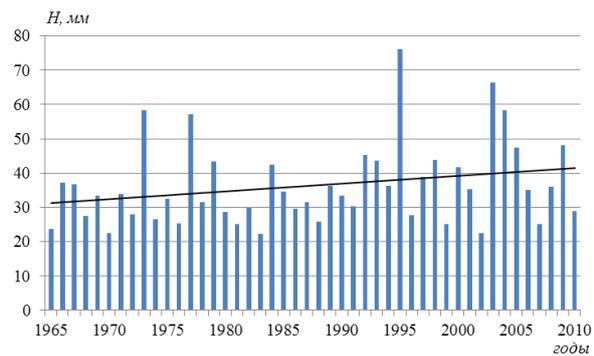
Для оценки изменения величины осадков в современный период потепления климата по сравнению с предшествующим периодом рассматривались суточные максимумы осадков за период с 1965 по 2010 г. (рисунок 3.4).



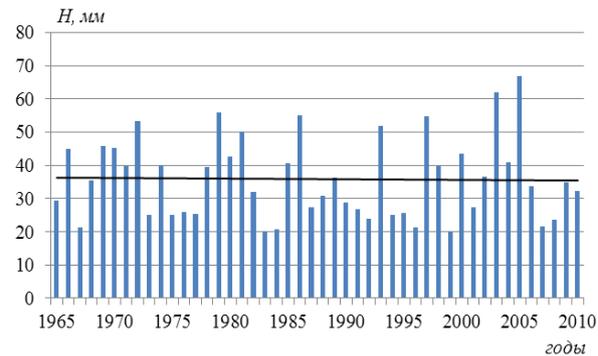
Шарковщина



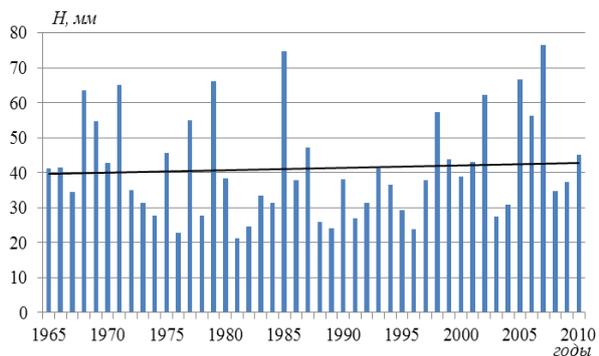
Витебск



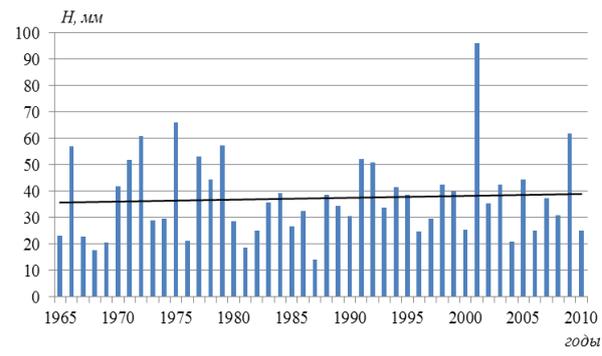
Полоцк



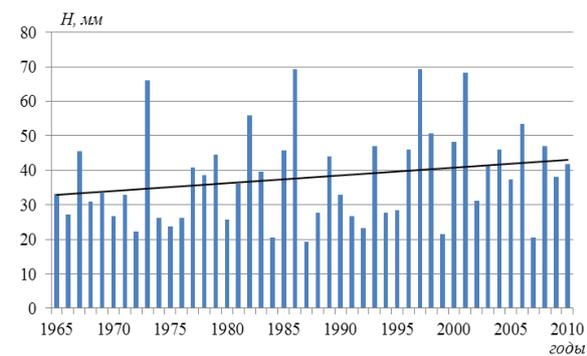
Вилейка



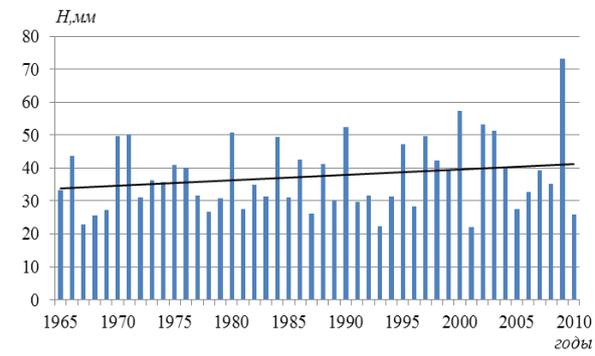
Лида



Гродно

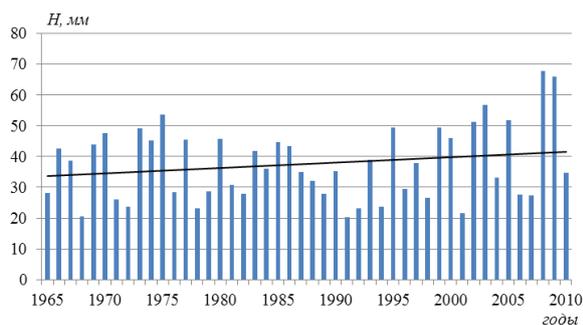


Борисов

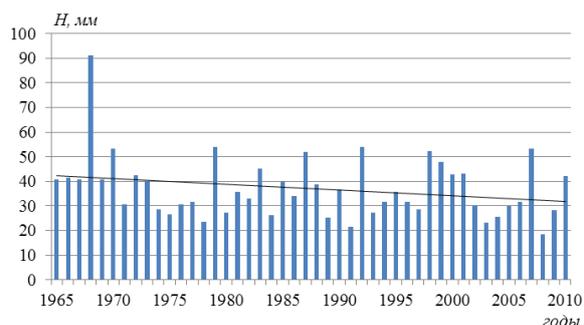


Жлобин

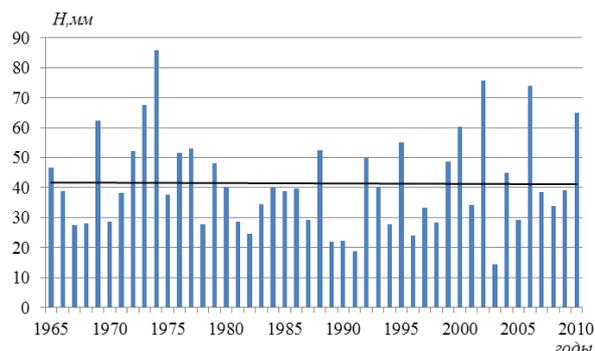
Рисунок 3.4 – Наибольшие суточные осадки за период 1965–2010 гг.



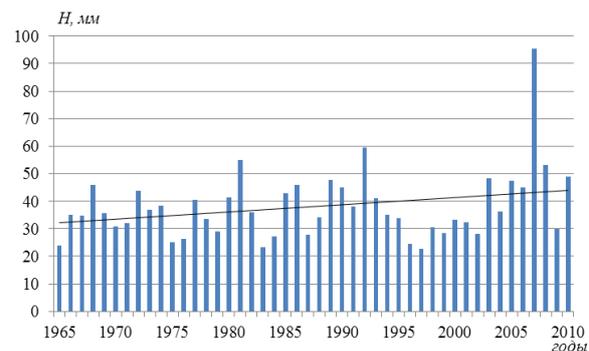
Славгород



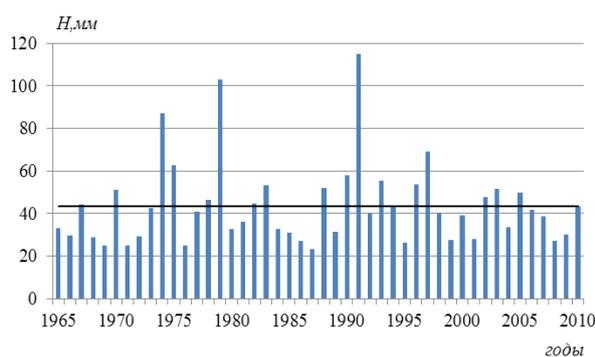
Пружаны



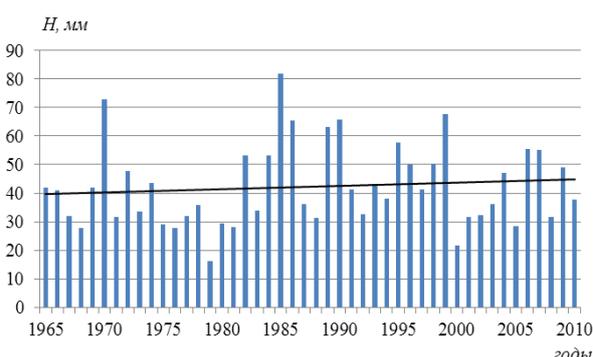
Брест



Пинск



Житковичи



Василевичи

Рисунок 3.4. Окончание

Установлено, что на севере и северо-востоке Беларуси отмечается тенденция к росту наибольших суточных осадков за рассматриваемый период. На юге и западе страны их величина существенно не изменилась. Исключение составляет подрайон в Припятского гидрологического района, в пределах которого выявлено уменьшение наибольших суточных осадков.

С помощью трехпараметрического гамма-распределения получены суточные осадки 1 %-ной обеспеченности за два периода (1965–1987 и 1988–2010 гг.) по разным месяцам года (приложение В). Установлено, что произошло перераспределение осадков по месяцам года. Так, увеличение суточных осадков 1 %-ной обеспеченности на большинстве метеостанций установлено в июле, сентябре и октябре, уменьшение – в июне.

Изменения суточных осадков 1 %-ной обеспеченности в мае и августе различны по метеостанциям страны.

В связи с тем, что формирование дождевых паводков на реках происходит обычно в результате выпадения серии дождей, рассматривались не отдельные дожди, а дождевые периоды, под которыми (с учетом средней продолжительности подъема воды во время паводка и индексов предшествующего увлажнения за разные сезоны года) принимались периоды с суммами осадков за 10 суток для весенних и осенних паводков более 50 мм, а для летних – более 80 мм (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Изменение числа дождевых периодов

Метеостанция	Число дождевых периодов		Метеостанция	Число дождевых периодов	
	1965–1987	1988–2010		1965–1987	1988–2010
Витебск	19	30	Лида	24	24
Шарковщина	19	29	Волковыск	21	19
Борисов	26	36	Брест	27	25
Могилев	18	26	Пинск	22	20
Житковичи	31	36	Василевичи	32	29
Горки	18	22	Вилейка	26	22
Верхнедвинск	21	24	Новогрудок	35	31
Славгород	25	28	Пружаны	26	20

Анализ таблицы 3.4 показал, что на севере и северо-востоке Беларуси число дождевых периодов увеличилось, на западе и юге – в основном уменьшилось, хотя и в меньшей степени. Исключение составляет метеостанция Житковичи, где отмечается увеличение числа дождевых периодов. Повышенное количество осадков на юге связано с подъемом приходящих воздушных масс по так называемой «поверхности подъема», которая образуется в связи с прослеживающимся южнее в теплый период отрогом Азорского антициклона. Здесь также происходит подпитка приходящих воздушных масс влагой, испаряющейся с поверхности расположенного здесь озера Червоное (самое большое на Полесье) и многочисленных болот [81]. Повышенное количество осадков в районе Житковичей обуславливает повышенный сток в этом районе. Рост числа дождевых периодов в районе Житковичей также связан с тем, что в последние десятилетия выросло число случаев, когда на территорию Беларуси приходят воздушные массы с юга, приносящие осадки в данный район.

Таким образом, выявлена связь изменения величины дождевых паводков в период современного потепления климата с изменением наибольших суточных осадков и числом дождевых периодов. В целом по стране отмечается рост паводкообразующих осадков на севере и северо-востоке, уменьшение – на юго-западе.

Одной из формул расчета максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений рек с площадью водосбора менее 50 км<sup>2</sup> является формула предельной интенсивности стока (4.13), в которую входит параметр  $H_{1\%}$  – максимальный суточный слой осадков в мм, обеспеченностью  $P = 1\%$ , который определяется по данным ближайших метеорологических станций или по карте изолиний (раздел 4.1). Согласно нормативным документам, в частности [124], при определении гидрологических параметров необходимо использовать не только репрезентативные ряды, но и учитывать данные наблюдений последних лет. Однако существующая карта суточных осадков 1 %-ной обеспеченности построена по данным наблюдений до 1960-х гг. и не отражает современных изменений, произошедших в режиме выпадения атмосферных осадков [118; 128].

Руководствуясь требованиями нормативных документов, мы построили карту суточных осадков 1 %-ной обеспеченности с учетом данных наблюдений последних лет (рисунок 3.5). При построении карты использовались величины суточных осадков 1 %-ной обеспеченности по метеостанциям Беларуси за период 1965–2010 гг.

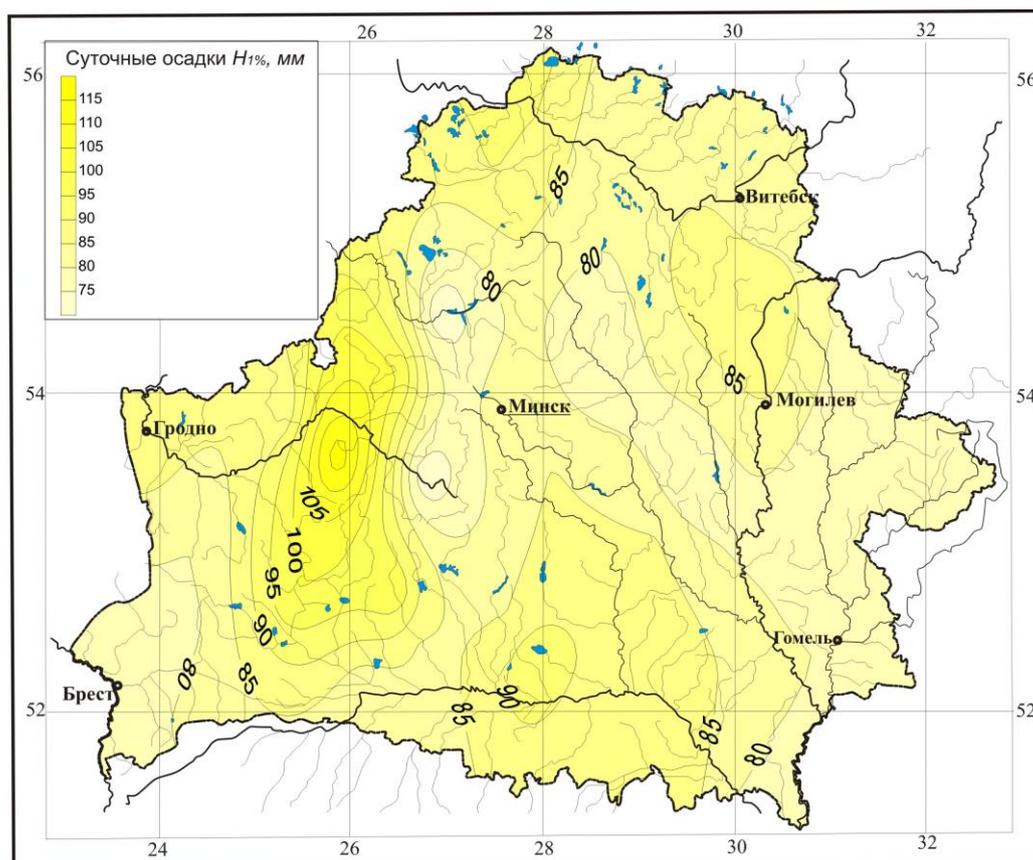


Рисунок 3.5 – Максимальный суточный слой осадков 1 %-ной обеспеченности

Сопоставление построенной карты (рисунок 3.5) с используемой ранее [128] показало, что характер распределения суточных осадков обеспеченностью 1 % по территории Беларуси в современный период во многом сходен с распределением осадков в предыдущие годы (до 1960-х гг.). Однако если в предыдущие годы наибольшие значения суточных осадков 1 %-ной обеспеченности отмечались в пределах Минской возвышенности, то в настоящее время произошло смещение их на Новогрудскую возвышенность, на наветренных склонах которой выпадает наибольшее количество осадков. Небольшое увеличение суточных максимумов наблюдается также в бассейне Припяти. Незначительное уменьшение (в пределах 10 %) суточных осадков 1 %-ной обеспеченности отмечается на востоке Беларуси.

### **3.4 Роль типов циркуляции атмосферы в формировании дождевых паводков на реках Беларуси**

Для выявления закономерностей многолетних колебаний дождевого паводочного стока в зависимости от характеристик циркуляции атмосферы использовался макроциркуляционный метод (предложен Г.Я. Вангенгеймом и А.А. Гирсом). В основе этого метода лежит выделение элементарных синоптических процессов, которые обобщаются в трех типах циркуляции атмосферы: *W* – западном, *E* – восточном, *C* – меридиональном и нескольких комбинированных, для каждого из которых характерны свои особенности состояния атмосферы [52; 53; 61; 75]. Макропроцессы каждого типа сохраняются в течение длительного времени (циркуляционные эпохи), в результате формируется определенный тип погоды и, как следствие, климат территории. Поэтому каждая из форм циркуляции обуславливает разные метеорологические условия на территории Беларуси, определяющие соответствующий гидрологический режим рек.

Исследовалась связь величины максимальных расходов воды дождевых паводков в зависимости от различных типов циркуляции атмосферы. При этом для каждой из циркуляционных эпох были определены статистические параметры временных рядов максимальных расходов воды паводков: средние величины максимальных расходов воды  $Q_{cp}$ , коэффициенты вариации  $C_v$  и коэффициенты автокорреляции  $r(1)$ , а также учитывалось количество паводков обеспеченностью не более 25 % в каждую из эпох (таблица 3.5).

Поскольку наиболее продолжительные ряды наблюдений, позволяющие исследовать паводки в разные эпохи циркуляции, имеются по крупным рекам страны, анализ роли атмосферной циркуляции проведен для крупных рек (с периодом наблюдений более 100 лет).

Таблица 3.5 – Статистические параметры временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков для периодов с разными типами циркуляции атмосферы

Река – створ	Период	<i>n</i>	Тип циркуляции атмосферы	Число паводков $P < 25\%$	$Q_{ср}$ м <sup>3</sup> /с	$C_v$	$r(I)$
Зап. Двина – г. Витебск	1877–1890	14	С	4	510	0,52	0,02
	1891–1928	38	W	11	524	0,69	0,09
	1929–1939	11	Е	4	365	0,82	0,13
	1940–1948	9	С	1	360	0,92	–
	1949–1970	22	Е+С	4	424	0,66	–0,14
	1971–1995	25	Е	4	452	0,48	–0,16
	1996–2010	15	W	6	552	0,62	–0,03
Неман – г. Гродно	1878–1890	13	С	2	290	0,45	–0,76
	1891–1928	38	W	13	337	0,40	0,07
	1929–1939	11	Е	5	398	0,37	–0,08
	1940–1948	9	С	2	315	0,59	–0,88
	1949–1970	22	Е+С	7	305	0,45	–0,76
	1971–1995	25	Е	4	273	0,35	–0,33
	1996–2010	15	W	0	239	0,28	0,26
Днепр – г. Орша	1882–1890	9	С	1	182	0,48	–0,08
	1891–1928	38	W	15	264	0,54	0,07
	1929–1939	11	Е	2	174	0,79	0,22
	1940–1948	9	С	1	176	0,78	–0,26
	1949–1970	22	Е+С	3	180	0,78	–0,07
	1971–1995	25	Е	6	201	0,52	0,02
	1996–2010	15	W	5	239	0,54	–0,05
Днепр – г. Речица	1895–1928	34	W	15	463	0,41	0,19
	1929–1939	11	Е	2	359	0,56	0,12
	1940–1948	9	С	1	362	0,51	–0,28
	1949–1970	22	Е+С	5	374	0,65	–0,22
	1971–1995	25	Е	1	366	0,26	0,05
	1996–2010	15	W	5	453	0,48	–0,14
Березина – г. Бобруйск	1881–1890	10	С	1	134	0,28	–0,60
	1891–1928	38	W	12	177	0,53	–0,10
	1929–1939	11	Е	5	190	0,54	–0,14
	1940–1948	9	С	2	168	0,56	–0,28
	1949–1970	22	Е+С	6	156	0,50	–0,24
	1971–1995	25	Е	3	142	0,27	–0,07
	1996–2010	15	W	4	162	0,43	–0,09
Сож – г. Гомель	1900–1928	29	W	8	227	0,56	0,19
	1929–1939	11	Е	4	311	0,79	–0,16
	1940–1948	9	С	1	172	0,83	–0,18
	1949–1970	22	Е+С	4	192	0,50	0,04
	1971–1995	25	Е	6	206	0,45	–0,04
	1996–2010	15	W	5	223	0,53	–0,37

Продолжение таблицы 3.5

Припять – г. Мозырь	1881–1890	10	С	1	269	0,57	–0,51
	1891–1928	38	W	8	331	0,48	0,11
	1929–1939	11	Е	2	298	0,92	–0,19
	1940–1948	9	С	2	359	0,89	–0,26
	1949–1970	22	Е+С	4	274	0,66	0,32
	1971–1995	25	Е	12	569	0,70	0,17
	1996–2010	15	W	3	406	0,44	–0,01
Птичь – д. Лучицы	1895–1928	34	W	9	64,8	0,54	0,13
	1929–1939	11	Е	5	82,7	0,62	–0,17
	1940–1948	9	С	1	64,2	0,89	–0,20
	1949–1970	22	Е+С	6	68,7	0,70	–0,19
	1971–1995	25	Е	7	70,7	0,60	0,07
	1996–2010	15	W	2	56,5	0,49	–0,19

На Западной Двине и Днепре самые большие дождевые паводки, а также наибольшее их число отмечалось в периоды 1891–1928 и 1996–2010 гг., соответствующие западной форме циркуляции атмосферы (W).

На Березине наибольшая средняя величина максимальных расходов воды паводков была в период 1929–1939 гг. с восточным типом циркуляции атмосферы (E). В этот период паводки обеспеченностью до 25 % отмечались в 5 годах из 11. В целом за весь период инструментальных наблюдений наибольшая средняя величина максимальных расходов воды дождевых паводков, а также чаще всего паводки рассматриваемой обеспеченности были в эпоху с западным типом циркуляции атмосферы (W) – в 30 % случаев.

Период 1929–1939 гг., соответствующий восточному типу циркуляции атмосферы (E), характеризуется наибольшим числом высоких паводков и средней величиной их максимальных расходов воды на Соже и Немане. Несколько меньшие паводки отмечались на этих реках в период 1891–1928 гг. (W). Однако в период 1996–2010 гг. (W) на Немане дождевых паводков обеспеченностью до 25 % не наблюдалось.

На реках бассейна Припяти наибольшее число и наибольшая средняя величина максимальных расходов воды дождевых паводков отмечались при восточной форме циркуляции атмосферы (E). Для р. Припять – г. Мозырь самым многоводным является период 1971–1995 гг. как по величине средних значений максимальных расходов воды, так и по числу паводков обеспеченностью не более 25 %. На р. Птичь – д. Лучицы самым многоводным оказался период с 1929 по 1939 гг. Оба эти периода (1971–1995 и 1929–1939 гг.) соответствуют восточной форме циркуляции атмосферы (E).

Таким образом, выявить ту или иную эпоху циркуляции атмосферы в качестве явно преобладающей в формировании максимальных расходов

воды дождевых паводков на реках Беларуси не удается. Обнаружено, что наибольшие дождевые паводки на реках страны формировались в периоды с восточным (*E*) и западным (*W*) типами циркуляции атмосферы. Помимо общей циркуляции атмосферы на формирование паводков оказывает влияние большое число различных факторов. Паводок – явление локальное и даже на соседних реках его масштабы могут существенно отличаться. Минимальное число лет с паводками наблюдалось в периоды с меридиональным типом циркуляции атмосферы (*C*).

### **3.5 Оценка асинхронности в формировании максимальных расходов воды дождевых паводков**

Паводки редко охватывают обширные территории, чаще – лишь отдельные речные бассейны. В приложении Г представлены годы с дождевыми паводками различной обеспеченности  $P$  (%), произошедшие на реках Беларуси за период инструментальных наблюдений.

Анализ таблицы Г.1 (приложение Г) показал, что распределение обеспеченностей максимальных расходов воды дождевых паводков по территории Беларуси имеет пеструю картину. Наибольшие дождевые паводки на одной реке не всегда прослеживаются в числе первых наиболее высоких паводков на других реках. Так, в 1962 г. на многих реках Беларуси отмечались высокие дождевые паводки. На некоторых реках паводок 1962 г. по величине максимального расхода является непревзойденным за более чем 100-летний период. В бассейне Припяти величина паводка 1962 г. соответствует в среднем лишь 10–20 %-ной обеспеченности.

Территориальное распределение обеспеченностей максимальных расходов воды дождевых паводков 1975 и 1993 гг. на реках Белорусского Полесья представлено на рисунке 3.6.

Дождевой паводок 1975 г. на Припяти и многих ее притоках (рр. Цна, Птичь, Оресса, Случь) по своим размерам является наибольшим за весь период инструментальных наблюдений. На реках бассейна Западного Буга его величина соответствует 10–15 %-ной обеспеченности, в восточной части Полесья (бассейн Днепра) – 20–30 %-ной, в бассейне Немана – от 2 до 25 %-ной обеспеченности (рисунок 3.6а).

Значительный паводок был в 1993 г. на юге страны. Наибольшие величины его отмечены в средней части бассейна Припяти, особенно на правобережных притоках (рр. Горынь и Ствига). В пределах Гомельского Полесья его величина соответствует в среднем 25 %-ной вероятности превышения. В бассейне Западного Буга в 1993 г. дождевого паводка не было (рисунок 3.6б).

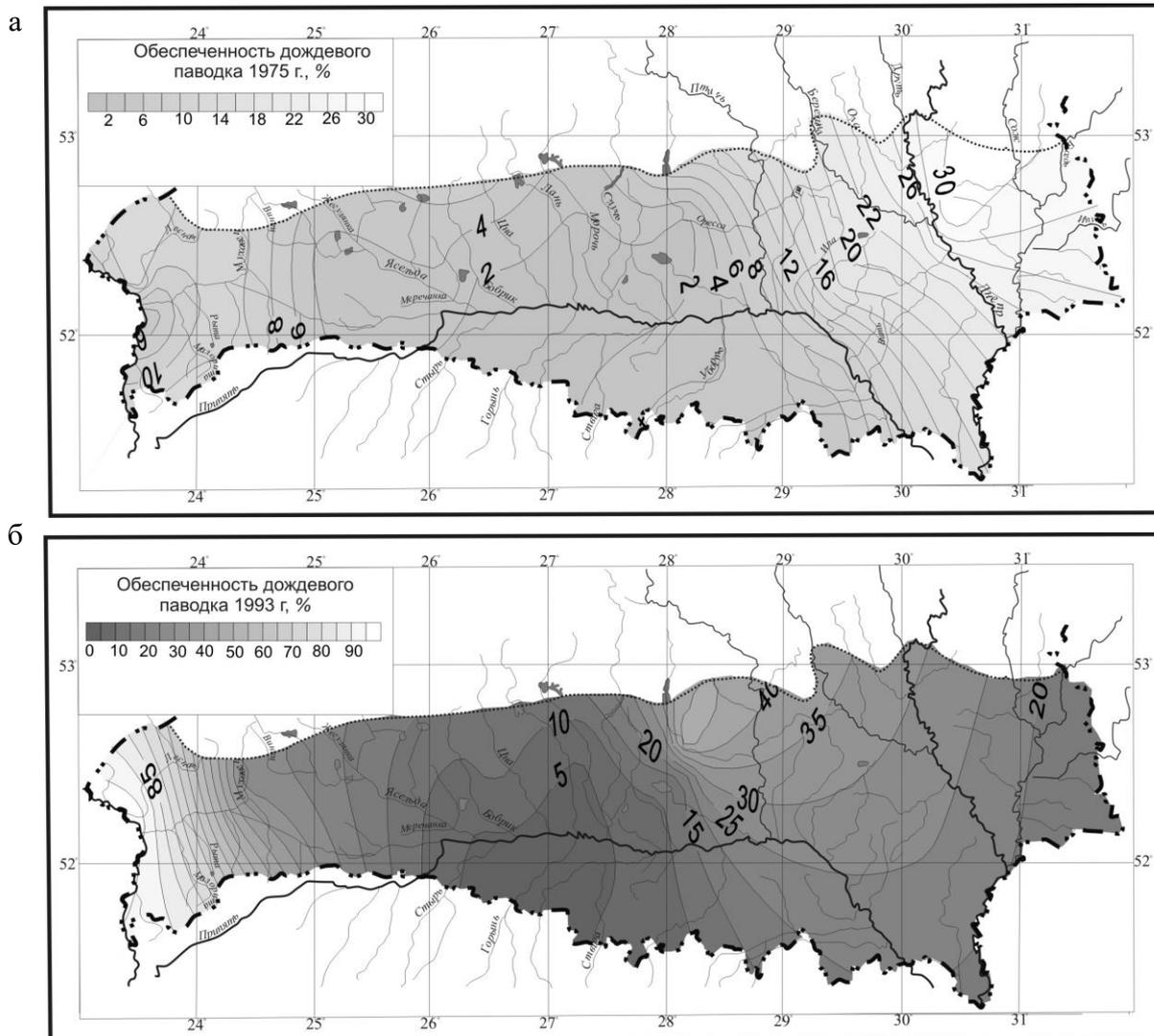


Рисунок 3.6 – Территориальное распределение обеспеченностей максимальных расходов воды дождевых паводков на реках Белорусского Полесья: а – 1975 г., б – 1993 г., %

В 1998 г. на многих реках Беларуси сформировались значительные дождевые паводки, распределение обеспеченностей которых представлено на рисунке 3.7. Наибольшей величины паводок достиг в бассейнах Днепра и Припяти, где его обеспеченность составила около 10 %. В бассейне Западной Двины паводок 1998 г. соответствовал в среднем 15 %-ной обеспеченности, в бассейне Немана – от 5 % на Вилии до 58 % на Немане (в створе г. Гродно).

Таким образом, синхронности в формировании особенно высоких дождевых паводков не наблюдается. Однако наибольшие паводки отмечались на многих реках страны в 1933, 1962, 1975, 1998, 2005 гг., но величина их обеспеченностей различается по территории.

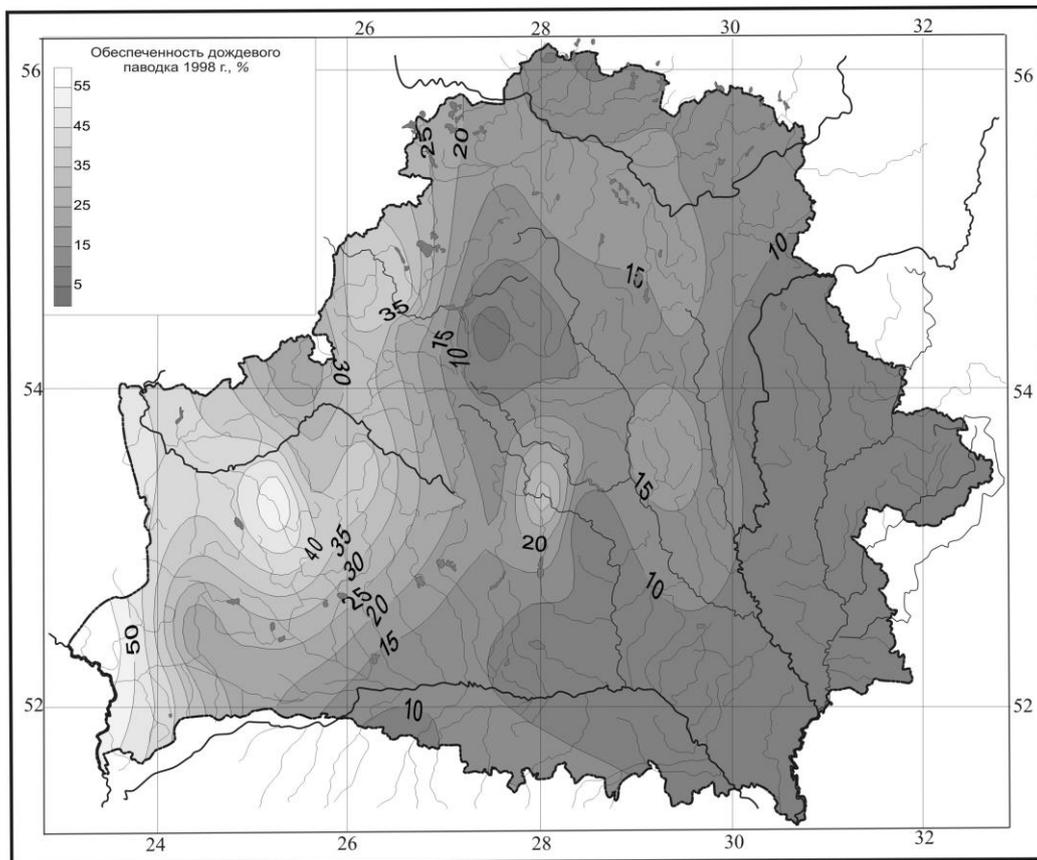
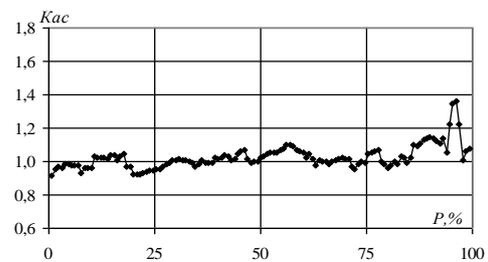
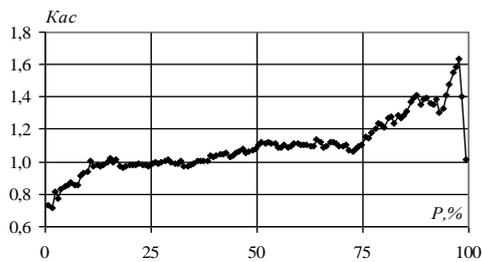
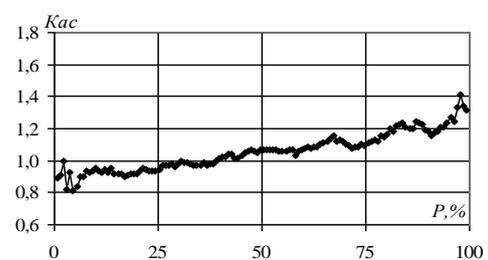
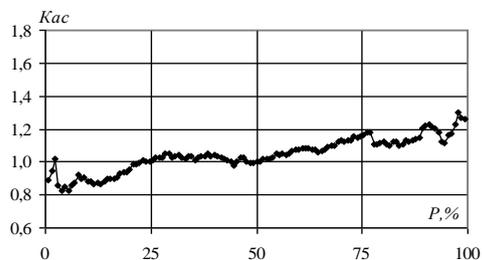


Рисунок 3.7 – Территориальное распределение обеспеченностей максимальных расходов воды дождевого паводка 1998 г. на реках Беларуси, %

На рисунке 3.8 представлены функции пространственной асинхронности максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси.



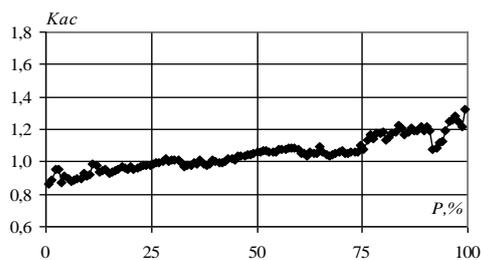
Зап. Двина (г. Витебск) – Припять (г. Мозырь)      Зап. Двина (г. Витебск) – Днепр (г. Орша)



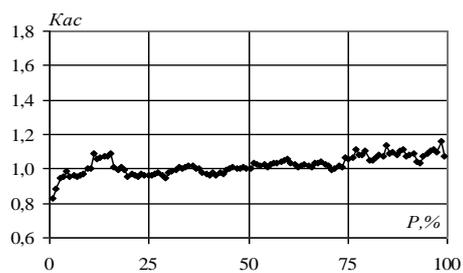
Неман (г. Гродно) – Днепр (г. Орша)

Неман (г. Гродно) – Припять (г. Мозырь)

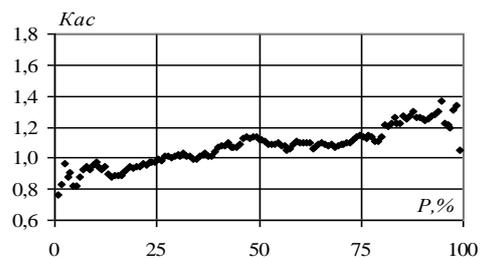
Рисунок 3.8 – Функции пространственной асинхронности



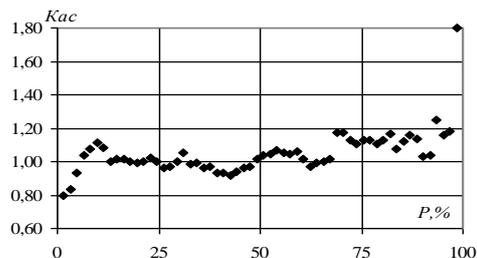
Зап. Двина (г. Витебск) – Неман (г. Гродно)



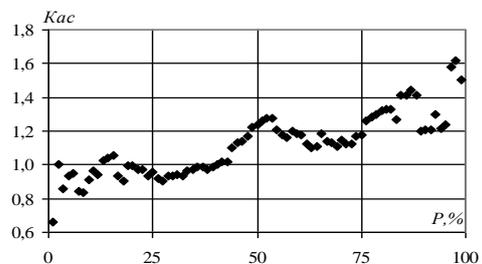
Зап. Двина (г. Витебск) – Днепр (г. Речица)



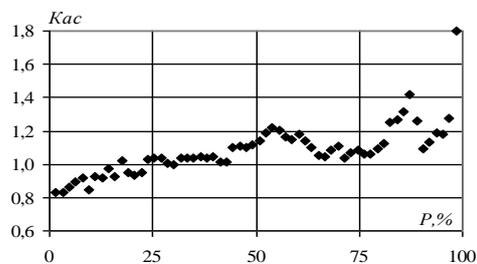
Днепр (г. Орша) – Припять (г. Мозырь)



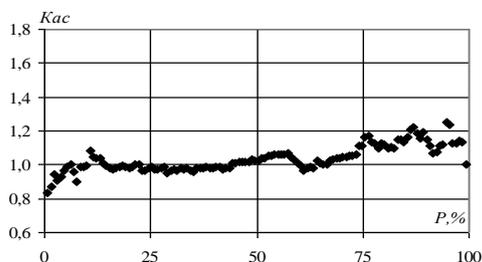
Полота (д. Янково) – Остер (д. Ходунь)



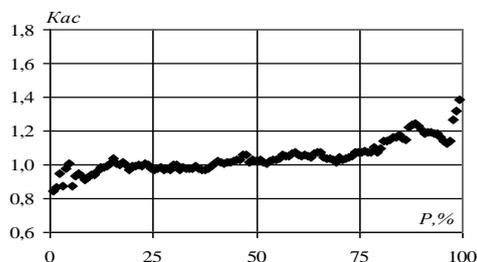
Полота (д. Янково) – Уза (д. Прибор)



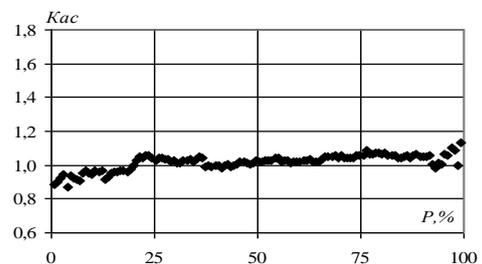
Полота (д. Янково) – Копаювка (д. Черск)



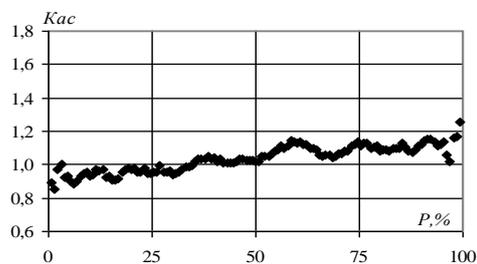
Березина (г. Бобруйск) – Зап. Двина (г. Витебск)



Березина (г. Бобруйск) – Припять (г. Мозырь)



Березина (г. Бобруйск) – Неман (г. Гродно)



Березина (г. Бобруйск) – Днепр (г. Орша)

Рисунок 3.8. Окончание

Анализ рисунка 3.8 показывает, что коэффициент асинхронности ( $K_{ac}$ ) в формировании максимальных расходов воды дождевых паводков рек Западная Двина – г. Витебск и Припять – г. Мозырь для наибольших паводков достигает 0,8, для паводков обеспеченностью от 10 до 40 % асинхронность менее выражена ( $K_{ac} = 0,95–1,05$ ). Для небольших паводков отмечается тенденция к росту величины асинхронности в формировании максимальных расходов воды дождевых паводков ( $K_{ac} = 1,2–1,3$ ). Для рек Западная Двина – г. Витебск и Днепр – г. Орша асинхронность в формировании максимальных расходов воды паводков выражена слабо (изменяется в пределах 0,9–1,1).

На реках Неман – г. Гродно и Днепр – г. Орша для дождевых паводков обеспеченностью менее 20 % коэффициенты асинхронности достигают 0,8–0,9. При обеспеченностях паводков от 20 до 60 % для коэффициентов асинхронности характерна стабильность, при этом их величина составляет около 1. Для небольших паводков величина  $K_{ac}$  возрастает до 1,2–1,3.

Для рек Неман – г. Гродно и Припять – г. Мозырь значения коэффициентов асинхронности увеличиваются прямо пропорционально увеличению обеспеченности. Для дождевых паводков обеспеченностью 25–40 % наблюдается относительная стабильность коэффициентов асинхронности ( $K_{ac}$  около 1).

Таким образом, для крупных рек, расположенных в разных частях страны, характерна асинхронность в формировании максимальных расходов воды дождевых паводков, которая наименее выражена на Западной Двине и Днепре. Для рек с площадями водосборов менее 10 тыс. км<sup>2</sup> асинхронность выражена более значительно в сравнении с крупными реками. Величина асинхронности зависит от обеспеченности паводков. В среднем значения  $K_{ac}$  изменяются в пределах 0,8–1,2.

### **3.6 Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков**

Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков основано на построении матрицы парных коэффициентов корреляции, полученной в результате пространственного корреляционного анализа. Для проведения районирования отобраны 70 гидрометрических створов, расположенных в разных частях страны, для которых рассматривался единый период наблюдений с 1946 по 2010 гг.

Анализ матрицы парных коэффициентов корреляции между максимальными расходами воды дождевых паводков позволил разделить территорию страны на четыре района синхронных колебаний паводочного стока (рисунок 3.9).

Границы выделенных районов синхронных колебаний дождевого паводочного стока не совпадают с границами гидрологических районов Беларуси, т.к. в основу гидрологического районирования положен годовой сток, основная часть которого формируется весенним половодьем и подземным стоком. Главным же фактором формирования паводочного стока являются дожди, структура формирования которых определяется главным образом циклонической деятельностью.

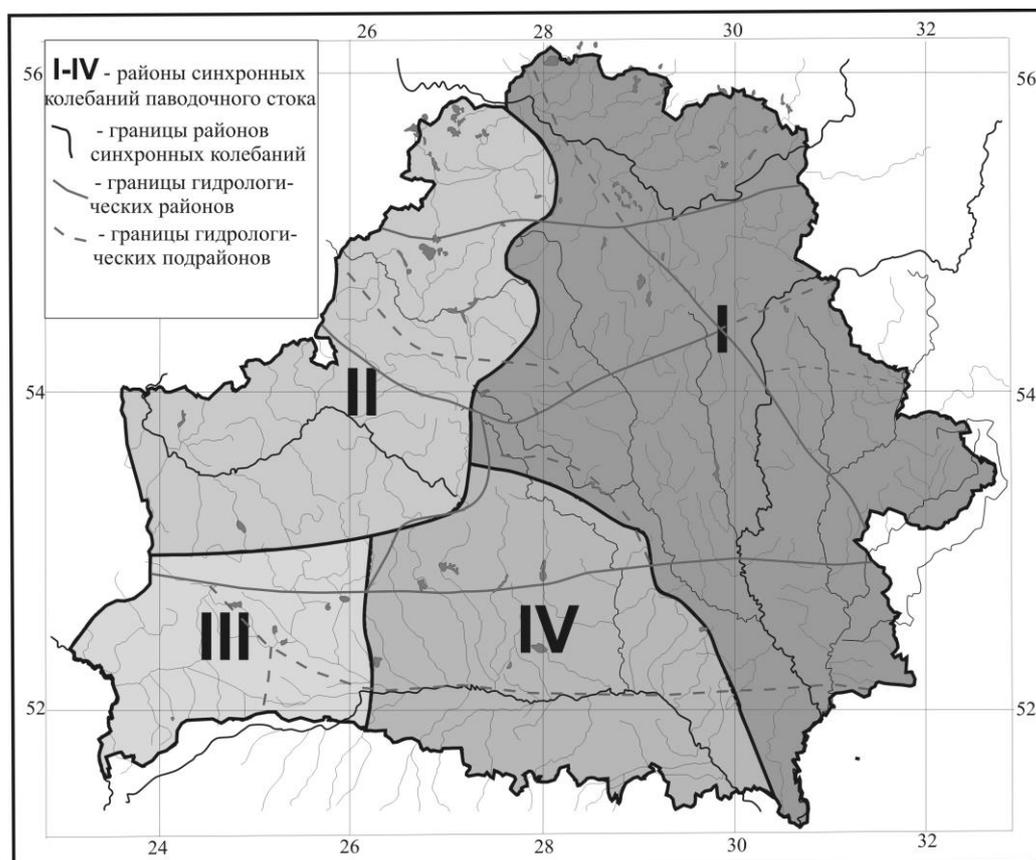


Рисунок 3.9 – Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков

Расход воды является обобщающим параметром, зависящим как от выпадающих атмосферных осадков, так и от гидрографических характеристик водосборов рек. Поэтому районирование территории по синхронности колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков в комплексе учитывает основные факторы, формирующие паводочный сток.

Для каждого из выделенных районов рассчитывались средние внутрирайонные коэффициенты корреляции, характеризующие внутрирайонную связь, а также средние межрайонные коэффициенты корреляции, характеризующие межрайонную связь (таблица 3.6).

Средние значения внутрирайонных коэффициентов корреляции изменяются от 0,68 до 0,76, что свидетельствует о высоком уровне синхронности колебаний максимальных расходов воды паводков для каждой группы выделенных в отдельный район створов. Средние значения межрайонных коэффициентов корреляции изменяются от 0,17 до 0,45 (таблица 3.6). Средняя ошибка внутрирайонных коэффициентов корреляции составляет  $\pm 0,06-0,08$ .

Таблица 3.6 – Средние внутрирайонные и межрайонные коэффициенты корреляции выделенных районов синхронных колебаний

№ района	I	II	III	IV
I	0,68	0,36	0,20	0,17
II		0,74	0,39	0,24
III			0,76	0,45
IV				0,74

Многолетние колебания максимальных расходов воды дождевых паводков в пределах выделенных районов имеют сходные тенденции и чередование периодов с повышенным и пониженным дождевым паводочным стоком.

Район I (Двинско-Днепровский) занимает северную и восточную части Беларуси, охватывает бассейны Западной Двины (без р. Дисна) и Днепра, а также верховье Птичи. Он имеет наибольшую связанность с районом II (межрайонный коэффициент корреляции 0,36), наименьшую – с районом IV (межрайонный коэффициент корреляции 0,17). Установлено, что на реках Двинско-Днепровского района в периоды потеплений климата, одно из которых известно как потепление Арктики (1910–1939), а другое – современное (с 1988 г.), – отмечался рост величины дождевых паводков. Периоды потепления сопровождались увеличением количества выпадающих осадков. Так, особенно много осадков выпадало в период с 1905 по 1935 г. Кроме того, территория района в основном соответствует зоне увеличения атмосферных осадков в современный период потепления климата. Для рек района наиболее выражена прямая связь величины дождевых паводков с количеством выпадающих осадков, что обусловлено, прежде всего, слабой инфильтрационной способностью почвогрунтов (тяжелых по механическому составу). Характерна также большая роль озерности водосборов в формировании максимальных расходов воды паводков. В период 1966–1987 гг. отмечалось снижение величины максимальных расходов воды паводков на большинстве рек района, связанное со снижением количества выпадающих атмосферных осадков.

*Район II* (Неманский) расположен на западе страны. Включает бассейн Немана с Вилией, а также р. Дисну. Район имеет максимальную связанность с районом III (межрайонный коэффициент корреляции составляет 0,39),

наименьшую – с IV. Реки Неманского района имеют резко выраженную тенденцию к снижению величины дождевых паводков за рассматриваемый период, особенно заметную с середины 1980-х гг.

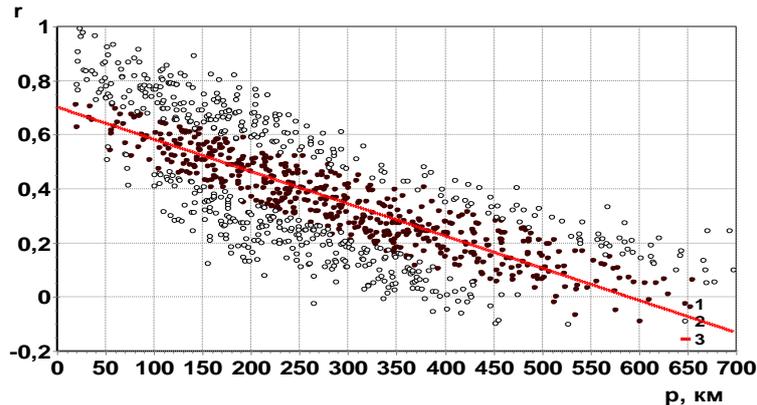
*Район III* (Бугский) расположен на юго-западе Беларуси. Включает бассейн Западного Буга, верховья Припяти и левых притоков Немана. К этому району отнесена р. Ясельда, многолетние колебания максимальных расходов воды паводков на которой оказались более синхронными с колебаниями максимальных расходов воды паводков рек бассейна Западного Буга, чем Припяти. Внутрирайонный коэффициент корреляции равен 0,76. На реках района, имеющих тенденцию к снижению максимальных расходов, в многолетнем ряду очень заметно выделяются большие дождевые паводки, которые наблюдались на всех реках района в 1970-е гг., и были вызваны выпадением больших сумм осадков. Район соответствует зоне уменьшения атмосферных осадков в современный период потепления климата.

*Район IV* (Припятский) находится на юге страны и охватывает бассейн Припяти. Поскольку условия формирования стока в верховье р. Птичь, расположенном на Минской возвышенности, отличаются от условий формирования стока в среднем и нижнем течении реки, расположенных на равнинах и низинах Предполесья и Полесья, оно было отнесено к району I. Кроме того, гидрологические посты, необходимые для более детального уточнения границ района, в верхнем течении Птичи отсутствуют. Район IV имеет максимальную связанность с районом III, с другими же районами связь наименьшая. Большое влияние на величину дождевых паводков на реках Припятского района оказало проведение крупномасштабной осушительной мелиорации, которая сопровождалась увеличением густоты речной сети за счет строительства мелиоративных каналов, что привело к увеличению скорости добега воды до речного русла. Наибольшие паводки на реках района отмечались в период 1966–1987 гг. Вследствие расположения на юге Беларуси и преобладания песчаных и супесчаных почвогрунтов велика роль потерь воды на инфильтрацию и испарение при формировании дождевых паводков.

Границы районов несут в себе некоторую условность, которая связана с характером пространственных изменений в колебаниях стока. Так, например, многолетние колебания максимальных расходов воды дождевых паводков двух водосборов, расположенных в разных районах, но близко друг от друга, могут иметь большую синхронность, чем многолетние колебания максимальных расходов воды паводков двух водосборов из одного района, но расположенных на большом расстоянии друг от друга. Кроме того, границы районов могут несколько изменяться от года к году, но для средних многолетних условий районы выделяются достаточно четко.

### Построение пространственно-корреляционных функций

Пространственно-корреляционная функция (ПКФ) построена по 2415 парным коэффициентам корреляции, полученным по 70 градациям наблюдений. Среднее число совместных лет наблюдений при расчете парных коэффициентов корреляции составляло не менее 25 лет. Оценка однородности ПКФ максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси показала, что рассматриваемая функция неоднородна, что отражено на рисунке 3.10.



- 1 – эмпирические коэффициенты парной корреляции в диапазоне  $\pm\sigma_z$ ;
- 2 – эмпирические коэффициенты парной корреляции в диапазоне  $\pm 2\sigma_z$ ;
- 3 – линия регрессии  $r = f(\rho)$

Рисунок 3.10 – ПКФ максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси

В связи с тем, что исходное поле оказалось неоднородным, оно было разбито на более мелкие районы. Для территории Беларуси выделено четыре однородных района, границы которых совпали с выделенными районами синхронных колебаний максимальных расходов воды паводков (рисунок 3.11).

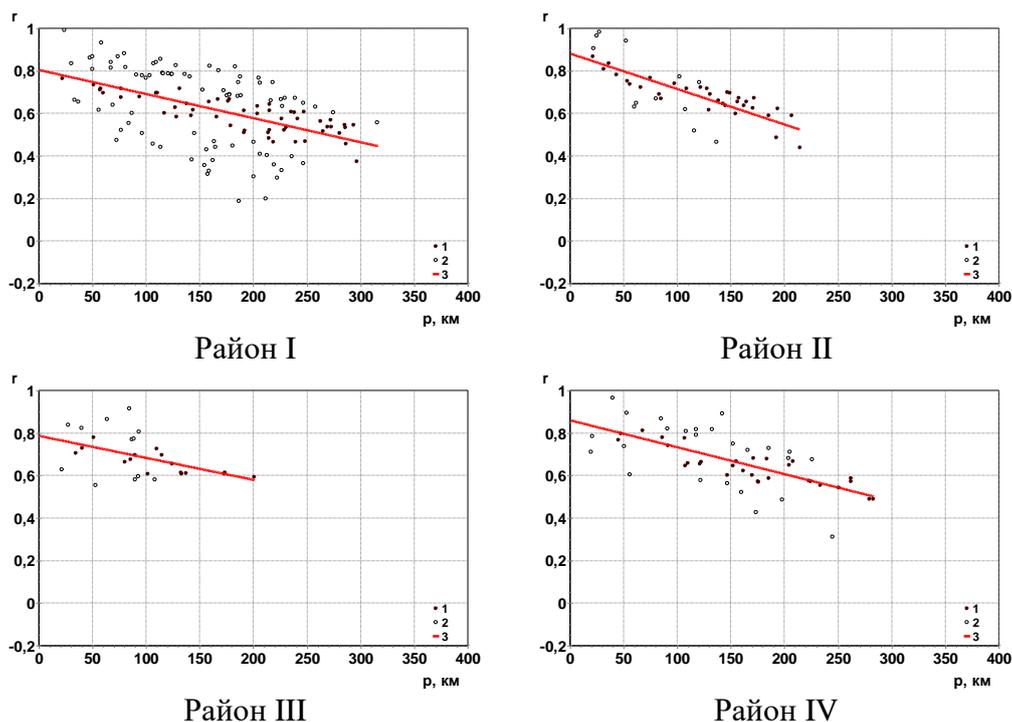
В результате проведенных исследований подтвердилась гипотеза о четырех однородных районах синхронных колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков для территории Беларуси.

Для выделенных районов получены зависимости  $r = f(\rho)$ , которые можно представить следующей формулой:

$$r = -\alpha \cdot \rho + \beta, \quad (3.2)$$

где  $\alpha, \beta$  – эмпирические коэффициенты, представленные в таблице 3.7.

Таким образом, выделено четыре района с однородными ПКФ, границы которых совпали с районами синхронных колебаний максимальных расходов воды паводков, для которых получены соответствующие зависимости  $r = f(\rho)$ .



1 – эмпирические коэффициенты парной корреляции в диапазоне  $\pm\sigma_z$ ;  
 2 – эмпирические коэффициенты парной корреляции в диапазоне  $\pm 2\sigma_z$ ;  
 3 – линия регрессии  $r = f(\rho)$

Рисунок 3.11 – ПКФ максимальных расходов воды дождевых паводков однородных районов Беларуси

Таблица 3.7 – Параметры уравнения (3.2)

Район	$\alpha \cdot 10^{-2}$	$\beta$	Коэффициент корреляции
I	0,113	0,804	0,51
II	0,167	0,881	0,77
III	0,103	0,786	0,47
IV	0,126	0,859	0,68

### 3.7 Зимние паводки на реках Беларуси

Современное потепление климата привело к тому, что зимы стали более теплыми, начало их сместилось на более ранние сроки, участились оттепели, нередко наблюдается выпадение осадков в виде дождя, значительно превышающих норму, отмечается повышенная увлажненность предшествующего осеннего сезона. Все это способствует формированию высоких зимних паводков на реках, что требует изучения особенностей их пространственно-временных колебаний.

Зимние паводки чаще отмечаются в западных и юго-западных районах Беларуси. Величина, интенсивность и продолжительность подъема воды в паводке зависят от запасов воды в снежном покрове, интенсивности

таяния снега, состояния погоды, степени увлажненности и глубины промерзания почвы. Когда снежная, с частыми оттепелями зима сменяется дождливой весной, зимний паводок переходит в весеннее половодье, как это было в 1990, 1992, 2000 гг. в южных районах страны.

На юге Беларуси зимние паводки нередко перерастают в наводнения. Так, выдающиеся зимние паводки, перешедшие в наводнения, были зимой 1974/75, 1980/81, 1998/99 гг., большие – зимой 1947/48, 1992/93, 1993/94, 1997/98 гг. [156]. Кроме бассейна Припяти, зимние паводки, хотя и меньших размеров, формируются на других реках Беларуси. Больше всего этому явлению подвержены бассейны Немана, Западного Буга, Днестра, Березины, Сожа.

### *Модули стока зимних паводков*

Максимальные расходы воды паводков зависят, прежде всего, от площади водосбора, поэтому для анализа распределения величины паводочного стока по территории рассчитывались модули максимальных расходов воды зимних паводков 10 %-ной обеспеченности, которые были картографированы (рисунок 3.12).

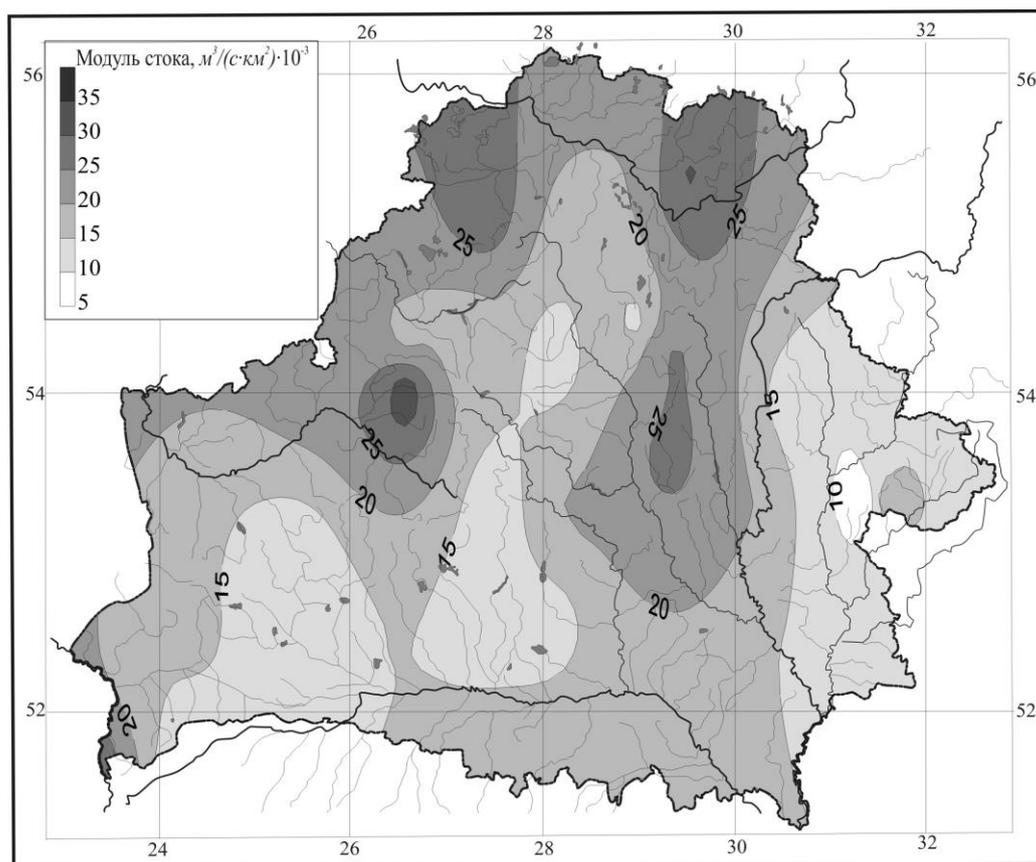


Рисунок 3.12 – Модули максимальных расходов воды зимних паводков 10 %-ной обеспеченности

Средние значения модулей максимальных расходов воды зимних паводков 10 %-ной обеспеченности на реках Беларуси составляют 15–20 л/(с·км<sup>2</sup>) (рисунок 3.12). Наименьшие они на левобережных притоках Днепра и Припяти (10–15 л/(с·км<sup>2</sup>)), наибольшие – в бассейне Западной Двины, на правобережных притоках Немана (25–30 л/(с·км<sup>2</sup>)).

Различия в величинах модулей максимальных расходов воды зимних паводков на разных реках страны обусловлены различием в подстилающих почвогрунтах, глубине их промерзания, структуре ландшафтов, величине атмосферных осадков и температурном режиме, геологической структуре. Так, водосборы рек Полесья представлены в основном песчаными почвогрунтами, которые хорошо впитывают талую воду. Кроме того, глубина промерзания почвогрунтов значительно меньше, чем на водосборах других рек страны, меньше также количество атмосферных осадков, больше частота оттепелей, что и влияет на величину зимних паводков. В бассейне Западной Двины, наоборот, формирование зимних паводков происходит в условиях более низких температур, большего количества осадков, меньшей частоты оттепелей, тяжелых по механическому составу почвогрунтов и др.

#### *Многолетние колебания максимальных расходов воды зимних паводков*

Для анализа имеющихся данных и выявления тенденций в их изменениях построены графики многолетних колебаний максимальных расходов воды зимних паводков за период инструментальных наблюдений на реках, расположенных в разных частях страны, на которых показаны линии трендов (рисунок 3.13). В таблице 3.8 приведены параметры линейных трендов рядов максимальных расходов воды зимних паводков рек Беларуси. Паводки, у которых начало наблюдалось в предыдущем году, а конец в последующем, относились к тому году, когда отмечался максимальный расход воды.

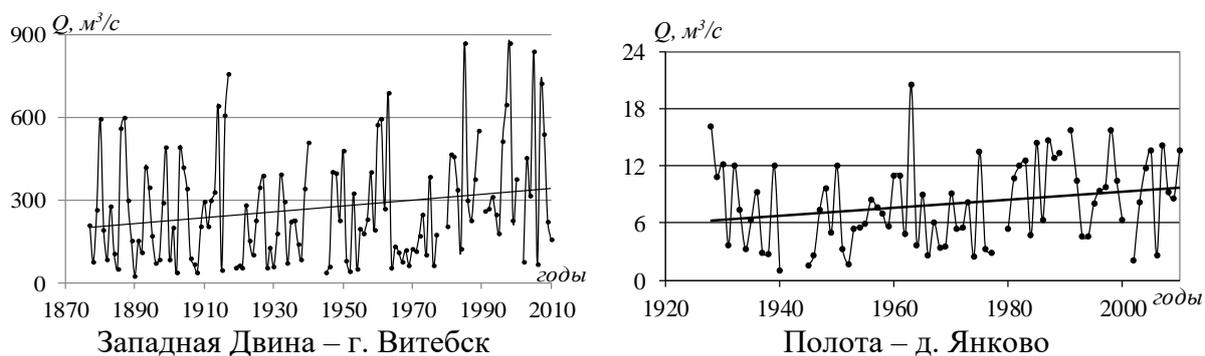


Рисунок 3.13 – Графики многолетних колебаний максимальных расходов воды зимних паводков рек Беларуси

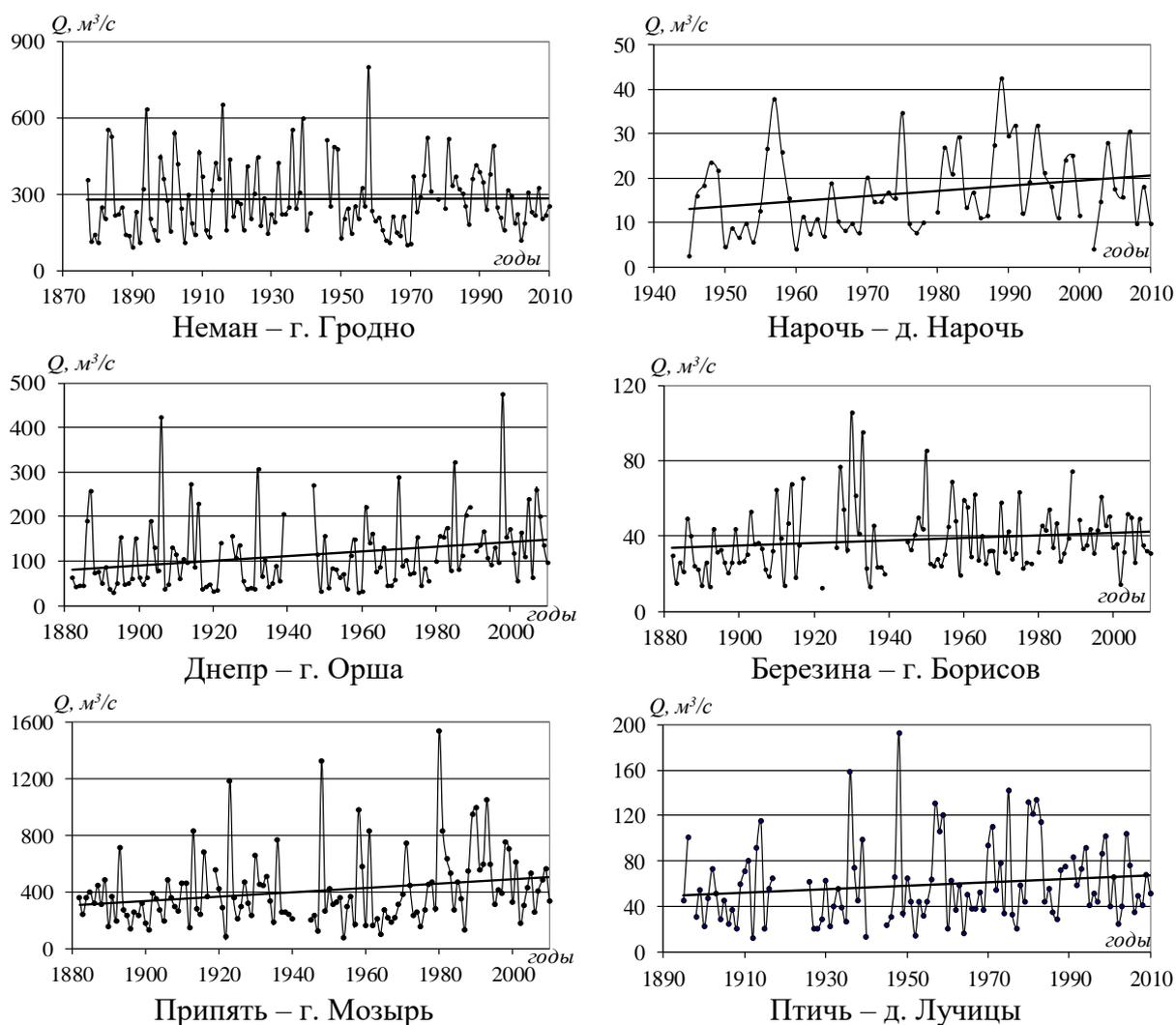


Рисунок 3.13. Окончание

Таблица 3.8 – Статистические параметры трендов максимальных расходов воды зимних паводков

Река – створ	Градиент изменения стока $\alpha$ , ( $\text{м}^3/\text{с}$ )/10 лет	Коэффициент корреляции $r$
Зап. Двина – г. Витебск	1,06	<b>0,21</b>
Полота – д. Янково	0,04	<b>0,23</b>
Неман – г. Гродно	0,03	0,01
Нарочь – д. Нарочь	0,12	<b>0,24</b>
Днепр – г. Орша	0,51	<b>0,25</b>
Березина – г. Борисов	0,07	0,15
Припять – г. Мозырь	1,50	<b>0,23</b>
Птичь – д. Лучицы	0,15	0,15

Примечание – Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции на 5 %-ном уровне значимости

На р. Западная Двина – г. Витебск наибольшие зимние паводки по величине максимального расхода за период инструментальных наблюдений отмечались в период после 1980 г. (1985, 1998, 2005 гг.). Значительные зимние паводки были также в 1880, 1887, 1914, 1916, 1917, 1961, 1963, 2007 гг. В период с середины 60-х до начала 80-х гг. XX в. больших зимних паводков практически не наблюдалось.

На притоках Западной Двины большие паводки отмечались в 1963, 1975, 1989, 1991, 1998, 2007 гг. На реках Полота, Эса, Кривинка наибольший зимний паводок за период инструментальных наблюдений был в 1963 г., на реках Улла, Дисна, Березовка – в 1989 г. В целом на всех реках бассейна Западной Двины наблюдается тенденция к росту максимальных расходов воды зимних паводков за период инструментальных наблюдений.

Наибольшие зимние паводки на р. Неман – г. Гродно зафиксированы в 1894, 1916, 1939, 1958 гг., несколько меньшие – в 1883, 1884, 1902, 1936, 1946, 1975, 1981 и 1994 гг. После 1994 г. крупных зимних паводков на р. Неман – г. Гродно не наблюдалось. На притоках Немана (рр. Исlochь, Гавья, Дитва, Вилия, Нарочь) отмечается тенденция к росту максимальных расходов воды зимних паводков за период инструментальных наблюдений. Наибольшие паводки наблюдались в 1975, 1989, 1993, 1994, 2004 гг. Противоположная картина наблюдается на реках Неман – г. Столбцы и Вилия – г. Вилейка. На некоторых реках (Котра – Сахкомбинат, Свисlochь – д. Сухая Долина, Неман – г. Гродно) сдвигов в величине максимальных расходов воды зимних паводков в ту либо иную сторону не отмечается. 1960-е гг. характеризуются наименьшими величинами зимних паводков.

На Днепре (створы гг. Орша и Могилев) наибольший зимний паводок за период инструментальных наблюдений зафиксирован в 1998 г. Крупные зимние паводки были также в 1906, 1932, 1970, 1985 гг. В конце XIX в., а также в 20-е и 50–60-е гг. XX в. больших зимних паводков не отмечалось. На Днепре в створе г. Речица наибольшие зимние паводки зафиксированы в 1910, 1981, 1991, 2009 гг., в створе г. Могилев – в 1933, 1934, 1947, 1985, 1998 и 2007 гг. В целом на Днепре наблюдается тенденция к росту величины зимних паводков.

Наибольшие зимние паводки на р. Сож – г. Гомель были в 1939, 1948, 1975, 1985, 1998 и 2001 гг.; на Березине – в 1930 и 1933 гг. В последние десятилетия таких больших зимних паводков не наблюдалось, однако в среднем величина их выросла.

Таким образом, на Днепре и практически всех его притоках отмечается тенденция к росту максимальных расходов воды зимних паводков за период инструментальных наблюдений.

Аналогичная ситуация и в бассейне Припяти. Наибольшие зимние паводки в створе г. Мозырь отмечались в 1923, 1948 и 1980 гг., несколько меньшие – в 1958, 1989, 1990, 1993 и 1998 гг. На реках Птичь – д. Лучицы и Оресса – д. Андреевка наибольшие зимние паводки по величине максимального расхода зафиксированы в 1936 и 1948 гг. Значительные по своей величине паводки формировались в 1957–1959, 1975, 1980–1982 гг. На р. Оресса в 1994, 1998 и 2004 гг. отмечались большие зимние паводки (соответствуют 4–10 %-ной обеспеченности).

На правобережных притоках Припяти (рр. Горынь, Уборть, Словечна, Чертедь) большие паводки также были в 1948, 1975, 1982, 1998 гг. На реках Чертедь и Уборть отмечается тенденция к некоторому снижению максимумов зимних паводков.

На рр. Цна – д. Дятловичи и Случь – д. Ленин, имеющих более короткий период инструментальных наблюдений, также наблюдается рост величины максимальных расходов воды зимних паводков. Наибольшие зимние паводки здесь отмечались (как и на большинстве рек бассейна Припяти) в 1975, 1981, 1990, 1994 и 1998 гг.

Период с 1960 до середины 1970-х гг. в бассейне Припяти характеризуется наименьшими зимними паводками на всех реках.

Иная картина изменений наблюдается на реках бассейна Западного Буга. Наибольшие зимние паводки здесь отмечены в 1958, 1971, 1975, 1982 гг. С середины 1980-х гг. произошло резкое снижение максимумов зимних паводков.

В приложении Д приведены годы с зимними паводками различной обеспеченности на некоторых реках Беларуси. Анализ таблицы Д.1 (приложение Д) показывает, что в наступлении высоких зимних паводков в основном существует синхронность по территории Беларуси, однако величина их может быть различной. Высокие зимние паводки на большинстве рек страны наблюдались в 1948, 1975, 1989, 1998 гг. Зимний паводок 1948 г. по величине максимального расхода воды на некоторых реках Полесья (Уза, Птичь, Горынь, Чертедь) был наибольшим за весь период инструментальных наблюдений. В бассейне же Немана его обеспеченность составляла около 15 %, Западной Двины – 20 %.

Паводок 1975 г. максимальным за весь период наблюдений был на р. Сож – г. Гомель, на остальных реках его величина соответствует в среднем 5–10 %-ной обеспеченности, в бассейне Западной Двины – до 15 %. Зимний паводок 1998 г. максимальным был на реках Днепр (гг. Орша и Могилев) и Западная Двина (гг. Витебск и Полоцк). На реках бассейна Немана и Западного Буга величина паводка 1998 г. соответствует лишь 20–30 %-ной обеспеченности, в бассейне Припяти – около 10 %.

Нередко наблюдается и асинхронность в формировании высоких зим-

них паводков. Так, в бассейне Западной Двины высокие зимние паводки наблюдались в 1963 и 1985 гг., в бассейне Немана – в 1994 г., в бассейнах Днепра и Припяти – зимой 1980–1981 гг., при этом на остальных реках страны величина этих паводков была средней.

#### *Оценка изменений максимальных расходов воды зимних паводков*

Результаты количественной оценки характера изменений величины максимальных расходов воды зимних паводков за различные периоды представлены на рисунках 3.14 и 3.15. При этом так же, как и для дождевых паводков, оценивалось влияние двух факторов. Первый фактор – антропогенное влияние крупномасштабных мелиораций (периоды от начала наблюдений до 1965 г. и 1966–2010 гг.). Второй фактор – влияние современных климатических изменений (периоды 1966–1987 и 1988–2010 гг.).

На большинстве рек Беларуси в период 1966–2010 гг. по сравнению с периодом от начала инструментальных наблюдений до 1965 г. величина максимальных расходов зимних паводков существенно не изменилась (рисунок 3.14). Увеличение на 10–20 % характерно для рек бассейнов Западной Двины, Днепра и Припяти.

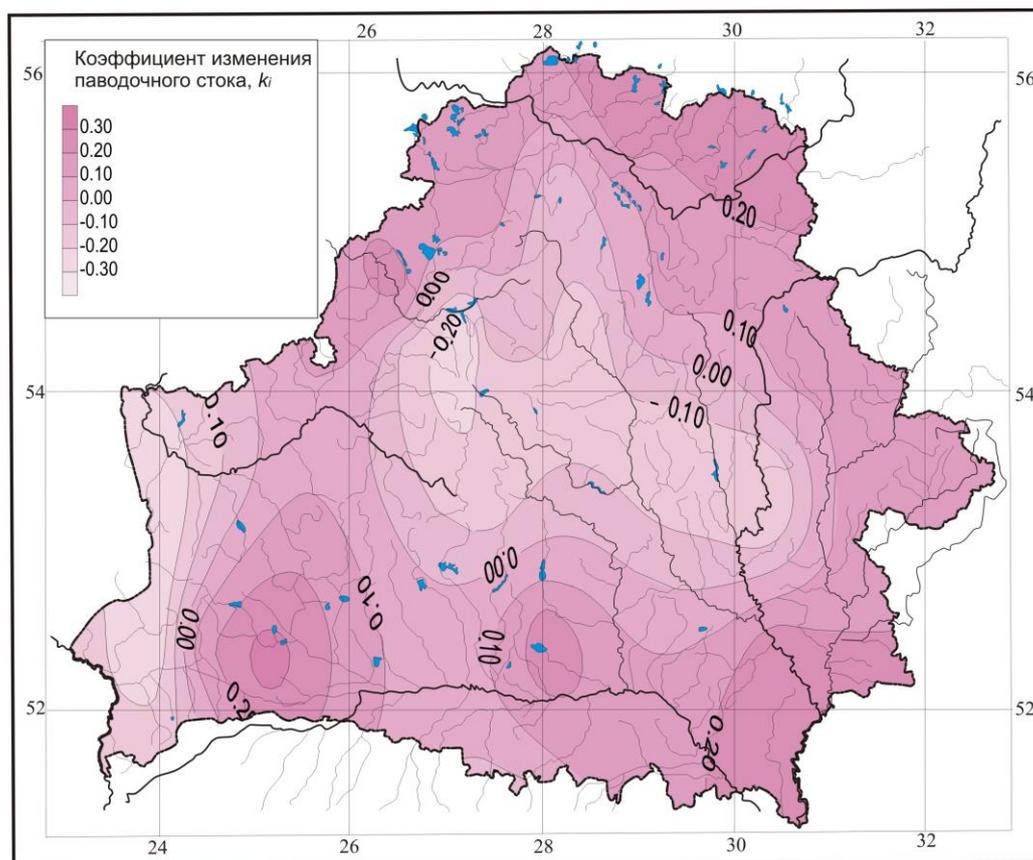


Рисунок 3.14 – Пространственная структура изменения максимальных расходов воды зимних паводков за период 1966–2010 гг. по сравнению с периодом до 1965 г.

В период современного потепления климата (1988–2010) по сравнению с предшествующим периодом (1966–1987) на большинстве рек Беларуси отмечается рост величины максимальных расходов воды зимних паводков, который составил от 10–20 % в бассейне Припяти до 20–40 % в бассейне Западной Двины (рисунок 3.15). В бассейнах Немана и Днепра величина зимних паводков увеличилась менее существенно (около 10 %). Уменьшение величины зимних паводков на 20–40 % во второй период по сравнению с первым отмечается на реках бассейна Западного Буга, где наибольшие зимние паводки отмечались в период 1970-х – первой половины 1980-х гг.

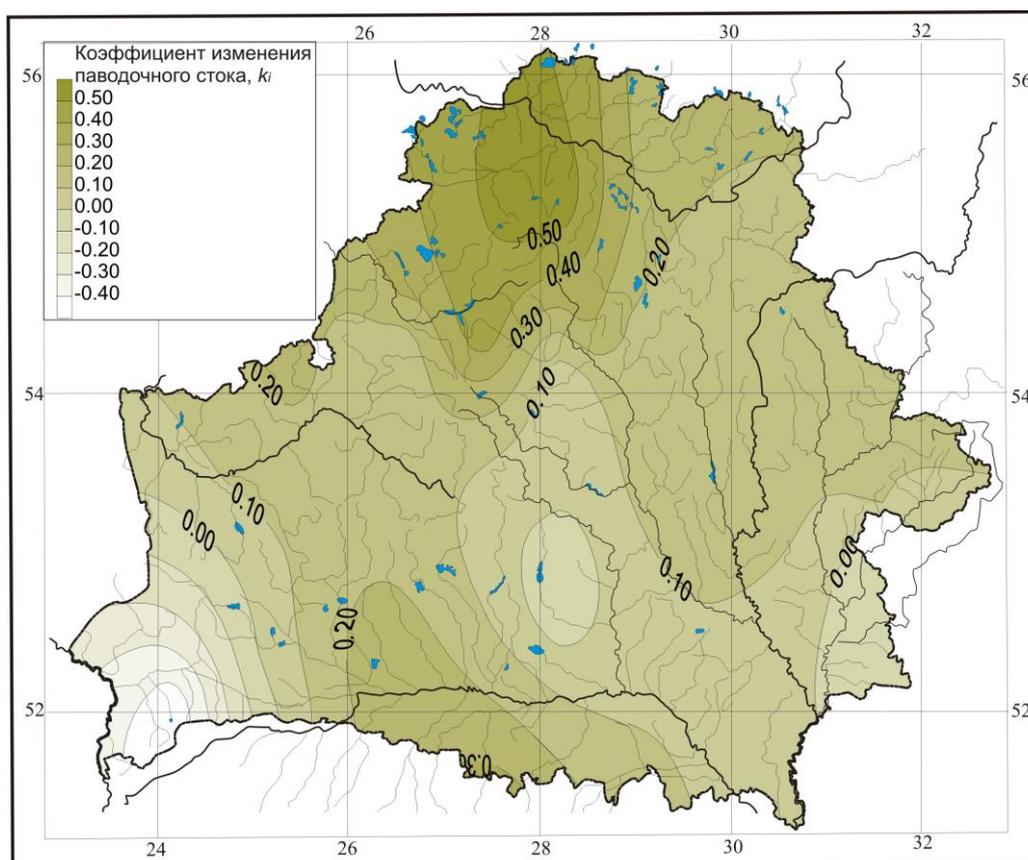


Рисунок 3.15 – Пространственная структура изменения максимальных расходов воды зимних паводков за период 1988–2010 гг. по сравнению с периодом 1966–1987 гг.

Таким образом, на большинстве рек Беларуси отмечается рост величины максимальных расходов воды зимних паводков в современный период потепления климата. При этом их абсолютная величина существенно не увеличилась по сравнению с более ранними периодами в связи с увеличением их частоты, поскольку нередко за зиму отмечается несколько паводков, что снижает величину их максимального расхода. Заметный рост на 20–40 % величины максимальных расходов воды зимних

паводков в бассейне Западной Двины в период современного потепления климата связан с тем, что ранее зимние паводки здесь отмечались реже, чем на других реках страны (зимы на севере Беларуси наиболее холодные и наступают раньше, глубина промерзания почв и запасы воды в снеге наибольшие), поэтому влияние потепления климата здесь наиболее ощутимо по сравнению с другими районами Беларуси.

*Роль типов циркуляции атмосферы в формировании зимних паводков*

В таблице 3.9 представлены основные статистические параметры временных рядов максимальных расходов воды зимних паводков для периодов с разными типами циркуляции атмосферы (*W* – западный, *E* – восточный, *C* – меридиональный).

Таблица 3.9 – Статистические параметры временных рядов максимальных расходов воды зимних паводков для периодов с разными типами циркуляции атмосферы

Река – створ	Период	<i>n</i>	Тип циркуляции атмосферы	Число паводков <i>P</i> < 25 %	$Q_{cp}$ , м <sup>3</sup> /с	$C_v$	$r(I)$
Зап. Двина – г. Витебск	1877–1890	14	C	3	250	0,77	0,20
	1891–1928	38	W	8	243	0,76	0,20
	1929–1939	11	E	1	195	0,55	0,02
	1940–1948	5	C	3	281	0,69	–
	1949–1970	22	E+C	5	237	0,80	0,15
	1971–1995	25	E	6	293	0,60	–0,06
	1996–2010	15	W	7	431	0,60	–0,26
	Весь период	130	–	33	270	0,74	–0,05
Неман – г. Гродно	1877–1890	14	C	2	237	0,60	0,42
	1891–1928	38	W	13	294	0,48	–0,09
	1929–1939	11	E	3	308	0,46	–0,08
	1940–1948	5	C	2	330	0,44	–
	1949–1970	22	E+C	2	228	0,66	0,10
	1971–1995	25	E	10	339	0,26	–0,03
	1996–2010	15	W	0	223	0,27	–0,06
	Весь период	130	–	32	280	0,48	0,13
Днепр – г. Орша	1882–1890	9	C	2	93,7	0,86	0,33
	1891–1928	38	W	6	101	0,78	–0,09
	1929–1939	11	E	2	94,6	0,87	–0,21
	1940–1948	2	C	1	–	–	–
	1949–1970	22	E+C	4	98,1	0,67	–0,10
	1971–1995	25	E	8	127	0,49	–0,04
	1996–2010	15	W	7	162	0,69	–0,30
	Весь период	122	–	30	114	0,71	–0,18

Продолжение таблицы 3.9

Березина – г. Борисов	1882–1890	9	C	1	27,0	0,40	0,19
	1891–1928	31	W	7	35,9	0,47	–0,01
	1929–1939	11	E	3	44,3	0,67	0,06
	1940–1948	4	C	1	40,3	–	–
	1949–1970	22	E+C	7	40,3	0,44	–0,06
	1971–1995	25	E	5	38,7	0,32	–0,13
	1996–2010	15	W	5	39,4	0,29	0,17
	Весь период	117	–	29	38,0	0,45	0,01
Сож – г. Гомель	1901–1928	28	W	2	154	0,41	0,24
	1929–1939	11	E	3	196	0,43	–0,21
	1940–1948	3	C	2	242	–	–
	1949–1970	22	E+C	3	142	0,46	0,13
	1971–1995	25	E	9	208	0,36	–0,17
	1996–2010	15	W	6	208	0,31	–0,11
	Весь период	104	–	25	179	0,43	–0,10
Припять – г. Мозырь	1882–1890	9	C	1	345	0,28	–0,69
	1891–1928	38	W	6	362	0,59	–0,22
	1929–1939	11	E	3	397	0,46	–0,32
	1940–1948	5	C	1	421	1,08	–
	1949–1970	22	E+C	3	330	0,65	–0,06
	1971–1995	25	E	12	548	0,59	0,30
	1996–2010	15	W	6	448	0,35	–0,03
	Весь период	125	–	32	408	0,62	–0,11
Птичь – д. Лучицы	1895–1928	26	W	4	50,2	0,54	–0,06
	1929–1939	11	E	3	59,3	0,65	–0,08
	1940–1948	5	C	1	65,2	–	–
	1949–1970	22	E+C	4	54,8	0,57	0,29
	1971–1995	25	E	10	72,3	0,50	0,15
	1996–2010	15	W	4	58,6	0,40	0,00
	Весь период	104	–	26	59,3	0,59	0,02

На р. Западная Двина – г. Витебск зимние паводки наибольшей величины отмечались в период 1996–2010 гг., который соответствует западной форме циркуляции атмосферы (*W*).

Наибольшие зимние паводки на реках водосбора Немана были в периоды 1971–1995 гг. и 1929–1939 гг., соответствующие восточной форме циркуляции атмосферы (*E*).

На реках бассейна Днепра наибольшая средняя величина максимальных расходов воды зимних паводков характерна для периода 1996–2010 гг. с преобладанием западной формы циркуляции атмосферы (*W*), на р. Березина – г. Борисов – еще и в период 1929–1939 гг., соответствующий восточной форме циркуляции (*E*).

В бассейне Припяти зимние паводки наибольшей величины наблюдались в период 1971–1995 гг. с восточным типом циркуляции атмосферы (*E*).

Таким образом, на большинстве рек Беларуси наибольшие зимние паводки (как и дождевые) зафиксированы в периоды с восточным и западным типами циркуляции атмосферы. Период 1940–1948 гг. с господством меридиональных процессов (С) также имеет высокие значения максимальных расходов воды зимних паводков, однако он недостаточно репрезентативен из-за своей малой продолжительности (от 2 до 5 лет) вследствие отсутствия наблюдений в военные годы. Период 1949–1970 гг. с комбинированным восточно-меридиональным ( $E+C$ ) типом циркуляции характеризуется наименьшими зимними паводками (исключение – бассейн Днепра).

## ГЛАВА 4

### МАКСИМАЛЬНЫЙ СТОК ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

Максимальные расходы воды рек – наибольшие в году значения мгновенных или срочных расходов, наблюдаемые во время весенних половодий или дождевых паводков. На малых водотоках со значительным внутрисуточным изменением уровней и расходов, особенно в период дождевых паводков, пик паводка может пройти между установленными сроками наблюдений. Поэтому срочные максимальные расходы бывают меньше мгновенных. В свою очередь средний суточный максимум меньше срочного. Эта разница бывает значительной на малых водотоках и уменьшается с возрастанием площади водосбора реки. Расчетными являются мгновенные максимальные расходы воды.

Расчеты максимальных расходов воды являются обязательными и считаются одной из наиболее ответственных задач в составе водохозяйственных проектов. Они являются также обязательными и при проектировании и эксплуатации мелиоративных систем, автомобильных и железных дорог, нефте- и газопроводов, оценке водных ресурсов. Именно на мгновенные максимальные расходы воды рассчитываются размеры различного рода водопропускных отверстий, отметки дорожных насыпей, оградительных дамб и других сооружений.

От объективного определения максимальных расходов воды зависят параметры гидротехнических сооружений и их стоимость. Занижение максимальных расходов приводит к разрушению сооружений, затоплению прилегающей к реке местности, материальному ущербу и человеческим жертвам. Завышения максимальных расходов повышают общую стоимость сооружения, что снижает его экономическую эффективность. Когда же напор на сооружения значительный, а нижележащая местность заселена, выбор максимального расхода воды выходит из рамок экономии и перерастает в проблему безопасности людей. В мировой гидротехнической практике известно немало случаев, когда ошибка при установлении расчетного максимума являлась причиной разрушения плотин, дамб, мостов, дорог, огромного материального ущерба и гибели людей.

Сочетание требований безопасности работы сооружения и его стоимости, от которых зависит общая экономическая эффективность сооружения, достигается применением принципа вероятностного расчета, основанного, с одной стороны, на учете условий формирования наиболее высокого максимального расхода с точки зрения гидрологического режима реки и, с другой стороны, на учете вероятности превышения этой величины.

Расчетная ежегодная вероятность превышения (обеспеченность) максимальных расходов воды устанавливается нормативными документами

в зависимости от рода сооружений, класса их капитальности и условий эксплуатации. Для практических целей, прежде всего, необходимо знать высокие и редко повторяющиеся максимальные расходы. Такие максимумы зачастую не представлены материалами гидрологических наблюдений. Поэтому при расчетах максимальных расходов особую ценность приобретают сведения о катастрофических наводнениях, наблюдавшихся в рассматриваемом районе, которые являются выдающимися по величине и редкими по повторяемости. Некоторые из таких сведений можно получить в специальных исследованиях, например в исследованиях Б.Д. Зайкова, Г.И. Швеца [70; 166] и др.

#### 4.1 Методы расчета максимального дождевого стока при отсутствии данных наблюдений

Методы определения расчетных характеристик максимального стока дождевых паводков при отсутствии или недостаточности данных гидрологических наблюдений подразделяют на две группы:

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

При выборе рек-аналогов необходимо учитывать следующие требования:

- однотипность стока реки-аналога и исследуемой реки;
- возможную географическую близость расположения водосборов;
- площади водосборов не должны различаться более чем в 10 раз, а при проектировании объектов мелиоративного строительства и мелких прудов – более чем в 20 раз;
- однородность условий формирования стока, сходство климатических условий, однотипность почв и гидрогеологических условий, близкую степень озерности, залесенности, заболоченности и распаханности водосборов;
- отсутствие факторов, существенно искажающих естественный речной сток (регулирование стока, сбросы и изъятие воды);
- соблюдение условия:

$$\frac{L}{A^{0,56}} \approx \frac{L_a}{A_a^{0,56}}, \quad (4.1)$$

$$i \cdot A^{0,50} \approx i_a \cdot A_a^{0,50}, \quad (4.2)$$

где  $L$  и  $L_a$  – длина исследуемой реки и реки-аналога соответственно, км;  $i$  и  $i_a$  – уклон водной поверхности исследуемой реки и реки-аналога, ‰;  $A$  и  $A_a$  – площади водосборов исследуемой реки и реки-аналога, км<sup>2</sup>.

При определении расчетных максимальных расходов воды паводков для рек с продолжительностью стояния максимальных расходов воды сутки и более расчет производится по средним суточным значениям, менее суток –

по мгновенным расходам воды. При прохождении максимального расхода между сроками наблюдений его значение определяют на основе установления соотношения между мгновенными и среднесуточными его значениями по данным измерений других лет с наибольшими расходами воды или по данным рек-аналогов.

Согласно действующим нормативным документам [124] выбор типа расчетной формулы для определения максимального срочного расхода воды дождевого паводка заданной вероятности превышения  $Q_{p\%}$  следует производить согласно таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Условия применения расчетных формул по определению максимального расхода воды дождевого паводка заданной обеспеченности

Тип расчетной формулы	Расчетная формула	Площадь водосбора реки	Учитываемые характеристики бассейна	Методические возможности расчетной формулы
I	Эмпирическая редуцированная формула (4.3) при наличии реки-аналога	$A > 50 \text{ км}^2$	Гидрографические характеристики русла, озерность, заболоченность, средняя высота водосбора	Расчет $Q_{max,P\%}$ без учета вероятных календарных сроков его прохождения
II	Эмпирическая редуцированная формула (4.11) при отсутствии реки-аналога	$A > 0 \text{ км}^2$	То же	То же
III	Формула предельной интенсивности стока (4.13): – при наличии реки-аналога; – при отсутствии реки-аналога	$A < 50 \text{ км}^2$	Гидрографические характеристики русла и водосбора, озерность, тип и механический состав почв водосбора, наибольший суточный максимум осадков в году, интенсивность осадков	То же
IV	Объемные, генетические и другие формулы, основанные на расчете стока по осадкам, в том числе через индексы предшествующего увлажнения	$A > 0 \text{ км}^2$	Гидрографические характеристики русла и водосбора, озерность, заболоченность, инфильтрационные свойства почв, уровень подземных вод, стокоформирующие осадки, показатель увлажнения почв	Расчет $Q_{max,P\%}$ с учетом календарных сроков летне-осеннего сезона и имеющихся представлений о формировании потерь стока

**Расчетная формула типа I** (редукционная) для определения максимального срочного расхода воды дождевого паводка  $Q_{P\%}$ , м<sup>3</sup>/с при наличии одной или нескольких рек-аналогов имеет вид:

$$Q_{P\%} = q_{P\%a} \cdot \varphi_M \cdot \frac{\delta \cdot \delta_2}{\delta_a \cdot \delta_{2a}} \cdot A, \quad (4.3)$$

где  $q_{P\%a}$  – модуль максимального срочного расхода воды реки-аналога расчетной вероятности превышения  $P$  (%), м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>); рассчитывают по формуле:

$$q_{P\%,a} = \frac{Q_{P\%,a}}{A_a}, \quad (4.4)$$

где  $Q_{P\%,a}$  – максимальный расход воды дождевого паводка вероятности превышения  $P\%$ , м<sup>3</sup>/с;  $A_a$  – площадь водосбора реки-аналога, км<sup>2</sup>;  $\varphi_M$  – коэффициент, учитывающий редукцию максимального модуля стока дождевого паводка  $q_{1\%}$  с увеличением площади водосбора  $A$ , км<sup>2</sup>; рассчитывают в зависимости от значения коэффициента  $k_\Phi$ , представляющего соотношение коэффициентов формы водосбора исследуемой реки и реки-аналога:

$$k_\Phi \approx \frac{L \cdot A_a^{0,56}}{A^{0,56} \cdot L_a}, \quad (4.5)$$

где  $L$  и  $L_a$  – длина водотока для исследуемой реки и реки-аналога соответственно, км;  $A$  и  $A_a$  – площадь водосбора для исследуемой реки и реки-аналога соответственно, км<sup>2</sup>.

Значение коэффициента  $\varphi_M$  определяют по формуле:

$$\varphi_M = \begin{cases} \left(\frac{A_a}{A}\right)^n & \text{при } k_\Phi \leq 1,5; \\ \left(\frac{\Phi_a}{\Phi}\right)^{n_1} & \text{при } k_\Phi > 1,5, \end{cases} \quad (4.6)$$

где  $\Phi$  и  $\Phi_a$  – гидроморфометрический параметр русла для исследуемой реки и реки-аналога соответственно; определяют по формуле:

$$\Phi = \frac{1000 \cdot L}{m_p \cdot i_p^{1/3} \cdot A^{1/4}}, \quad (4.7)$$

где  $L$  и  $A$  – то же, что в формуле (4.5);  $m_p$  – гидравлический параметр, характеризующий состояние и шероховатость русла водотока; определяют по таблице 4.2,  $i_p$  – средневзвешенный уклон русла водотока, ‰;  $n$  и  $n_1$  – степенные коэффициенты, отражающие редукцию максимального модуля стока дождевого паводка  $q_{1\%}$  с увеличением площади водосбора  $A$ , км<sup>2</sup>; приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.2 – Гидравлический параметр, характеризующий состояние и шероховатость русла водотока  $m_p$

Характеристики русл и пойм	$m_p$ , м/мин
Чистые русла постоянных равнинных рек; русла периодически пересыхающих водотоков	11
Извилистые, частично заросшие русла больших и средних рек; периодически пересыхающие водотоки, несущие во время паводка большое количество наносов	9
Сильно засоренные и извилистые русла периодически пересыхающих водотоков	7

Таблица 4.3 – Коэффициенты редукции модуля максимального расхода воды  $n$  и  $n_1$

Водосборы рек	Значения коэффициентов	
	$n$	$n_1$
Западной Двины, Немана, левобережных притоков Припяти, Западного Буга	0,22	0,60
Березины, Днестра, Сожа	0,30	0,80
Правобережных притоков Припяти	0,50	1,10

$\delta$ ,  $\delta_a$  – коэффициенты, учитывающие снижение максимальных расходов воды проточными озерами; определяются по формуле (4.8) при  $c = 0,2$ , при наличии сведений только об относительной озерности  $c = 0,11$ .

$$\delta = \frac{1}{1 + c \cdot A_{оз}}, \quad (4.8)$$

где  $c$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от среднего многолетнего слоя дождевого паводка  $h_0$ . При  $h_0 \geq 100$  мм,  $c = 0,2$ ; при  $h_0 = 50$  мм,  $c = 0,3$ ; при  $h_0$ , изменяющемся от 100 до 50 мм,  $c$  находят интерполяцией;  $A_{оз}$  – средневзвешенная озерность водосбора, %, определяется по формуле:

$$A_{оз} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot A_i}{A^2} \cdot 100, \quad (4.9)$$

где  $S_i$  – площади зеркал озер, км<sup>2</sup>;  $A_i$  – площади водосборов озер, км<sup>2</sup>;  $A$  – площадь водосбора до расчетного створа реки, км<sup>2</sup>.

$\delta_2$ ,  $\delta_{2a}$  – коэффициенты, учитывающие снижение максимального расхода воды вследствие заболоченности водосбора; определяются как:

$$\delta_2 = 1 - \beta \cdot \lg(0,1 \cdot A_б + 1), \quad (4.10)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий тип болот и преобладающий механический состав почв (грунтов) вокруг болота и заболоченных земель; приведен в таблице 4.4;  $A_б$  – заболоченность водосбора, %.

Таблица 4.4 – Значения параметра  $\beta$

Типы болот и почв (грунтов) на их водосборах	$\beta$
Низинные болота и заболоченные леса и луга на водосборах, сложенных супесчаными и легкосуглинистыми почвами (грунтами)	0,8
Болота разных типов на водосборе	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

При заболоченности менее 3 % или проточной средневзвешенной озерности более 6 % коэффициент  $\delta_2$  принимают равным единице.

При невозможности подобрать реку-аналог, максимальные мгновенные расходы воды дождевых паводков  $Q_p$ , м<sup>3</sup>/с, 10 %-ной обеспеченности определяются по **формуле типа II**, которая имеет вид:

$$Q_p = \frac{q_{10\%} \cdot \delta \cdot \lambda_{P\%}}{\Phi^{0,8}} \cdot A, \quad (4.11)$$

где  $q_{10\%}$  – модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения  $P = 10$  %, определяется интерполяцией между данными наблюдений соседних гидрологически изученных рек в исследуемом районе или по карте (рисунок 1.5);  $\Phi$  – гидроморфометрический параметр русла; определяется по формуле (4.7);  $A$  – то же, что в формуле (4.5);  $\delta$  – то же, что в формуле (4.3);  $\lambda_{P\%}$  – переходный коэффициент от максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятности превышения  $P = 10$  % к значениям другой вероятности превышения  $P < 25$  %; назначают по данным гидрологически изученных рек в исследуемом районе на основе установления соотношения (4.12) или по значениям, приведенным в таблице 4.5.

$$\lambda_{P\%} = \frac{Q_{P\%}}{Q_{10\%}}. \quad (4.12)$$

Таблица 4.5 – Переходный коэффициент  $\lambda_{P\%}$

Бассейн реки	Переходный коэффициент $\lambda_{P\%}$ при обеспеченности $P$ (%), равной					
	1	2	3	5	10	25
Западной Двины	1,88	1,62	1,48	1,35	1	0,60
Немана	2,04	1,63	1,48	1,30	1	0,70
Днепра	2,74	2,06	1,77	1,52	1	0,65
Припяти и Западного Буга	2,10	1,88	1,63	1,33	1	0,60
Все реки Беларуси	2,16	1,81	1,60	1,39	1	0,65

**Расчетная формула типа III** для определения максимального мгновенного расхода воды дождевого паводка  $Q_{P\%}$ , м<sup>3</sup>/с на водосборах площадью менее 50 км<sup>2</sup> имеет вид:

$$Q_{P\%} = q'_{1\%} \cdot \varphi \cdot H'_{1\%} \cdot \delta \cdot \lambda_{P\%} \cdot A, \quad (4.13)$$

где  $q'_{1\%}$  – относительный модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения  $P = 1\%$ , м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>), представляющий отношение

$$q'_{1\%} = \frac{q_{1\%}}{\varphi \cdot H'_{1\%}}; \quad (4.14)$$

определяют для исследуемого района в зависимости от гидроморфометрического параметра русла  $\Phi_P$ , рассчитываемого по формуле (4.15), и продолжительности склонового добегания  $\tau_{ск}$ , мин по данным таблицы 4.6.

$$\Phi_P = \frac{1000 \cdot L}{m_p \cdot i_p^{1/3} \cdot A^{1/4} \cdot (\varphi \cdot H'_{1\%})^{1/4}}, \quad (4.15)$$

где  $m_p$ ,  $i_p$ ,  $A$  – то же, что в формуле (4.7);  $H'_{1\%}$  – максимальный суточный слой осадков вероятностью превышения  $P = 1\%$ , мм; определяют по данным ближайших метеорологических станций или по карте (рисунок 3.5);  $\lambda_{P\%}$  – переходный коэффициент от максимальных мгновенных расходов воды ежегодной вероятностью  $P = 1\%$  к максимальным расходам другой вероятности превышения, принимается аналогично формуле (4.12) или по значениям, приведенным в таблице 4.7;  $\delta$ ,  $A$  – то же, что в формуле (4.11);  $\varphi$  – сборный коэффициент стока, определяемый при наличии рек-аналогов по формуле:

$$\varphi = \frac{q_{1\%,a}}{16,67 \cdot \Psi(\tau_{\delta}) \cdot \delta \cdot H'_{1\%}} \cdot \left( \frac{i_{ск}}{i_{ск,a}} \right)^{n_2} \cdot \left( \frac{A_a + 1}{A + 1} \right)^{0,07}, \quad (4.16)$$

где  $q_{1\%,a}$  – модуль максимального срочного расхода воды реки-аналога ежегодной вероятности превышения  $P = 1\%$ , м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>);  $\delta$ ,  $A$ ,  $A_a$  – то же, что в формуле (4.3);  $i_{ск}$ ,  $i_{ск,a}$  – средний уклон склонов исследуемой реки и реки-аналога, ‰;  $n_2$  – степенной коэффициент, определяемый в зависимости от механического состава почв, приведен в таблице 4.8;  $16,67 \cdot \Psi(\tau_{\delta})$  – ордината кривой редукции осадков, приведенная в таблице 4.9;  $\tau_{\delta}$  – продолжительность бассейнового добегания, мин; определяют по формуле:

$$\tau_a = 1,2 \cdot \tau_P^{1,1} + \tau_{\bar{n}\bar{e}}, \quad (4.17)$$

где  $\tau_p$  – продолжительность руслового добегания, мин; определяют по формуле:

$$\tau_p = \frac{1000 \cdot L}{m_p \cdot i_p^{1/3} \cdot A^{1/4} \cdot q_{1\%}^{1/4}}, \quad (4.18)$$

где  $L$ ,  $m_p$ ,  $i_p$ ,  $A$  – то же, что в формуле (4.15);  $\tau_{ск}$  – продолжительность склонового добегания, допускается принимать: 60 при заболоченности менее 20 %; 100 при заболоченности от 20 % до 40 %; 50 – при заболоченности более 40 %.

Таблица 4.6 – Максимальные модули стока  $q'_{1\%}$ , ежегодной вероятностью превышения 1 %, выраженные в долях произведения  $\varphi \cdot H'_{1\%}$ , при  $\delta = 1$

Продолжительность склонового добегания $\tau_{ск}$ , мин	Значение $q'_{1\%}$ при $\Phi_P$								
	0	1	5	10	20	30	40	50	60
10	0,53	0,51	0,41	0,31	0,19	0,12	0,093	0,072	0,059
30	0,35	0,33	0,26	0,21	0,14	0,10	0,080	0,064	0,053
60	0,19	0,18	0,16	0,14	0,11	0,082	0,066	0,054	0,047
100	0,12	0,12	0,11	0,10	0,084	0,070	0,058	0,048	0,041
150	0,088	0,086	0,080	0,075	0,065	0,055	0,047	0,040	0,035
200	0,070	0,068	0,065	0,060	0,056	0,050	0,039	0,034	0,031

Продолжительность склонового добегания ( $\tau_{ск}$ ), мин	Значение $q'_{1\%}$ при $\Phi_P$							
	70	80	90	100	150	200	250	300
10	0,050	0,041	0,036	0,031	0,019	0,013	0,010	0,0083
30	0,045	0,038	0,034	0,030	0,018	0,013	0,010	0,0083
60	0,040	0,035	0,031	0,028	0,018	0,013	0,010	0,0083
100	0,036	0,032	0,028	0,026	0,017	0,012	0,0097	0,0081
150	0,031	0,028	0,026	0,023	0,016	0,012	0,0094	0,0079
200	0,028	0,025	0,023	0,021	0,015	0,011	0,0091	0,0076

Таблица 4.7 – Переходный коэффициент  $\lambda_{P\%}$

Бассейн реки	Переходный коэффициент $\lambda_{P\%}$ при обеспеченности $P$ (%), равной					
	1	2	3	5	10	25
Западной Двины	1,0	0,86	0,79	0,72	0,53	0,32
Немана	1,0	0,80	0,73	0,64	0,49	0,34
Днепра	1,0	0,75	0,65	0,55	0,36	0,24
Припяти и Западного Буга	1,0	0,90	0,78	0,63	0,48	0,29

Таблица 4.8 – Коэффициенты  $\varphi_0$  и  $n_2$  в зависимости от типа почв

Механический состав почв	Значения коэффициентов	
	$\varphi_0$	$n_2$
Глинистые и тяжелосуглинистые	0,56	0,50
Среднесуглинистые и суглинистые	0,38	0,65
Супесчаные, песчаные	0,30	0,80

Таблица 4.9 – Ординаты осредненных кривых редукции осадков, определяемых по произведению  $16,67 \cdot \bar{\psi}(\tau_a)$  и величине относительной интенсивности осадков  $\bar{\psi}(\tau_a)$  при  $\tau_0 = 150$  мин

Значение $16,67 \cdot \bar{\psi}(\tau_a)$ для $\tau_0$ , мин, равных										Относительная интенсивность осадков $\bar{\psi}(\tau_a) = 150$ мин
5	10	20	40	60	90	150	300	720	1440	
0,67	0,53	0,40	0,25	0,19	0,14	0,088	0,048	0,022	0,012	0,79

При наличии рек-аналогов продолжительность склонового добегаания  $\tau_{ск}$ , мин определяется по таблице 4.10 в зависимости от гидроморфологической характеристики склонов  $\Phi_{ск}$ , вычисляемой по формуле:

$$\Phi_{ск} = \frac{\sqrt{1000 \cdot L_{ск}}}{m_{ск} \cdot i_{ск}^{1/4} \sqrt{\varphi \cdot H'_{1\%}}}, \quad (4.19)$$

где  $L_{ск}$  – средняя длина безруслых склонов водосбора, км; определяется по формуле:

$$L_{\bar{n}\bar{e}} = \frac{l}{\gamma \cdot \rho_p}, \quad (4.20)$$

где  $\rho_p$  – густота русловой и овражно-балочной сети водосбора, км/км<sup>2</sup>;  $\gamma$  – коэффициент, принимаемый для односкатных склонов равным 0,9, для двухскатных – 1,8;  $m_{ск}$  – коэффициент, характеризующий шероховатость склонов водосборов (принимают: 0,15 – для кочковатых склонов (или населенных пунктов с застройкой более 20 %); 0,25 – для ровных (без кочек) склонов с обычным травяным покровом; 0,3 – для спланированных, грунтовых склонов);  $\varphi$ ,  $H'_{1\%}$  – то же, что и в формуле (4.15).

Таблица 4.10 – Значение  $\tau_{ск}$  в зависимости от гидроморфологической характеристики склонов водосбора  $\Phi_{ск}$

$\Phi_{ск}$	$\tau_{ск}$ МИН	$\Phi_{ск}$	$\tau_{ск}$ МИН	$\Phi_{ск}$	$\tau_{ск}$ МИН
0,5	2,3	3,0	19	8,0	85
1,0	5,0	4,0	28	9,0	105
1,5	8,0	5,0	39	10	130
2,0	11	6,0	53	12	180
2,5	15	7,0	67		

При отсутствии рек-аналогов сборный коэффициент стока  $\varphi$  определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{1,2 \cdot \varphi_0}{(A + 1)^{0,07}} \cdot \left( \frac{i_{ск}}{50} \right)^{n_2}, \quad (4.21)$$

где  $\varphi_0$  – сборный коэффициент стока для водосбора; определяется в зависимости от механического состава почв, приведен в таблице 4.8;  $n_2$ ,  $i_{ск}$  – то же, что в формуле (4.16).

Величины слоев дождевого стока при наличии рек-аналогов принимаются, независимо от площади водосбора рек, равными величинам расчетных слоев дождевого стока аналогов.

Расчетный слой дождевого паводка  $h_{P\%}$  для водосборов площадью менее 50 км<sup>2</sup> при отсутствии рек-аналогов следует определять по формуле:

$$h_{P\%} = \varphi \cdot H'_{1\%} \cdot \lambda_{P\%}^*, \quad (4.22)$$

где  $\varphi$  и  $H'_{1\%}$  – то же, что в формуле (4.13);  $\lambda_{P\%}^*$  – переходный коэффициент от слоя стока дождевого паводка обеспеченностью  $P = 1\%$  к слоям стока других обеспеченностей; определяют по формуле (4.23) или по значениям, приведенным в таблице 4.11.

$$\lambda_{P\%}^* = \frac{H'_{P\%}}{H'_{1\%}}, \quad (4.23)$$

где  $H'_{P\%}$  – слой максимальных суточных осадков обеспеченностью  $P$  (%), мм; определяют по кривым распределения суточных осадков.

Таблица 4.11 – Переходный коэффициент  $\lambda_{P\%}^*$

Вероятность превышения, %	1	2	3	5	10	25
Переходный коэффициент $\lambda_{P\%}^*$ при обеспеченности $P$ , %, равной	1	0,88	0,75	0,63	0,49	0,32

Средние суточные максимальные расходы воды  $\bar{Q}_C$  дождевого стока следует определять по гидрометрическим данным рек-аналогов. При отсутствии рек-аналогов значение  $\bar{Q}_C$ , м<sup>3</sup>/с допускается определять по формуле:

$$\bar{Q}_C = \frac{Q_P}{k'_\tau}, \quad (4.24)$$

где  $Q_P$  – расчетный максимальный мгновенный расход воды, м<sup>3</sup>/с, ежегодной вероятностью превышения  $P$ ;  $k'_\tau$  – переходной коэффициент от срочных максимальных расходов воды к средним суточным; рассчитывается по формуле:

$$k'_\tau = \frac{b}{(A+1)^{m_1}}, \quad (4.25)$$

где  $A$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $b$ ,  $m_1$  – параметры, определяемые по таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Параметры  $b$  и  $m_1$

Водосбор реки	Параметр	
	$b$	$m_1$
Западной Двины	1,8	0,09
Немана, Западного Буга, левобережных притоков Припяти, Днестра, Березины, Сожа	4,5	0,19
Правобережные притоки Припяти	5,0	0,20

Максимальные расходы воды дождевых паводков  $Q_{P\%}$ , м<sup>3</sup>/с, ежегодной вероятностью  $P$ , %, для расчета сооружений осушительных и осушительно-увлажнительных систем при площади водосбора менее 50 км<sup>2</sup> и отсутствии рек-аналогов допускается определять по формуле:

$$Q_{P\%} = \bar{q} \cdot A \cdot k_P, \quad (4.26)$$

где  $\bar{q}$  – средний многолетний модуль стока дождевых паводков, м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>);  $A$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $k_P$  – модульный коэффициент расчетной ежегодной вероятности превышения.

Для определения среднего многолетнего модуля стока дождевых паводков  $\bar{q}$ , м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>) получена формула:

$$\bar{q} = (1,63 \cdot i_p + 1,37 \cdot \varphi - 0,004 \cdot L - 0,16 \cdot A_{оз} - 64,1) \cdot 10^{-3}, \quad (4.27)$$

где  $i_p$  – средний уклон реки, ‰;  $\varphi$  – широта створа, км;  $L$  – длина реки от истока до пункта наблюдений, км;  $A_{оз}$  – озерность водосбора, %.

Коэффициент вариации средних многолетних модулей стока воды дождевых паводков определяется по формуле:

$$C_v = 0,13 \cdot i_p + 0,06 \cdot \lambda - 0,0005 \cdot L - 0,10 \cdot \varphi + 4,49, \quad (4.28)$$

где  $i_p$ ,  $L$ ,  $\varphi$ , – то же, что и в формуле (4.27);  $\lambda$  – долгота створа, км.

Отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации модулей стока дождевых паводков для рек бассейнов Западной Двины и Припяти принимается  $C_S = 2C_v$ ; для рек бассейна Немана, Западного Буга и Днестра –  $C_S = 3C_v$ .

## 4.2 Определение модулей максимальных расходов воды дождевых паводков с использованием гидрографических характеристик водосборов

Определение максимальных расходов воды дождевых паводков в случае отсутствия данных гидрометрических наблюдений по описанным выше формулам предусматривает определение ряда специфических параметров, расчет которых вызывает трудности. Кроме того, подбор рек-аналогов, которые бы в полной степени соответствовали предъявляемым требованиям, при нынешней густоте гидрологических постов достаточно сложен.

Поскольку (согласно [124]) допускается использовать и иные обоснованные методики, мы разработали методику, позволяющую определять модули максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений с использованием гидрографических характеристик водосборов, которая включает следующие этапы [97]:

- выбор пунктов с продолжительными рядами наблюдений за максимальными расходами воды дождевых паводков;
- оценка однородности и стационарности исходных рядов гидрометрических наблюдений;
- определение параметров распределения и расчетных значений максимальных расходов воды дождевых паводков для рассматриваемых рядов наблюдений;
- построение региональных зависимостей и оценка их эффективности.

Методика построения региональных зависимостей (между функцией  $q$  и аргументами  $X_1, X_2, \dots$ ), используемая в настоящем исследовании, основана на методе множественной линейной регрессии и уравнении вида:

$$q = B_0 + \sum_{i=1}^n (q_i \cdot X_i). \quad (4.29)$$

При этом рассматривалось 2 вида структуры уравнения:

- аддитивная структура, представляющая сумму аргументов с соответствующими коэффициентами;
- структура, соответствующая известной в гидрологии редуционной формуле, основанной на логарифмическом преобразовании функции и аргументов.

Прежде всего определялся вид однофакторных зависимостей на основе графиков связи между модулями максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности ( $q_{10\%}$ ) и каждым из предполагаемых факторов. Помимо прямолинейной зависимости задавалось также несколько видов простых линеаризующих преобразований факторов: логарифмиче-

ское, экспоненциальное, степенное. Выбор функционального преобразования фактора осуществлялся тогда, когда коэффициент парной корреляции при этом преобразовании статистически значимо отличался от коэффициента парной корреляции прямолинейной зависимости. Статистически значимое отличие определялось следующим неравенством:

$$|R_{\phi n}| \geq |R_n| + \sigma_R, \quad (4.30)$$

где  $R_{\phi n}$  – коэффициент парной корреляции при рассматриваемом функциональном преобразовании фактора;  $R_n$  – коэффициент парной корреляции при прямолинейной зависимости;  $\sigma_R$  – стандартная погрешность коэффициента корреляции прямолинейной зависимости.

Оценка эффективности построенных моделей осуществлялась путем сопоставления рассчитанных по формулам и фактических значений модулей максимальных расходов воды дождевых паводков.

При построении моделей рассматривались следующие факторы:  $A$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $H_{cp}$  – средняя высота водосбора, м;  $L$  – длина реки от истока до пункта наблюдений, км;  $\rho$  – густота речной сети, км/км<sup>2</sup>;  $i_p$  – средний уклон реки, ‰;  $A_b$  – заболоченность водосбора, ‰;  $A_{оз}$  – озерность водосбора, ‰;  $A_l$  – лесистость водосбора, ‰. Помимо гидрографических факторов рассматривались и географические координаты центров тяжести водосборов:  $\varphi$  – широта створа, км;  $\lambda$  – долгота створа, км.

Результатом проведения регрессионного анализа явилось построение полуэмпирических моделей, позволяющих определять модули максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности рек Беларуси (м<sup>3</sup>/(с·км<sup>2</sup>)) с использованием основных гидрографических характеристик водосборов. Для рек Беларуси в целом получено следующее уравнение аддитивной структуры [36; 172]:

$$q_{10\%} = (17,7 \cdot i_p - 0,17 \cdot H_{cp} + 44,7) \cdot 10^{-3}. \quad (4.31)$$

Коэффициент множественной корреляции в уравнении  $R = 0,71 \pm 0,04$ , критерий Фишера  $F = 34,7$ . Статистические критерии данного уравнения  $R \geq R_{кр} = 0,23$ ,  $F > F_{кр} = 4,43$  существенно превышают пороговые значения и свидетельствуют о достоверности полученной модели. Статистическая значимость коэффициентов уравнений определялась на уровне их погрешности  $2\sigma$ , что соответствует примерно 95 %-ному уровню доверительной вероятности.

Уравнение редуцированной структуры имеет вид:

$$q_{10\%} = \frac{0,057 \cdot i_p^{0,37} \cdot L^{0,16}}{A^{0,18}}. \quad (4.32)$$

Коэффициент множественной корреляции  $R = 0,76 \pm 0,03$ , критерий Фишера  $F = 31,4$ .

Для повышения эффективности уравнений в результате проведения регрессионного анализа также получены математические модели, позволяющие определять модули максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности отдельно для бассейнов крупных рек страны (Западной Двины, Немана, Днепра, Припяти и Западного Буга).

Для рек бассейна Западной Двины получены следующие модели:

$$q_{10\%} = (8,74 \cdot i_p + 0,13 \cdot L - 2,81 \cdot A_{i\zeta} - 0,002 \cdot A + 28,5) \cdot 10^{-3}, \quad (4.33)$$

где  $R = 0,93 \pm 0,03$ ,  $F = 13,3$ .

$$q_{10\%} = \frac{0,041 \cdot i_p^{0,31} \cdot L^{0,33}}{A^{0,19}}, \quad (4.34)$$

где  $R = 0,84 \pm 0,06$ ,  $F = 7,24$ .

Модули максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности рек бассейна Немана можно определить с помощью моделей следующего вида:

$$q_{10\%} = (6,63 \cdot i_p + 0,0005 \cdot A - 0,08 \cdot L - 0,55 \cdot A_{i\zeta} + 26,1) \cdot 10^{-3}, \quad (4.35)$$

где  $R = 0,97 \pm 0,01$ ,  $F = 45,5$ .

$$q_{10\%} = \frac{10^{3,23} \cdot i_p^{0,88}}{H_{cp}^{2,10}}, \quad (4.36)$$

где  $R = 0,91 \pm 0,03$ ,  $F = 34,7$ .

Для рек бассейна Днепра (без Припяти) получены следующие модели:

$$q_{10\%} = (30,1 \cdot i_p + 1,64 \cdot A_a + 0,29 \cdot H_{\bar{n}\bar{d}} - 7,55 \cdot A_{i\zeta} - 48,5) \cdot 10^{-3}, \quad (4.37)$$

где  $R = 0,98 \pm 0,01$ ,  $F = 72,6$ .

$$q_{10\%} = \frac{0,49 \cdot \rho^{0,64}}{A^{0,18} \cdot (A_a + 1)^{0,35} \cdot (A_{o\zeta} + 1)^{0,56}}, \quad (4.38)$$

где  $R = 0,94 \pm 0,02$ ,  $F = 24,1$ .

Модели для рек бассейнов Припяти и Западного Буга представлены в виде:

$$q_{10\%} = (24,1 \cdot i_p - 0,04 \cdot L - 4,64 \cdot A_{i\zeta} - 11,7 \cdot \varphi + 635) \cdot 10^{-3}, \quad (4.39)$$

где  $R = 0,93 \pm 0,02$ ,  $F = 32,2$ .

$$q_{10\%} = \frac{10^{3,57} \cdot i_p^{0,38}}{H_{cp}^{1,94} \cdot A^{0,15} \cdot (A_{o\zeta} + 1)^{0,43} \cdot (\varphi - 50)^{0,72}}, \quad (4.40)$$

где  $R = 0,95 \pm 0,01$ ,  $F = 31,4$ .

Все полученные модели позволяют определять модули максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности с приемлемой для практических целей точностью, имеют статистически значимые коэффициенты множественной корреляции для класса региональных зависимостей в гидрологии и применимы для расчетов модулей максимальных расходов воды дождевых паводков средних и малых водосборов Беларуси.

С учетом коэффициентов множественной корреляции  $R$  и анализа входящих в состав моделей параметров, для определения модулей максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси в целом рекомендуется уравнение (4.32), для рек бассейна Западной Двины – уравнение (4.33), Немана – уравнение (4.35), Днепра – уравнение (4.37), Припяти и Западного Буга – уравнение (4.40).

Для определения модулей максимальных расходов воды дождевых паводков требуемой расчетной обеспеченности  $P$ , % используется соотношение:

$$q_P = q_{10\%} \cdot \lambda_{P\%}, \quad (4.41)$$

где  $q_{10\%}$  – модуль максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности, определяемый по соответствующим моделям (уравнения 4.31–4.40),  $\lambda_{P\%}$  – переходный коэффициент, принимаемый по таблице 4.5.

Для оценки эффективности построенных моделей проведено сравнение результатов, полученных по рекомендуемым формулам ( $q_{10\% \text{расчит.}}$ ), с фактическими ( $q_{10\% \text{фактич.}}$ ) значениями модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности рек Беларуси (рисунок 4.1). Помимо этого проведена оценка эффективности предлагаемых в ТКП [124] формул путем сопоставления рассчитанных и фактических значений. Поскольку предлагаемые нами модели рекомендуются для определения максимальных модулей стока дождевых паводков в случае отсутствия данных гидрометрических наблюдений при невозможности подобрать реку-аналог, сравнение осуществлялось с эмпирической редуцированной формулой типа II (4.11), которая используется при тех же условиях. Рассчитанные по формуле (4.11) величины максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности были представлены в виде модулей стока. Результаты сопоставления их с фактическими значениями представлены на рисунке 4.1.

Проведенный сравнительный анализ результатов, полученных по предлагаемым нами моделям, и результатов, полученных по формуле ТКП [124] (4.11), с фактическими значениями модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности показал, что построенные нами модели по определению модулей максимальных расходов воды

дождевых паводков с использованием гидрографических характеристик водосборов являются более эффективными по сравнению с эмпирической редуccionной формулой (4.11) (рисунок 4.1).

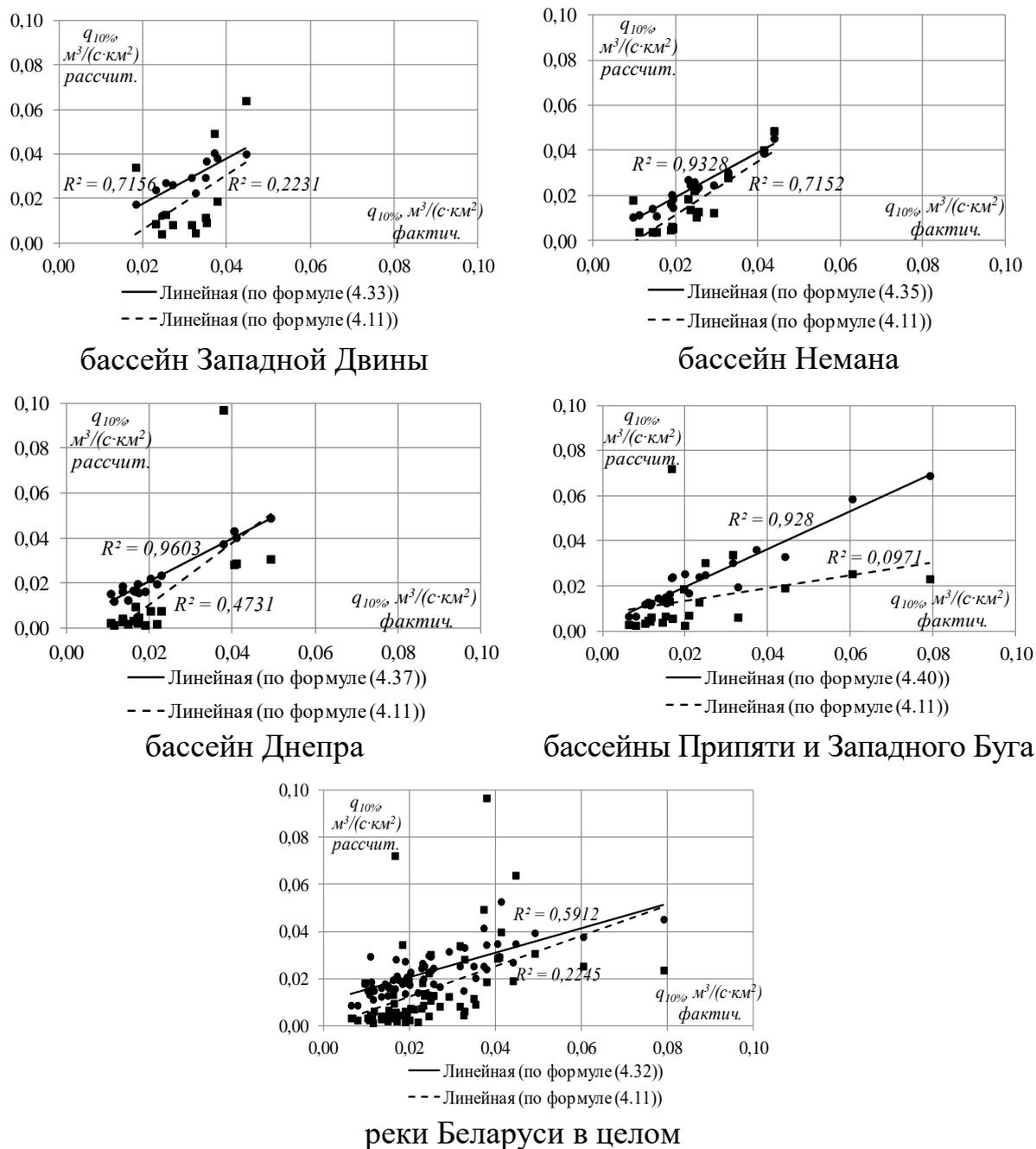


Рисунок 4.1 – Графики соотношения рассчитанных и фактических значений максимальных модулей стока дождевых паводков

Так, коэффициенты корреляции между рассчитанными по рекомендуемым нами формулам и фактическими значениями максимальных модулей стока паводков составили 0,94, в то время как корреляция между рассчитанными по эмпирической редуccionной формуле (4.11) и фактическими

значениями – менее 0,60. Кроме того, полученные модели строились с учетом данных наблюдений последних лет, отражающих изменения условий формирования паводков вследствие воздействия как климатических, так и антропогенных факторов. Этим самым нами учтено требование [124], согласно которому определение расчетных гидрологических характеристик должно основываться на данных гидрометрических наблюдений, в том числе регулярных наблюдений последних лет.

### **4.3 Анализ гидрографов дождевых паводков рек Беларуси**

Дождевые паводки по характеру формирования и форме своего проявления бывают весьма разнообразны, в значительной мере отражают динамику формирующих их дождей. Вследствие большого числа комбинаций формирующих факторов гидрографы дождевых паводков уникальны. В приложении Е представлены гидрографы дождевых паводков рек Беларуси.

На реках Беларуси наиболее часто отмечаются однопиковые паводки. Вероятность появления двухпиковых паводков составляет в среднем около 20 %. Трехпиковые паводки – явление еще более редкое. Они встречаются в 10 % случаев и реже. Многопиковые (более трех пиков) паводки на реках страны встречаются крайне редко.

Появление паводков с несколькими пиками обусловлено прежде всего характером выпадения осадков. Двух- и трехпиковые паводки формировались осенью 2009 г. в бассейне Западной Двины, в 1998 г. на многих реках Беларуси, летом 1988 г. в бассейне Западного Буга, в отдельные годы на разных реках страны. Например, в 1998 г., когда выпало аномально большое количество осадков, дождевые паводки на большинстве рек Беларуси формировались неоднократно и гидрографы их имели разнообразные формы (рисунок 4.2).

На малых реках форма гидрографов паводков, как правило, островершинная с резким подъемом и спадом. Здесь даже кратковременный дождь вызывает подъем уровня и часто образует небольшую паводочную волну. На больших реках максимальные уровни воды могут удерживаться несколько суток. На некоторых реках (Дрыса, Нища, Ясельда) гидрографы часто приобретают зубчатую форму.

Продолжительность дождевых паводков зависит от многих факторов (площади водосбора, типа дождя, зарегулированности озерами и болотами и др.). Средняя продолжительность паводков на малых и средних реках Беларуси (с площадью водосбора менее 10 тыс. км<sup>2</sup>) составляет около 32 суток; причем на реках бассейна Припяти она наибольшая – около 39 суток, в бассейне Западной Двины – около 30, Немана и Запад-

ного Буга – около 28, Днепра – около 29 суток. На больших реках продолжительность паводков гораздо больше – в среднем около 50 суток и изменяется от 45 суток на Западной Двине и Немане, 50 суток на Днестре до 62 суток на Припяти. Паводки с меньшей продолжительностью вызываются кратковременными дождями и ливнями, а с большей – обложными дождями. На зарегулированных озерами и болотами реках Полесья продолжительность летне-осенних паводков, которые могут сливаться вместе и образовывать несколько или одну большую волну, в отдельные годы достигает нескольких месяцев.

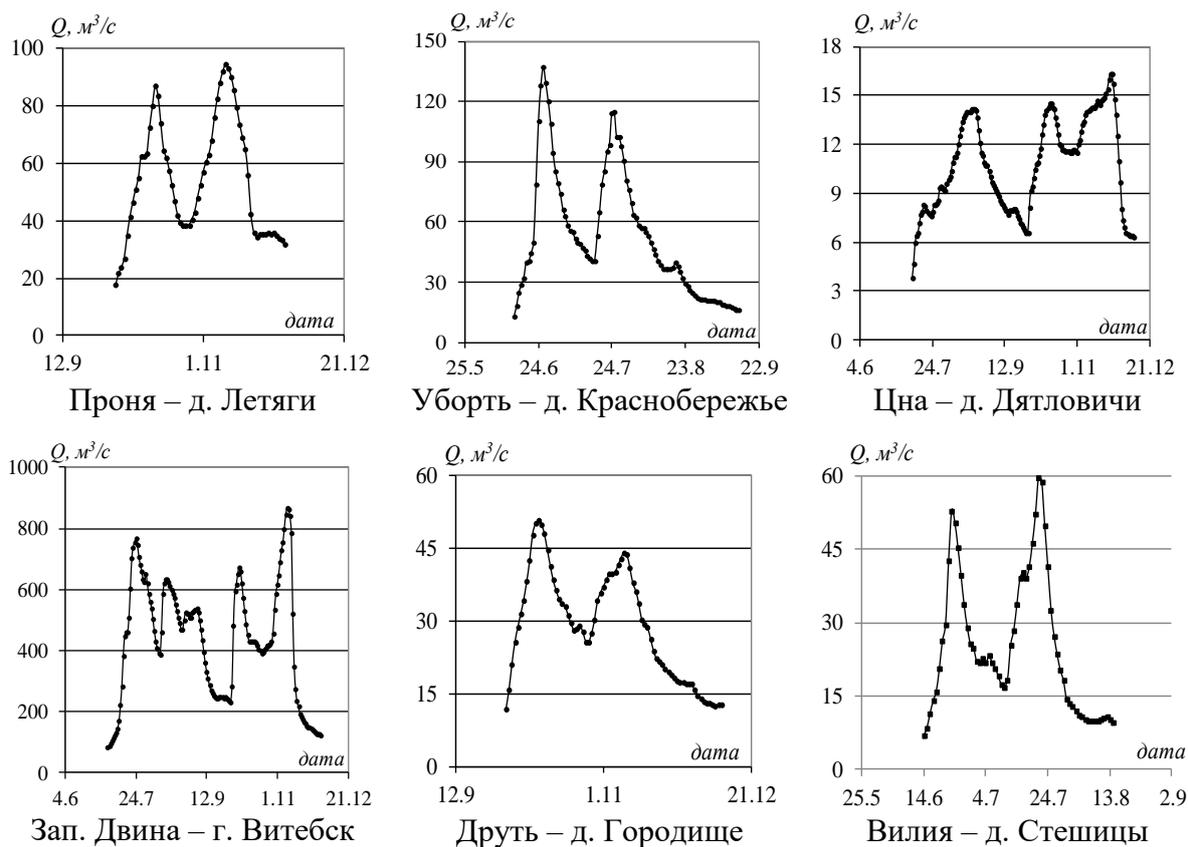


Рисунок 4.2 – Гидрографы дождевых паводков 1998 г.

Наибольшее значение при построении гидрографов паводков имеет продолжительность подъема, которая определяет скорость формирования паводка. Средняя продолжительность подъема паводков в бассейне Припяти составляет 16 суток, на остальных реках Беларуси – около 11 суток. Существенны различия и между реками с разной площадью водосбора. На больших реках подъем может продолжаться по 3–4 недели и более.

Продолжительность спада (в среднем 21 сутки) обычно больше продолжительности подъема паводка. Она также увеличивается на больших водосборах (в среднем 26) и уменьшается на малых (17). Нередко на спаде паводка выпадают осадки, тогда гидрографы паводков приобретают мно-

говершинную форму. На реках в северной и западной частях страны время подъема заметно меньше, чем спада. В бассейне Днепра и Припяти форма паводков более симметричная.

В таблице 4.13 представлены параметры гидрографов дождевых паводков обеспеченностью не более 25 %, отмечаемые на реках страны за период 1980–2010 гг. Для них рассчитывались обеспеченные величины ( $P$ , %) максимальных расходов воды  $Q_{max}$ , объемов стока за время паводка  $W$ , продолжительностей подъема  $t_{п}$  и общих продолжительностей  $t_{общ}$  паводков.

Таблица 4.13 – Параметры гидрографов дождевых паводков рек Беларуси

Река – створ	Год	$Q_{max}$		$t_{п}$		$t_{общ}$		$W$		
		м <sup>3</sup> /с	$P$ , %	сут.	$P$ , %	сут.	$P$ , %	млн м <sup>3</sup>	$P$ , %	от годового, %
Улла – д. Бочейково	1981	51,3	16	15	23	52	9,7	158	16	23
	1994	90,5	6,5	18	19	46	26	164	9,7	20
	1997	49,8	23	12	29	29	45	82,8	32	13
	1998	71,9	9,7	8	45	36	32	159	13	14
	2005	126	3,2	10	35	35	35	233	3,2	33
	2006	50,6	19	20	13	50	23	134	19	23
Полота – д. Янково	1982	13,4	23	4	65	15	68	12,5	58	7,4
	1987	19,0	9,7	15	19	24	55	28,1	16	12
	1991	19,9	6,5	17	16	33	29	35,8	9,7	17
	1994	15,4	19	13	24	27	48	23,9	23	10
	2005	29,6	3,2	13	24	31	35	48,9	3,2	28
	2006	16,8	16	7	58	37	19	37,6	6,5	24
Нарочь – д. Нарочь	1985	27,3	16	6	42	20	39	25,9	48	7,1
	1991	40,2	6,5	14	16	24	35	40,3	26	11
	2005	43,2	3,2	17	13	30	26	73,1	6,5	19
	2006	29,3	9,7	20	6,5	44	13	59,0	9,7	17
Остер – д. Ходунь	2010	29,0	13	19	9,7	45	6,5	51,8	13	12
	1985	55,8	13	7	39	19	58	48,0	61	5,2
	1987	49,3	19	4	56	21	53	60,5	48	9,4
	1994	114	3,2	4	56	21	53	97,3	19	10
	1998	100	6,5	21	13	68	6,5	371	3,2	30
Уза – д. Прибор	2005	53,4	16	14	26	39	26	101	16	15
	2009	59,5	9,7	44	3,2	71	3,2	198	6,5	25
	1991	9,7	6,5	7	32	29	24	14,2	6,5	14
Цна – д. Дятловичи	2005	8,82	9,7	4	42	29	24	13,4	9,7	15
	2009	11,2	3,2	8	29	34	16	17,5	3,2	15
	1982	15,8	16	15	32	24	52	27,1	29	15
Цна – д. Дятловичи	1988	15,9	13	28	13	82	6,5	50,6	9,7	34
	1993	21,3	6,5	16	26	58	29	64,1	3,2	27

Продолжение таблицы 4.13

	1998	14,5	19	15	32	29	45	29,0	22	11
	2005	26,4	3,2	15	32	34	39	56,7	6,5	28
	2007	17,8	9,7	23	19	69	19	49,7	19	31
	2009	12,6	23	29	9,7	73	13	49,8	16	23
Оресса – д. Андреевка	1982	52,0	6,5	5	55	32	39	85,7	42	12
	1988	46,9	13	10	35	48	23	86,2	39	19
	1993	50,4	9,7	18	16	56	19	124	19	19
	1998	67,3	3,2	15	26	45	26	164	9,7	17
	2005	45,5	16	17	19	26	42	81,0	45	11

Анализ таблицы 4.13 показал, что величина обеспеченности максимального расхода воды дождевого паводка часто не соответствует величине обеспеченности его объема. Поэтому наибольшие паводки по величине максимального расхода не всегда являются наибольшими по объему стока за паводок. Коэффициент корреляции между максимальными расходами воды паводков и объемом стока за паводок составляет 0,65–0,85, причем наибольший он на реках бассейнов Западной Двины и Немана, наименьший – на реках бассейна Припяти. Объем паводка зависит во многом от его продолжительности (коэффициент корреляции около 0,7–0,8). На р. Остер – д. Ходунь, например, в 1994 г. отмечался дождевой паводок, наибольший по величине максимального расхода за период инструментальных наблюдений, однако по величине объема он значительно уступает многим паводкам в силу своей непродолжительности.

#### 4.4 Построение гидрографов дождевых паводков

При решении ряда практических задач (проектировании водохранилищ, прудов, отводе вод от сооружений в период их строительства, расчете затопления пойм, пропуске высоких вод через дорожные сооружения, разработке мероприятий по борьбе с наводнениями и т.д.) требуется знание не только максимального расхода, но и всего гидрографа паводка. Основными элементами расчетного гидрографа являются объем или слой стока паводка, его максимальный расход, общая продолжительность, продолжительность подъема и форма гидрографа паводка.

Построение гидрографов дождевых паводков осуществляется по мгновенным расходам воды. При этом возможны три ситуации:

- а) при наличии данных гидрометрических наблюдений;
- б) при недостаточности данных гидрометрических наблюдений;
- в) при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

Методики построения гидрографов паводков детально изложены в [124]. В связи с удлинением рядов наблюдений, а также с изменениями,

наблюдаемыми в условиях формирования стока рек, возникла необходимость пересмотра существующих методик. Наибольший интерес вызывает построение гидрографов паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

В настоящее время нормативными документами для расчета одновершинных гидрографов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений для условий Беларуси рекомендован метод, предложенный Г.А. Алексеевым. Формула для расчета одновершинного гидрографа имеет вид [124]:

$$y = 10^{\frac{a(1-x)^2}{x}}, \quad (4.42)$$

где  $y = \frac{Q_i}{Q_P}$  – отношение расхода воды  $Q_i$  к максимальному среднему су-

точному расходу  $Q_P$  заданной обеспеченности  $P$ , %;  $x = \frac{t_i}{t_{\Pi}}$  – время от начала паводка, выраженное в долях от продолжительности подъема паводка  $t_{\Pi}$ , при этом  $t_i$  – время, соответствующее  $Q_i$  от начала паводка;  $a$  – параметр, зависящий от коэффициента формы гидрографа  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{q \cdot t_{\Pi}}{0,0116 \cdot h}, \quad (4.43)$$

где  $q$  – модуль максимального среднесуточного расхода воды дождевого паводка,  $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ ;  $t_{\Pi}$  – продолжительность подъема паводка, сут.;  $h$  – слой стока за паводок, мм.

Коэффициент формы гидрографа  $\lambda$ , абсцисса расчетного гидрографа  $x$  и ордината  $y$  принимаются по таблице К.2 [124] в зависимости от коэффициента несимметричности гидрографа  $k_s$ , вычисляемого по формуле:

$$k_s = \frac{h_{\Pi}}{h} = f(\lambda), \quad (4.44)$$

где  $h_{\Pi}$  – слой стока за период подъема паводка, мм.

Координаты расчетного гидрографа  $t_i$  и  $Q_i$  определяются по таблице К.2 [124] путем умножения абсцисс  $x$  на продолжительность подъема паводка, а ординат  $y$  – на максимальный расчетный расход воды, т.е. по формулам:

$$t_i = x \cdot t_{\Pi}, \quad (4.45)$$

$$Q_i = y \cdot Q_P, \quad (4.46)$$

где  $Q_P$  – расчетный максимальный средний суточный расход воды дождевого паводка,  $\text{м}^3/\text{с}$ , определяемый как

$$Q_P = q_P \cdot A, \quad (4.47)$$

$t_{\text{п}}$  – продолжительность подъема дождевого паводка (в сутках), которая определяется по формуле:

$$t_{\text{п}} = \frac{0,0116 \cdot \lambda \cdot h_P}{q_P}, \quad (4.48)$$

где  $q_P$  – расчетный модуль максимального среднесуточного расхода воды паводка,  $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ ;  $h_P$  – слой стока расчетной обеспеченности, мм.

Таким образом, для построения расчетного гидрографа дождевого паводка в случае отсутствия данных гидрометрических наблюдений необходимо определить: максимальный среднесуточный расход воды, слой стока расчетной обеспеченности, коэффициент несимметричности гидрографа паводка.

#### *Определение максимального среднесуточного расхода воды паводка*

Максимальные среднесуточные расходы воды дождевых паводков рекомендуется определять по разработанным моделям (уравнения 4.31–4.40) по определению модулей максимальных расходов воды дождевых паводков с использованием гидрографических характеристик водосборов рек, путем умножения модулей максимальных расходов воды паводков на площадь водосбора до замыкающего створа. Для перехода к требуемой расчетной обеспеченности следует использовать коэффициент  $\lambda_{P\%}$  (таблица 4.5).

#### *Определение слоя стока за паводок*

Вторая задача при построении гидрографов дождевых паводков в случае отсутствия гидрометрических наблюдений на реках – определение слоя дождевого паводочного стока расчетной обеспеченности ( $h_P$ ).

Слой стока за паводок  $h$ , мм, рассчитывался по формуле:

$$h = \frac{W}{1000 \cdot A}, \quad (4.49)$$

где  $A$  – площадь водосбора,  $\text{км}^2$ ;  $W$  – объем стока за весь паводок,  $\text{м}^3$ , который определялся путем суммирования средних суточных расходов воды  $Q_T$  с первого дня подъема паводка  $T_{\text{н}}$  и до даты конца паводка  $T_{\text{к}}$  включительно:

$$W = 86400 \cdot \sum_{T_i}^{T_k} Q_T. \quad (4.50)$$

Чтобы исключить составляющую подземного питания в формировании дождевого паводка, расходы воды, соответствующие датам начала паводка  $T_n$  и конца  $T_k$ , включались в объем в половинном размере.

Полученные слои стока за период паводков ранжировались. С использованием трехпараметрического гамма-распределения рассчитывались значения слоев стока за время паводков 1, 5, 10 и 25 %-ной обеспеченностей.

Слои стока за паводок 10 %-ной обеспеченности были картографированы с использованием координат центров тяжести водосборов исследуемых рек (рисунок 4.3).

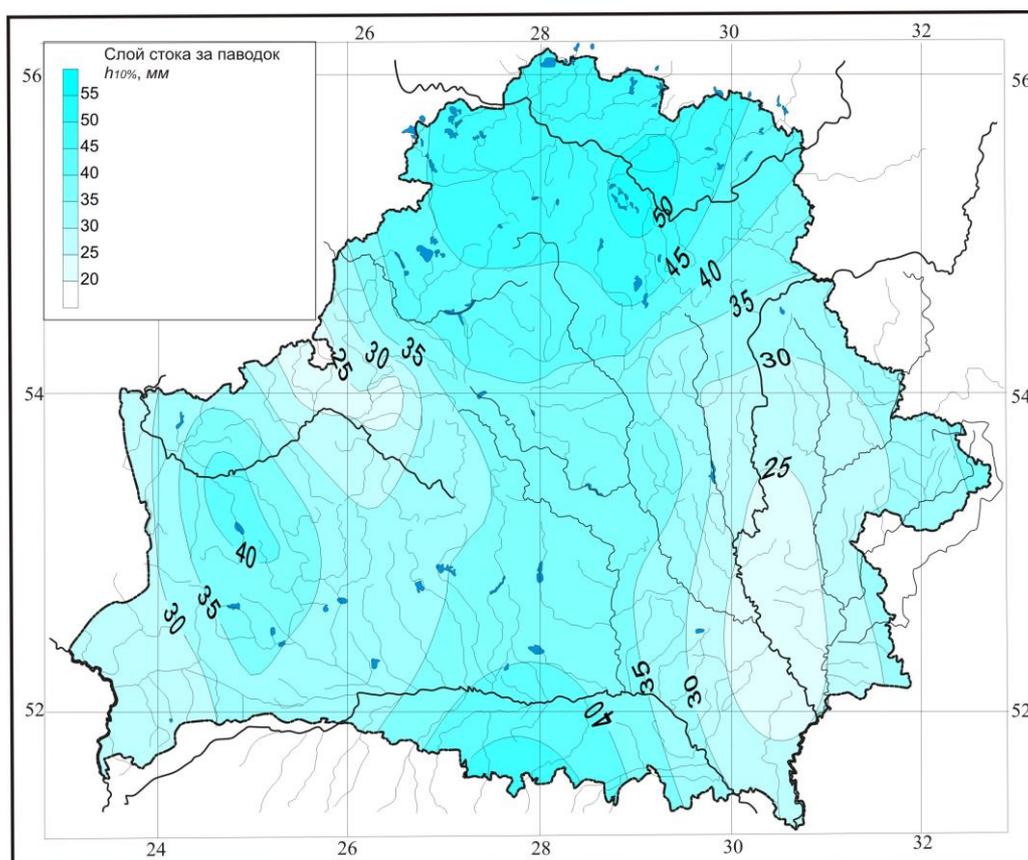


Рисунок 4.3 – Слой стока за паводок 10 %-ной обеспеченности

Анализ рисунка 4.3 показывает, что наибольшие значения слоя стока за паводок характерны для рек в северной части Беларуси – в среднем 45–50 мм, несколько меньшие – на крайнем юге. Самые малые показатели слоя стока отмечаются на реках на востоке и крайнем юго-западе страны – 25–30 мм. На остальных реках Беларуси средние значения слоя стока за паводок составляют 35–40 мм.

Для определения слоев стока за паводок другой расчетной обеспеченности рассчитаны коэффициенты  $\lambda''_p$ , представленные в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Коэффициенты перехода  $\lambda''_P$  слоя стока дождевых паводков от 10 %-ной к другим обеспеченностям

Вероятность превышения, %	1	2	3	5	10	25
Переходный коэффициент $\lambda''_P$ при обеспеченности $P$ , %, равной	2,03	1,79	1,53	1,28	1,00	0,65

Таким образом, расчетный слой дождевого паводочного стока  $h_P$  требуемой обеспеченности  $P$ , % рассчитывается по соотношению:

$$h_P = \lambda''_P \cdot h_{10\%}, \quad (4.51)$$

где  $h_{10\%}$  – величина слоя стока за паводок 10 %-ной обеспеченности определяется по карте (рисунок 4.3);  $\lambda''_P$  – коэффициент перехода к слою стока требуемой обеспеченности, принимаемый по таблице 4.14.

В связи с тем, что параметры максимальных расходов воды паводков и соответствующие им слои стока не совпадают, в формулу по определению продолжительности подъема паводка (4.48) введен коэффициент  $\mu_P$ , значения которого определяются по таблице 4.15. Тогда формула (4.48) примет вид:

$$t_{\Pi} = \frac{0,0116 \cdot \lambda \cdot h_P \cdot \mu_P}{q_P}, \quad (4.52)$$

где  $\mu_P$  – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока за паводок и максимальных расходов воды.

Таблица 4.15 – Значения коэффициента  $\mu_P$ , учитывающего неравенство параметров слоя стока и максимальных расходов воды дождевых паводков

Бассейн реки	Значение коэффициента $\mu_P$ при обеспеченности $P$ , %, равной				
	1	5	10	20	25
Западной Двины, Немана, Западного Буга	1,0	0,98	0,95	0,89	0,86
Днепра и Припяти	1,0	0,97	0,94	0,87	0,83

Таким образом, для определения слоя дождевого паводочного стока 10 %-ной обеспеченности построена карта, позволяющая определять величину слоя стока за паводок без привлечения рек-аналогов, и рассчитаны коэффициенты перехода от 10 %-ной к другим расчетным обеспеченностям.

#### *Коэффициенты несимметричности гидрографа паводка*

Третья задача при построении гидрографов дождевых паводков – расчет коэффициента формы гидрографа  $\lambda$ , который определяется в зависимости от коэффициента несимметричности  $k_s$ .

В [124] коэффициенты несимметричности  $k_s$  рекомендуется определять по рекам-аналогам; при их отсутствии допускается принимать  $k_s = 0,30$ . Однако в силу различий условий формирования и особенностей прохождения дождевых паводков на разных реках Беларуси и для повышения точности построения рассчитаны средние коэффициенты несимметричности гидрографов дождевых паводков рек, которые представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Коэффициенты несимметричности  $k_s$  гидрографов дождевых паводков рек Беларуси

Бассейн реки	Значения коэффициентов $k_s$
Западной Двины, Немана	0,29
Днепра, левобережных притоков Припяти, Западного Буга	0,31
Правобережных притоков Припяти	0,33

Исходя из представленных в таблице 4.16 значений коэффициентов несимметричности  $k_s$  определяются координаты расчетного гидрографа по таблице К.2 [124].

#### *Построение гидрографов дождевых паводков*

Построение гидрографов дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений выполняется по следующему алгоритму:

- 1) по карте определяются местоположение изучаемой реки и площадь водосбора в замыкающем створе, а также гидрографические характеристики;
- 2) рассчитывается модуль максимального расхода воды дождевого паводка 10 %-ной обеспеченности  $q_{10\%}$  с использованием гидрографических характеристик водосбора (формулы (4.31)–(4.40));
- 3) осуществляется переход к максимальному модулю стока требуемой расчетной обеспеченности с помощью коэффициента  $\lambda_{P\%}$  (таблица 4.5);
- 4) определяется слой стока за паводок 10 %-ной обеспеченности  $h_{10\%}$  по карте (рисунок 4.3);
- 5) осуществляется переход от слоя стока 10 %-ной обеспеченности к слою стока требуемой расчетной обеспеченности с помощью коэффициента  $\lambda''_P$  (таблица 4.14);
- 6) находится коэффициент несимметричности гидрографа дождевого паводка  $k_s$  (таблица 4.16);
- 7) в зависимости от коэффициента несимметричности гидрографа  $k_s$  по таблице К.2 [124] определяются относительные абсциссы  $x$  и ординаты  $y$  расчетного гидрографа;
- 8) определяется коэффициент  $\mu_P$ , учитывающий неравенство параметров слоя стока и максимальных расходов воды дождевых паводков (таблица 4.15);

9) рассчитывается продолжительность подъема дождевого паводка  $t_n$  по формуле (4.52) и максимальный средний суточный расход воды дождевого паводка  $Q_p$  (формула (4.49));

10) по формулам (4.45) и (4.46) рассчитываются абсциссы и ординаты расчетного гидрографа;

11) по полученным значениям строится гидрограф дождевого паводка.

### Пример построения

Требуется построить гидрограф дождевого паводка обеспеченностью 25 % р. Полота – д. Янково. Характеристики водосбора следующие:  $A = 618 \text{ км}^2$ ,  $L = 77 \text{ км}$ ,  $i_p = 0,39 \text{ ‰}$ ;  $A_{оз} = 4 \text{ ‰}$ .

Поскольку Полота – приток Западной Двины, модуль максимального расхода воды дождевого паводка 10 %-ной обеспеченности определяем по уравнению (4.33):

$$q_{10\%} = (8,74 \cdot 0,39 + 0,13 \cdot 77 - 2,81 \cdot 4 - 0,002 \cdot 618 + 28,5) \cdot 10^{-3} = 0,029 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2).$$

Рассчитываем модуль максимального расхода воды паводка 25 %-ной обеспеченности:  $q_{25\%} = 0,029 \cdot 0,6 = 0,017 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ .

По карте (рисунок 4.3) определяем слой стока за паводок 10 %-ной обеспеченности  $h_{10\%} = 45 \text{ мм}$ . Рассчитываем слой стока 25 %-ной обеспеченности:  $h_{25\%} = 45 \cdot 0,65 = 29,3 \text{ мм}$ .

По таблице 4.16 определяем коэффициент несимметричности гидрографа  $k_s = 0,29$ , в зависимости от которого принимаем  $\lambda = 0,6$ . По формуле (4.52) рассчитываем продолжительность подъема дождевого паводка:

$$t_n = \frac{0,0116 \cdot 0,6 \cdot 29,3 \cdot 0,86}{0,017} = 10,3 \text{ (сут.)}.$$

Абсциссы и ординаты гидрографа рассчитываем по формулам (4.45) и (4.46). При этом по формуле (4.47) находим  $Q_{25\%} = 0,017 \cdot 618 = 10,5 \text{ м}^3/\text{с}$ . По полученным значениям строим гидрограф дождевого паводка (рисунок 4.4).

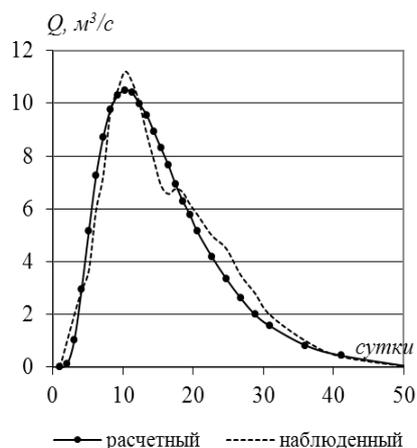


Рисунок 4.4 – Гидрограф дождевого паводка р. Полота – д. Янково

Таким образом, усовершенствованная методика построения гидрографов дождевых паводков рек Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений позволяет получать приемлемые для практики результаты без привлечения рек-аналогов благодаря построенной для территории Беларуси карте слоя стока за паводок 10 %-ной обеспеченности и рассчитанным коэффициентам перехода к другим расчетным обеспеченностям, а также дифференциации коэффициентов несимметричности гидрографов паводков (необходимых для определения коэффициента формы гидрографа, абсциссы и ординаты расчетного гидрографа) и коэффициентов, учитывающих неравенство параметров слоя стока за паводок и максимальных расходов воды дождевых паводков.

## ГЛАВА 5

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

#### 5.1 Соотношение величин максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий рек Беларуси

В связи с тем, что на реках Беларуси развиты и половодья, и паводки, большое научное и практическое значение приобретает вопрос о соотношении между ними. На важность вопроса о соотношении максимальных расходов воды половодий и дождевых паводков для гидрологических расчетов, а также при изучении водного режима рек указывали еще Н.Е. Долгов (1915), В.М. Родевич (1931) и др. Однако до сих пор исследователи не дали полного ответа на этот вопрос [86].

Оценка соотношения величин максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий на реках Беларуси осуществлялась с помощью коэффициента  $\alpha$  представляющего собой отношение ежегодных максимальных расходов воды дождевых паводков ( $Q_{д.пав}$ ) и весенних половодий ( $Q_{в.пол}$ ) [144]:

$$\alpha = \frac{Q_{д.пав}}{Q_{в.пол}} \quad (5.1)$$

В таблице 5.1 представлены наибольшие наблюдаемые максимальные расходы воды дождевых паводков ( $Q_{д.пав}$ ) и весенних половодий ( $Q_{в.пол}$ ) за период инструментальных наблюдений на реках Беларуси, а также максимальные расходы воды 5 %-ной обеспеченности.

Таблица 5.1 – Соотношение величин максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий

Река – створ	Число лет наблюдений	Максимальные расходы воды, м <sup>3</sup> /сек				
		наибольший наблюдаемый		5 %-ный		
		$Q_{д.пав}$	$Q_{в.пол}$	$Q_{д.пав}$	$Q_{в.пол}$	$\alpha_{5\%}$
Зап. Двина – г. Витебск	134	1490	3320	1150	2460	0,47
Улла – д. Бочейково	82	150	392	123	271	0,45
Полота – д. Янково	84	48	73,7	22,4	47,3	0,47
Нача – д. Нача	84	12,0	47,1	8,84	32,3	0,27
Дисна – п.г.т. Шарковщина	66	285	588	221	481	0,46
Неман – г. Гродно	133	723	3410	580	1740	0,33
Неман – г. Столбцы	89	145	652	100	490	0,20
Вилия – г. Вилейка	62	132	826	126	599	0,21
Вилия – д. Михалишки	65	290	1570	224	1040	0,22
Котра – Сахкомбинат	65	87,8	278	42,3	141	0,30

Продолжение таблицы 5.1

Нарочь – д. Нарочь	66	76,4	266	53,8	200	0,27
Копаяювка – д. Черск	62	19,1	20,7	8,12	19,1	0,43
Лесная – г. Каменец	65	63,4	201	39,3	134	0,29
Рыга – д. Мал. Радваничи	59	68,4	82,3	25,2	48,4	0,52
Днепр – г. Орша	129	713	2000	493	1550	0,32
Днепр – г. Могилев	80	733	2360	494	1630	0,30
Днепр – г. Жлобин	75	1020	2820	677	2040	0,33
Днепр – г. Речица	116	1230	4970	801	4170	0,19
Ухлясть – д. Радьков	81	22,5	96,4	15,9	49,9	0,32
Березина – г. Борисов	130	192	460	91,9	337	0,27
Березина – г. Бобруйск	130	499	2430	321	1440	0,22
Свислочь – д. Теребуты	75	117	913	97,2	452	0,22
Сож – г. Славгород	114	719	4740	452	3740	0,12
Сож – г. Гомель	111	1020	6600	498	5060	0,10
Жадунька – г. Костюковичи	65	37,9	112	24,5	93,9	0,26
Беседь – д. Светиловичи	82	443	1330	166	952	0,17
Проня – д. Летяги	75	351	986	217	947	0,23
Уза – д. Прибор	83	44,6	178	20,6	103	0,20
Припять – г. Мозырь	130	1770	7500	905	4240	0,21
Припять – д. Черничи	80	1150	3990	718	3150	0,23
Птичь – д. Лучицы	116	212	800	159	578	0,28
Оресса – д. Андреевка	85	78,8	301	63,5	191	0,33
Горынь – д. Мал. Викоровичи	89	1150	2910	766	1880	0,41
Ясельда – д. Сенин	66	120	575	75,1	188	0,40
Уборть – д. Краснобережье	85	409	655	282	501	0,56

Анализ таблицы 5.1 показывает, что на всех реках страны наибольшие наблюдаемые, а также расчетные максимальные расходы воды дождевых паводков 5 %-ной обеспеченности примерно в 3–4 раза меньше наибольших расходов воды весенних половодий. Однако случаи превышения половодий дождевыми паводками в отдельные годы нередки и отмечаются на всех реках страны. Частота превышения максимальных расходов воды дождевых паводков над максимумами весенних половодий ( $\alpha \geq 1$ ), выраженная в процентах от общего количества лет наблюдений, представлена на рисунке 5.1.

Частота превышения максимальных расходов воды дождевых паводков над максимальными расходами воды весенних половодий существенно различается на разных реках страны (рисунок 5.1).

На Западной Двине дождевые паводки превысили половодья или были равны им по величине максимального расхода в 1927, 1952, 1997, 2003, 2005, 2006 гг.; на притоках – еще и в 1945, 1950, 1957, 1978, 1998, 2009 гг. Превышение паводков над половодьями в бассейне Западной Двины происходит примерно в 10 % случаев, на реках Полота и Березовка – в 15 %.

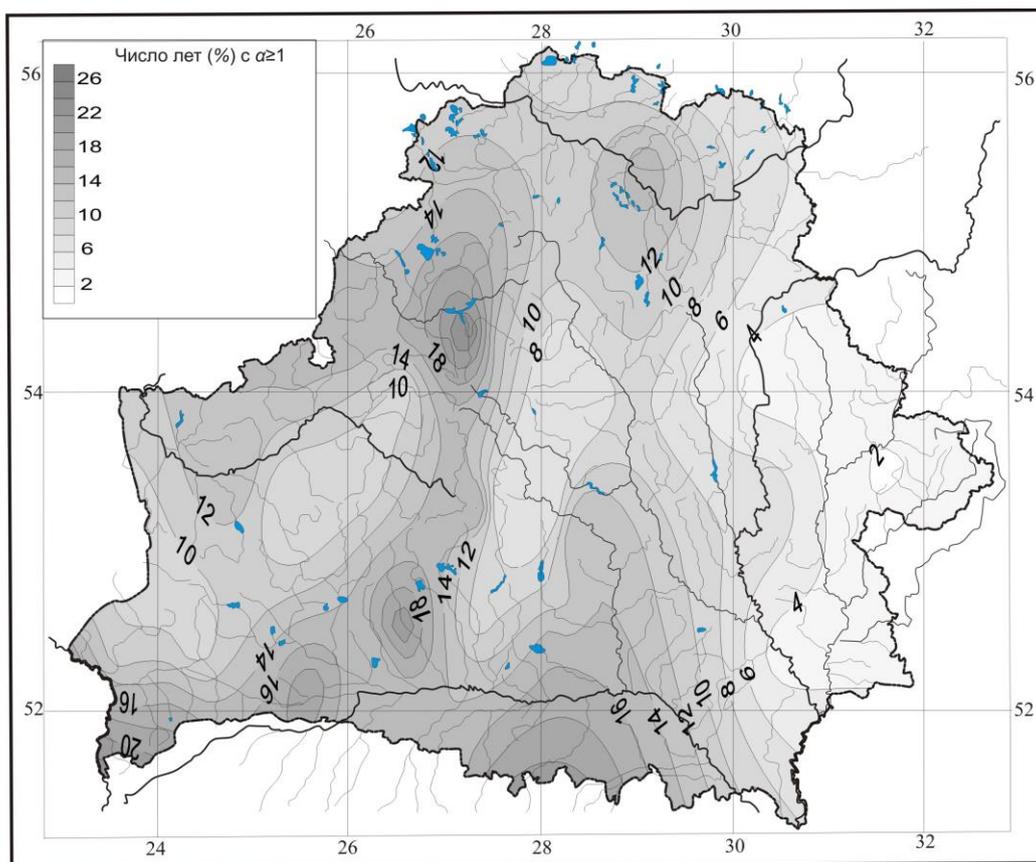


Рисунок 5.1 – Частота превышения максимальных расходов воды дождевых паводков над максимальными расходами весенних половодий на реках Беларуси, %

На реках бассейна Немана дождевые паводки превысили половодья или равны им по величине максимального расхода в 1885, 1923, 1930, 1950, 1974, 1975, 1990, 1998 гг., на некоторых притоках еще и в 1957, 1977, 1991, 2005, 2009 гг. В среднем паводки больше половодий в 11 % случаев, особенно часто – в бассейне Вилии, сток которой существенно преобразован в результате ввода в эксплуатацию в 1976 г. Вилейско-Минской водной системы, предусматривающей переброску воды из р. Вилия в р. Свислочь.

На востоке страны, в бассейне Днепра, превышение максимальных расходов воды дождевых паводков над максимумами весенних половодий наблюдается крайне редко – лишь в 6 % случаев, особенно редко на левобережных притоках, где на некоторых из них (рр. Сож, Остер, Беседь, Жадунька) отмечен единичный случай превышения (в 1974 г.). На большинстве рек бассейна Днепра паводки превысили половодья в 1974, 1990, 1998, 2008 гг., на некоторых притоках также в 1975, 1977, 1978, 1997 гг.

Превышение весенних половодий дождевыми паводками на многих притоках Припяти отмечалось в 1948, 1952, 1960, 1974, 1975, 1977, 1980 гг., особенно часто – с середины 80-х гг. прошлого века: в 1988, 1993, 1997, 1998, 2005, 2009 гг.; на самой Припяти – в 1974, 1975, 1988 и 1998 гг. Превышение половодий дождевыми паводками в бассейне Припяти происходит чаще, чем на других водосборах страны – в среднем в 16 % случаев. Особенно часто это наблюдается на реках Ясельда и Лань, сток которых зарегулирован водохранилищами (Селец, Локтыши).

На реках бассейна Западного Буга дождевые паводки превысили половодья или были примерно равны им в 1960, 1972, 1974, 1975, 1980, 1984, 1992, 1997, 2009 гг. В среднем это наблюдается в 18 % случаев, особенно часто – на р. Копаювка (в 26 %).

Таким образом, максимальные расходы воды дождевых паводков могут превышать максимальные расходы воды весенних половодий на всех реках страны. При этом, если на одних реках такие факты единичны (левые притоки Днепра), то на других – довольно часты (рр. Ясельда, Виляя, Полота).

Дополнительно проведена оценка соотношения величин максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий для периода современного потепления климата (1988–2010 гг.), которая показала, что с середины 80-х гг. XX в. на всех реках Беларуси величина соотношения максимальных расходов воды весенних половодий и дождевых паводков заметно снизилась, а частота превышения паводков над половодьями существенно возросла на всех реках страны.

Так, в бассейнах Западной Двины и Немана в период 1988–2010 гг. дождевые паводки стали превышать весенние половодья в среднем в 14 % случаев, особенно часто на реках Виляя – г. Вилейка (в 35 %), Полота – д. Янково и Нарочь – д. Нарочь (в 22 %). В бассейне Днепра дождевые паводки стали превышать половодья в 12 % случаев. Особенно ощутимо влияние современного потепления климата на соотношение величин максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий в бассейне Припяти, где оно увеличилось с 16 до 24 %, причем на р. Ясельда – г. Береза максимальные в году расходы воды чаще формируются именно во время дождевых паводков (в 65 % случаев).

Для того чтобы определить, при каких величинах максимальные расходы воды весенних половодий были превышены максимальными расходами воды дождевых паводков, рассчитывались их обеспеченности в те годы, когда максимальные в году расходы воды формировались во время дождевых паводков за период 1950–2010 гг. (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Обеспеченности весенних половодий и дождевых паводков

Река – створ	Годы	Обеспеченность, %		Река – створ	Годы	Обеспеченность, %	
		половодий	паводков			половодий	паводков
Зап. Двина – г. Витебск	1952	88	8,9	Днепр – г. Орша	1974	98	22
	2003	98	28		1991	93	4,6
	2006	84	8,1		2008	98	12
Улла – д. Бочейково	1952	70	6,0	Березина – г. Бобруйск	1952	89	13
	1957	84	12		1997	99	26
	1997	97	24		1998	90	9,9
	1998	90	11		2009	94	18
	2003	99	52	Сож–г. Гомель	1974	97	8,9
Полота – д. Янково	2005	69	4,8	Уза – д. Прибор	1974	99	4,8
	1952	91	18	2009	84	12	
	1957	85	5,9	Припять – г. Мозырь	1974	84	1,5
	1962	11	1,2		1988	82	5,3
	1972	93	29		1993	61	2,3
	1991	56	8,2		Горынь – д. Малые Викоровичи	1974	78
	1998	98	24	1975		92	2,2
	2003	99	49	1983		80	15
2005	61	2,4	1988	74		10	
2006	96	15	1989	98		40	
Неман – г. Гродно	1950	80	4,5	1993		75	6,7
	1974	94	14	1997		94	46
	1975	99	17	1998		73	12
	1990	96	28	Оресса – д. Андреевка	1952	98	47
Котра – Сахкомбинат	1950	33	1,5		1964	59	8,1
	1952	40	3,0		1972	94	37
	1957	75	20		1974	88	14
	1984	94	41		1975	87	1,2
	1990	88	38		1977	80	22
	2008	90	47		1982	64	12
	2009	79	4,5		1988	84	16
Лесная – г. Каменец	1952	82	6,1		1990	89	26
	1958	79	23		1993	63	13
	1962	72	4,5		1997	95	43
	1974	49	1,5		1998	66	3,5
	1975	94	29		2009	86	40
	1984	99	55				
	1997	97	36				

Максимальные расходы воды высоких дождевых паводков на реках страны не превысили максимальные расходы весенних половодий в те годы, когда весенние половодья были достаточно большими. Так, на больших реках дождевые паводки обеспеченностью до 10 % превысили половодья обеспеченностью более 80 %, на Припяти – более 60 % (при дождевом па-

водке 2 %-ной обеспеченности). На малых и средних реках паводки превысили половодья обеспеченностью более 40 %, а при чрезвычайно больших паводках максимальные расходы их превысили максимумы и более высоких половодий. Так, в 1962 г. на р. Полота – д. Янково паводок превзошел половодье обеспеченностью 11 %, в 1950 г. на р. Котра – Сахкомбинат – 33 %-ной обеспеченности. При этом величина этих дождевых паводков была выше, чем других зафиксированных на этих реках за период инструментальных наблюдений, примерно в 2 раза.

Превышение половодий дождевыми паводками происходит как при высоких паводках, как это было в 1952 и 1974 гг. на многих реках страны и в 1975, 1993, 1998 гг. в бассейне Припяти, так и при невысоких паводках, но в условиях невысоких половодий (1990, 1997 гг.). Так, дождевые паводки 1982 и 1988 гг. на р. Цна – д. Дятловичи равны по величине максимального расхода. Однако в 1988 г. дождевой паводок превзошел половодье, а в 1982 г. половодье было выше паводка. Это обусловлено различной величиной половодья: в 1982 г. оно соответствовало обеспеченности 23 %, а в 1988 г. – лишь 74 %.

Для оценки практически возможного превышения половодий дождевыми паводками на реках Беларуси рассматривалось, какой обеспеченности весенних половодий соответствуют наибольшие дождевые паводки, отмечаемые на реках страны за период инструментальных наблюдений. Результаты анализа показали, что наибольшие дождевые паводки на больших реках страны (Западная Двина, Днепр, Березина и Неман) по величине максимального расхода примерно равны половодьям 50 %-ной обеспеченности, за исключением Припяти и Сожа, где они равны половодьям 35- и 65 %-ной обеспеченности соответственно.

На большинстве малых и средних рек страны максимальные расходы воды наибольших паводков равны максимумам половодий обеспеченностью около 25–30 %, кроме левых притоков Днепра, где они равны половодьям обеспеченностью около 40 %, и правых притоков Припяти – около 10 %. Однако имеются и исключения. Так, дождевой паводок 1962 г. на р. Полота по величине максимального расхода воды соответствует весеннему половодью 4 %-ной обеспеченности. В 1974 г. дождевой паводок на р. Рыта – д. Малые Радваничи, который по величине своего максимального расхода превысил другие паводки более чем в 2 раза, соответствует половодью обеспеченностью 3 %, на р. Копаювка – д. Черск – 5 %.

Таким образом, высокие дождевые паводки на Западной Двине, Днепре, Березине и Немане могут превышать весенние половодья обеспеченностью более 50 %. На Припяти, где максимальные расходы воды половодий наименьшие по стране, высокие дождевые паводки могут превышать

половодья обеспеченностью более 35 %. На Соже высота весенних половодий значительна и дождевые паводки могут превышать половодья лишь обеспеченностью более 65 %. На малых и средних реках превышение половодий дождевыми паводками возможно при обеспеченности последних около 25–30 %, на левых притоках Днепра – около 40 %, на правых притоках Припяти – около 10 %.

Анализ полученных результатов показывает, что максимальные расходы воды высоких весенних половодий не могут быть превышены дождевыми паводками. Причина этого – различная природа их формирования.

Так, весенние половодья формируются в результате таяния снега, который накапливался всю зиму. Благоприятными факторами для формирования высоких весенних половодий являются: выпадение снега на хорошо увлажненные почвогрунты, глубокая промерзаемость их в течение зимы, большие запасы воды в снеге к началу снеготаяния, дружное и интенсивное снеготаяние, отсутствие оттепелей, выпадение жидких осадков во время снеготаяния и др. При благоприятном сочетании всех этих факторов на реках формируются высокие весенние половодья.

Дождевые же паводки формируются в результате выпадения дождей. И даже при самом благоприятном сочетании факторов формирования высокого дождевого стока (высокое предшествующее увлажнение, большая интенсивность и продолжительность осадков, большая площадь одновременного охвата дождем и др.) дождевые паводки на реках не могут достигать каких масштабов, как весенние половодья. Поэтому можно утверждать: чем больше величина весенних половодий, тем меньше вероятность того, что они будут превышены дождевыми паводками, а наиболее высокие половодья не могут быть превышены самыми большими дождевыми паводками.

Однако в последние десятилетия в результате потепления климата частота оттепелей увеличилась, что явилось одной из причин снижения максимумов половодий практически на всех реках страны [47]. Увеличилась также и частота превышения максимальных расходов воды половодий дождевыми паводками.

Формирование наибольших в году расходов воды во время дождевых паводков чаще происходит на небольших реках. На рисунке 5.2 в качестве примера приведены графики многолетних колебаний максимальных расходов воды половодий и дождевых паводков на двух реках – большой (Припять – г. Мозырь, 101 тыс. км<sup>2</sup>) и малой (Цна – д. Дятловичи, 1100 км<sup>2</sup>) за период инструментальных наблюдений.

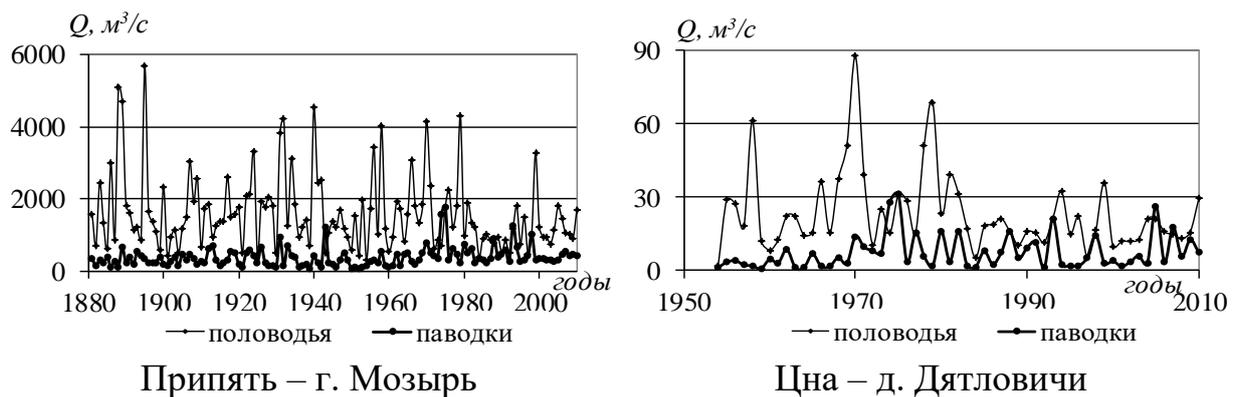


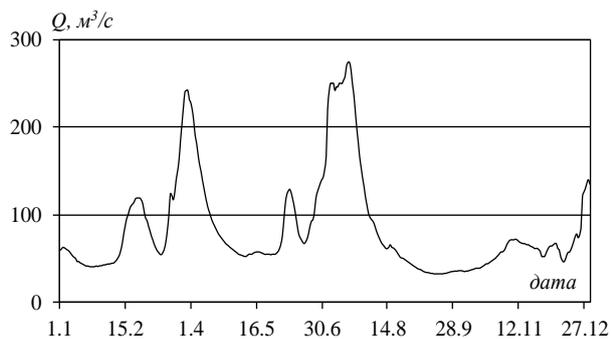
Рисунок 5.2 – Графики многолетних колебаний максимальных расходов воды весенних половодий и дождевых паводков

На Припяти величина весенних половодий существенно превышает величину паводков, а максимальные расходы воды высоких дождевых паводков (обеспеченностью до 5 %) могут превышать максимумы лишь невысоких половодий (обеспеченностью более 75 %). На р. Цна максимальные расходы воды высоких дождевых паводков могут превышать максимумы весенних половодий обеспеченностью более 30 %.

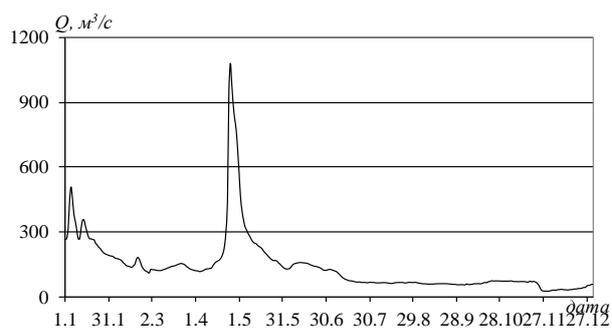
Таким образом, формирование годовых максимумов во время дождевых паводков чаще происходит на небольших реках. На больших реках максимальные расходы воды высоких дождевых паводков могут превышать лишь максимумы невысоких половодий. Это обусловлено тем, что подъемы воды на больших реках во многом зависят от подъемов воды на притоках. А снеготаяние охватывает обычно большие площади, и подъем воды начинается на всех реках одновременно, в результате чего на больших реках половодья могут достигать значительной величины. Дождевые же паводки редко охватывают огромные территории, т.к. имеет место редукция дождя с увеличением площади бассейна. И формирование высоких паводков на больших реках, сопоставимых по величине с половодьями редкой обеспеченности, не возможно.

На рисунке 5.3 представлены гидрографы рек Беларуси в те годы, когда наблюдалось превышение половодий дождевыми паводками.

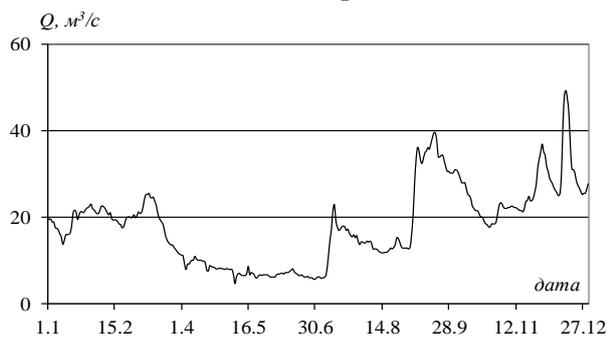
Таким образом, анализ соотношения величин максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий на реках Беларуси показал, что по величине максимального расхода воды паводки существенно меньше весенних половодий. При этом паводки могут превышать половодья и формировать наибольшие в году расходы воды на всех реках Беларуси, что особенно участилось в период современного потепления климата. И половодья, и паводки могут быть как большими, так и малыми, и в отдельных случаях на малых и средних реках дождевые паводки могут превышать не только низкие, но и высокие половодья.



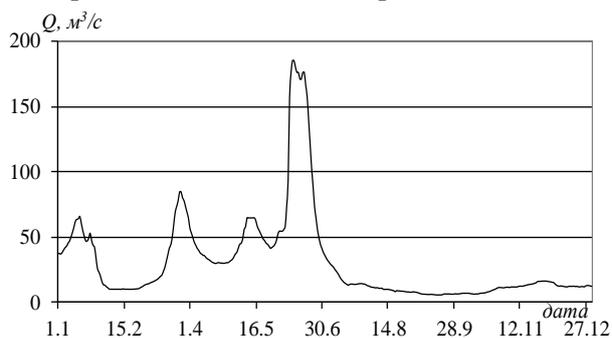
Сож – г. Славгород, 1974 г.



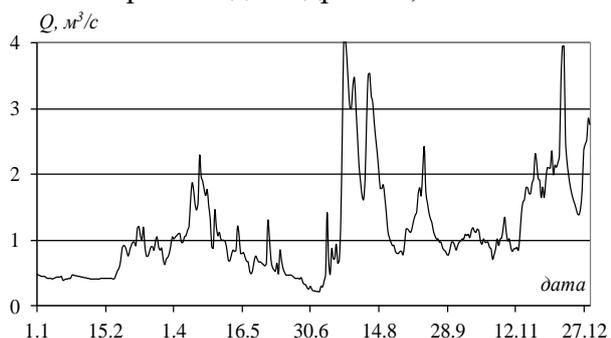
Горынь – д. Малые Викоровичи, 1975 г.



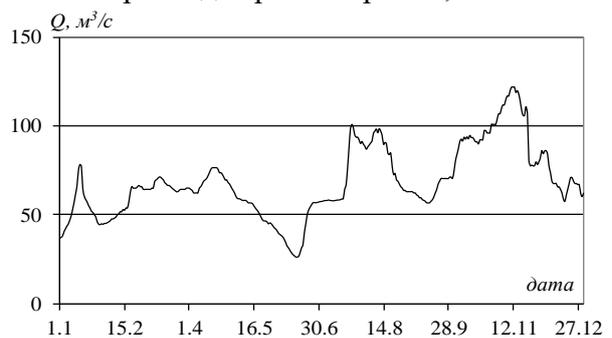
Орсса – д. Андреевка, 1990 г.



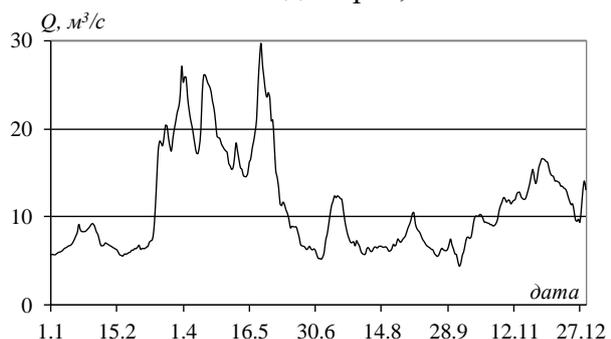
Уборть – д. Краснобережье, 1991 г.



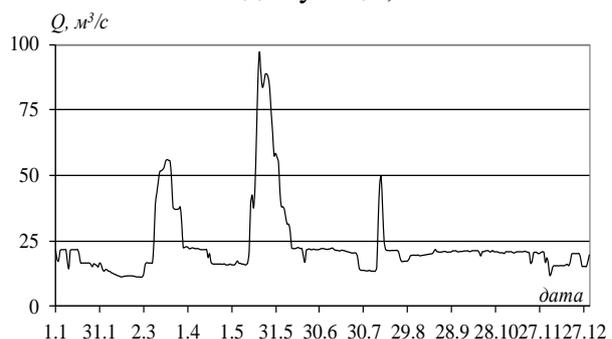
Копаяовка – д. Черск, 1997 г.



Птичь – д. Лучицы, 1998 г.



Улла – д. Бочейково, 2003 г.



Вилия – г. Вилейка, 2005 г.

Рисунок 5.3 – Гидрографы рек Беларуси с дождевыми паводками, превышающими весенние половодья

## 5.2 Цикличность максимальных расходов воды дождевых паводков

Наличие случайных колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков затрудняет выявление закономерностей их временного хода, выражающегося в форме длиннопериодических циклов изменения дождевого паводочного стока. Для выявления таких циклов применен способ сглаживания с использованием скользящей средней арифметической. При увеличении периода сглаживания уменьшается амплитуда высокочастотных (малой продолжительности) колебаний, а колебания низких частот могут быть хорошо представлены. На рисунке 5.4 представлены скользящие средние максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси для различных периодов осреднения [13].

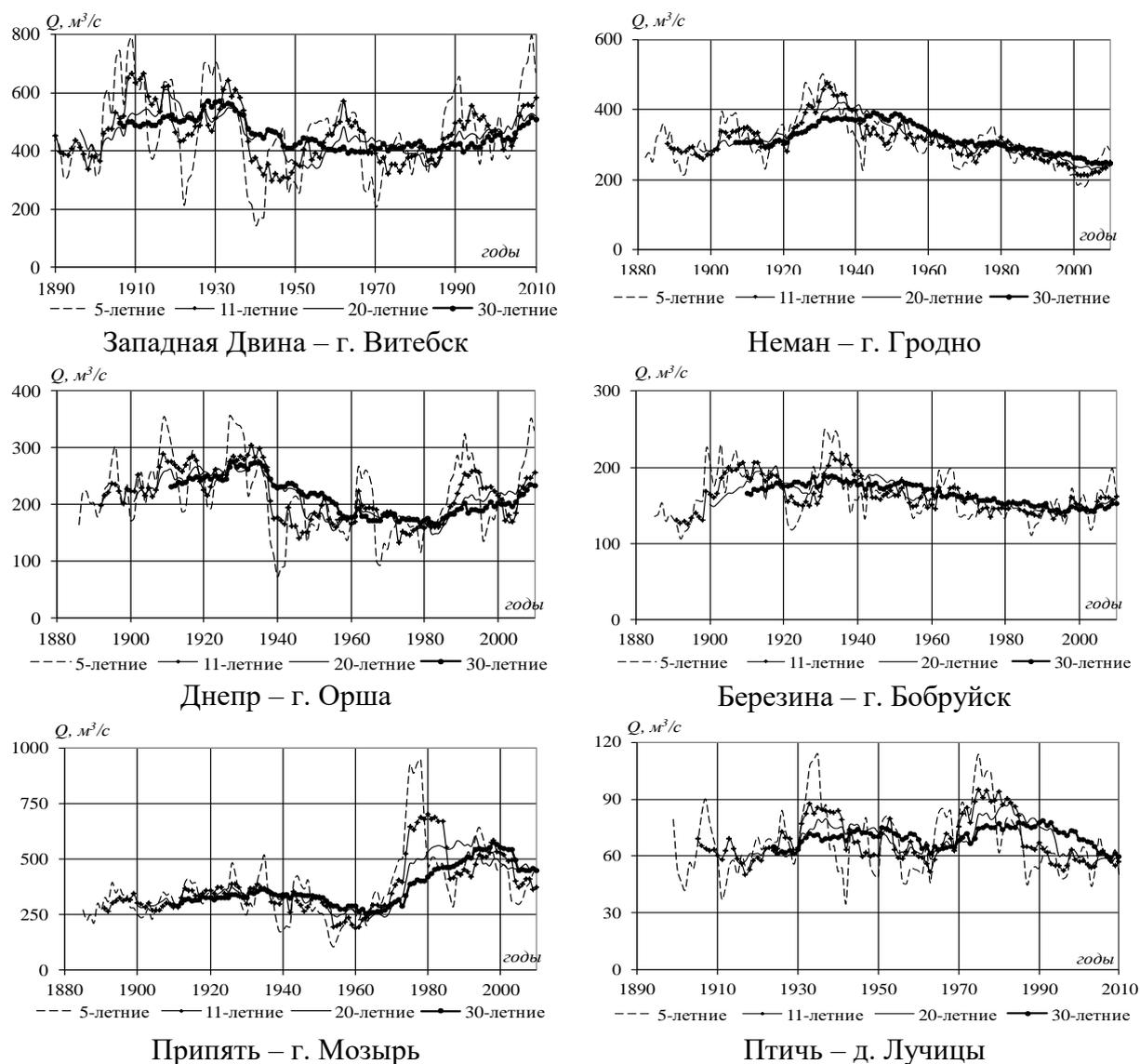


Рисунок 5.4 – Динамика скользящих средних максимальных расходов воды дождевых паводков

Анализ рисунка 5.4 показывает: чем больше период сглаживания, тем больше уменьшается амплитуда высокочастотных колебаний и, следовательно, более четко заметны низкочастотные колебания. Большой размах колебаний присущ 5-летнему осреднению. Многоводные периоды для многих рек наблюдались в 20-30-е гг. XX в. Для р. Припять – г. Мозырь до 1970-х гг. характерен небольшой размах колебаний.

Для более тонких исследований цикличности в колебаниях максимальных расходов воды дождевых паводков, определения основных частот и продолжительности циклов использовался спектрально-временной анализ, результаты которого представлены на СВАН-диаграммах (рисунок 5.5) [13].

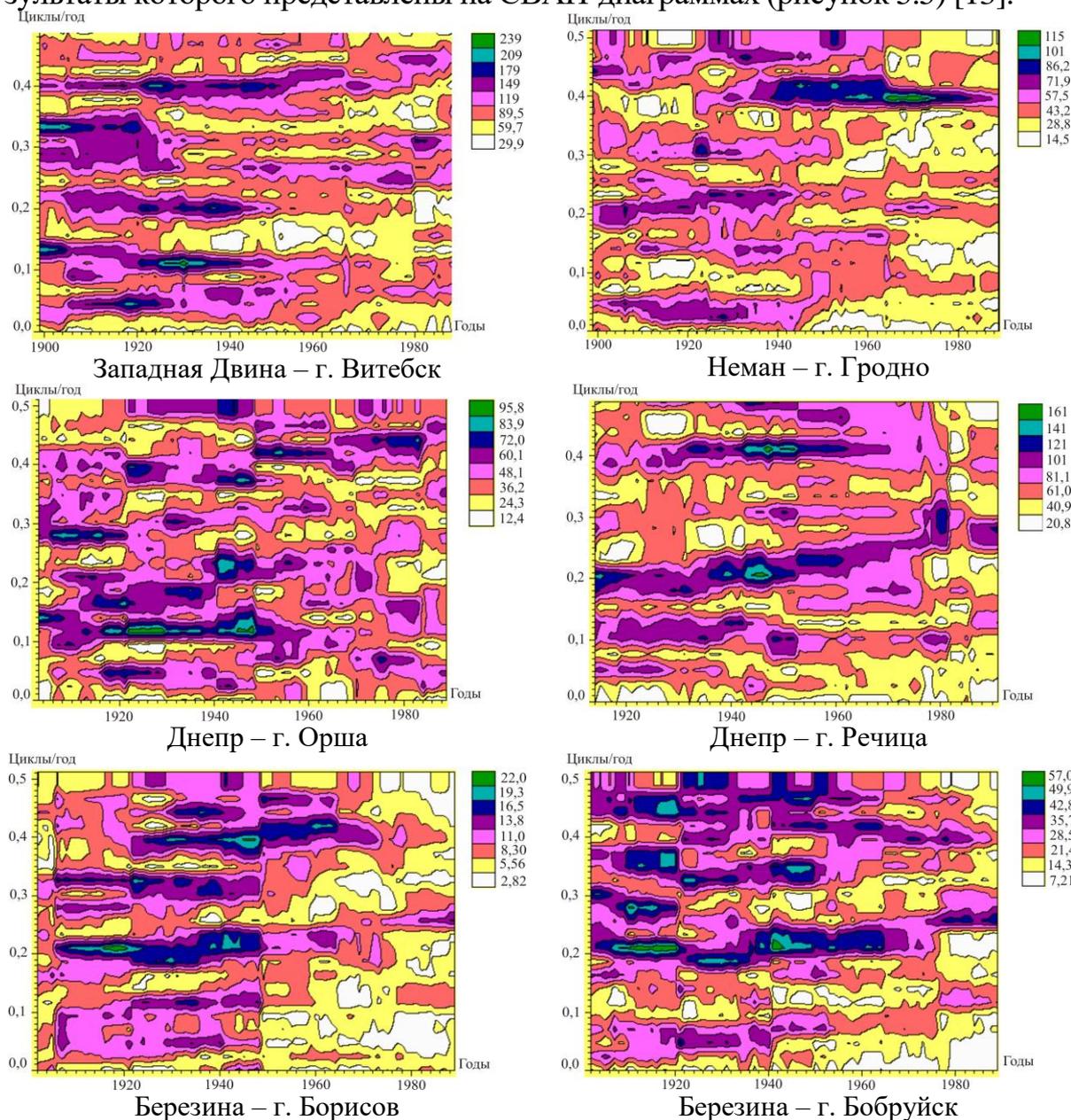


Рисунок 5.5 – СВАН-диаграммы максимальных расходов воды дождевых паводков

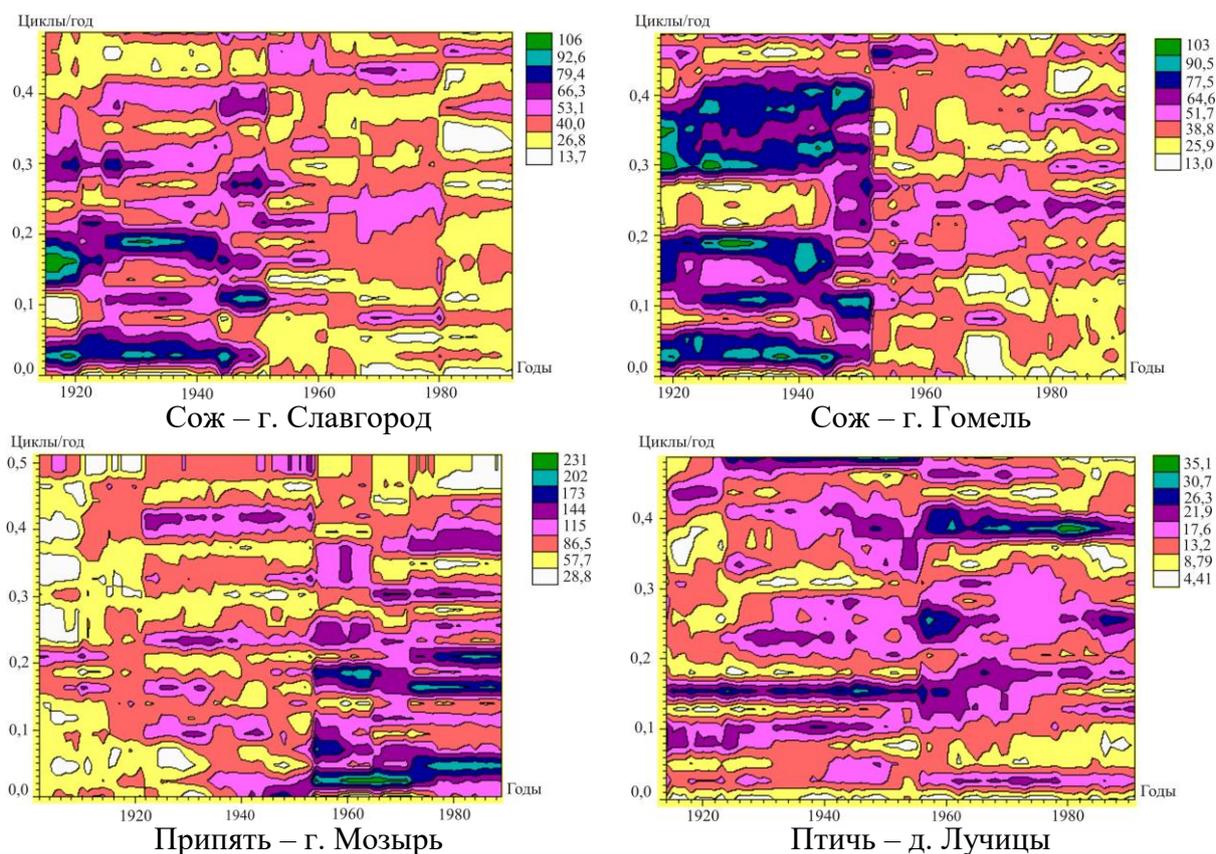


Рисунок 5.5. Окончание

Анализ СВД-диаграмм максимальных расходов воды дождевых паводков показал, что для р. Западная Двина – г. Витебск характерны циклы продолжительностью 2 (1910–1950), 3 (1898–1920), 5 (1920–1942), 7 (1898–1906), 8 (1920–1944) и 20 (1910–1926) лет. Для р. Неман – г. Гродно наиболее мощным является 2-летний цикл (1940–1984), также выделены небольшие циклы продолжительностью 3 (1920–1930), 5 (1902–1944) и 20 (1903–1913) лет.

Для р. Днепр – г. Орша характерно большое количество непродолжительных выделяющихся циклов, длительность которых составляет 2 (1949–1964, 1973–1984), 3 (1940–1948), 4 (1904–1922, 1940–1950), 5 (1930–1938), 7 (1900–1906), 8 (1914–1953) и 20 (1916–1930) лет. На р. Днепр – г. Речица выделяются циклы 2- (1931–1970) и 5-летние (1914–1954).

На р. Березина у г. Борисов характерны циклы продолжительностью 2 (1924–1965), 3 (1906–1949) и 5 (1906–1949) лет. В створе г. Бобруйск выделены циклы 2- (1910–1930, 1922–1931), 3- (1902–1906, 1910–1920, 1940–1950), 4- (1908–1920, 1976–1989) и 5-летние (1904–1965, 1923–1936). На р. Березина слабовыраженным является также 20-летний цикл (1920–1940).

Для р. Сож у г. Славгород характерны циклы продолжительностью 5 (1918–1943), 6 (1915–1925), 9 (1944–1952) и 33 (1915–1948) года; в створе

г. Гомель – продолжительностью 2 (1938–1952), 3 (1918–1952), 5 и 6 (1918–1946), 9 (1925–1952) и 33 (1918–1948) года.

Для р. Припять – г. Мозырь характерны циклы продолжительностью 5 (1954–1967, 1976–1989), 6 (1971–1989), 20 (1973–1989) и 33 (1954–1972) года. На р. Птичь – д. Лучицы выделены циклы длительностью 3 (1956–1989), 4 (1955–1962, 1985–1991) и 6 (1915–1960) лет.

Таким образом, для многолетних колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси наиболее распространенными являются следующие циклы:

33-летние циклы (рр. Сож – гг. Славгород и Гомель, Припять – г. Мозырь);

20-летние циклы (рр. Западная Двина – г. Витебск, Неман – г. Гродно, Днепр – г. Орша, Березина – гг. Борисов и Бобруйск, Припять – г. Мозырь);

9-летние циклы (рр. Сож – гг. Славгород и Гомель, Птичь – д. Лучицы);

6-летние циклы (рр. Сож – гг. Славгород и Гомель, Припять – г. Мозырь, Птичь – д. Лучицы);

5-летние циклы (на всех реках, за исключением р. Птичь – д. Лучицы);

3-летние циклы (рр. Западная Двина – г. Витебск, Неман – г. Гродно, Днепр – г. Орша, Березина – гг. Борисов и Бобруйск, Сож – г. Гомель, Птичь – д. Лучицы);

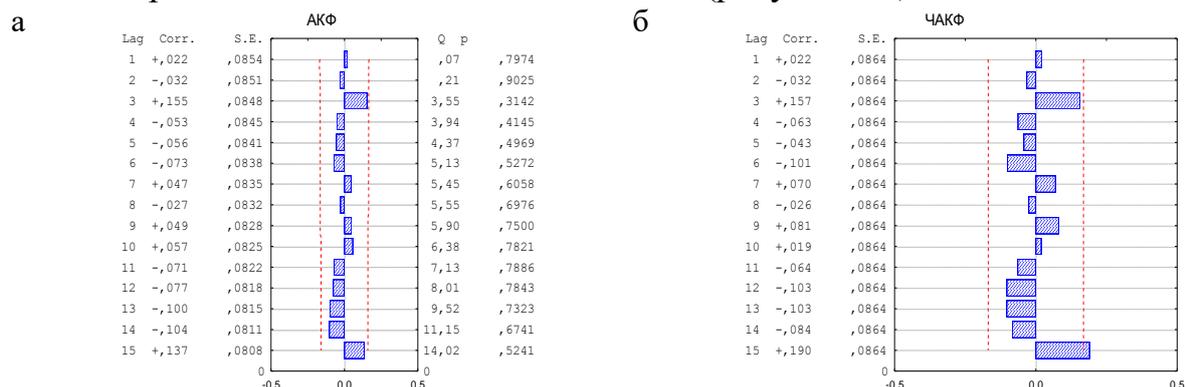
2-летние циклы (рр. Западная Двина – г. Витебск, Неман – г. Гродно, Днепр – гг. Орша и Речица, Березина – гг. Борисов и Бобруйск, Сож – г. Гомель).

Минимальные амплитуды колебаний характерны для Березины, Сожа, Птичи и Днепра, максимальные – для Западной Двины и Припяти.

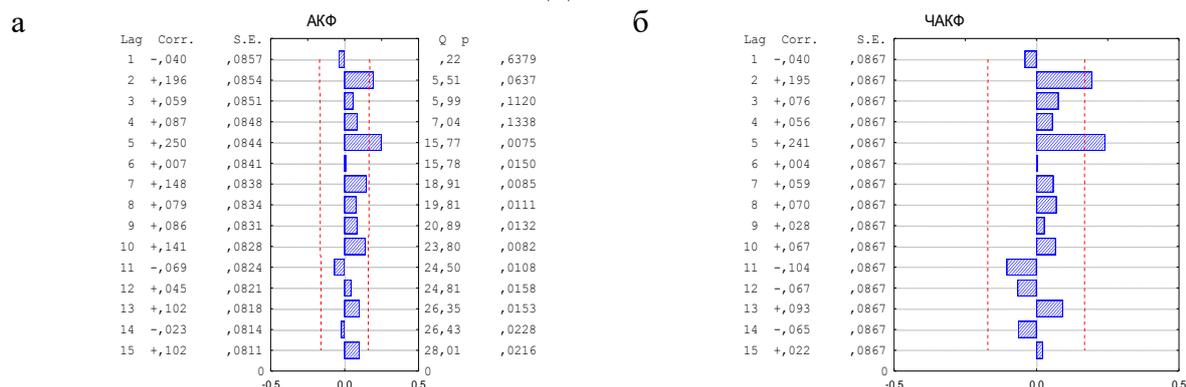
Таким образом, анализ СВАН-диаграмм максимальных расходов воды дождевых паводков показал наличие циклов продолжительностью от 2 до 33 лет. Преобладающими являются 2-, 3-, 5- (наиболее мощные и часто встречаемые) и 20-летние циклы; реже отмечаются циклы продолжительностью 6, 9 лет и 33 года. Длительность циклов во времени варьирует в пределах от 5 до 62 лет, преобладающими являются от 10 до 40 лет. Поскольку амплитуда и длительность циклов изменяются во времени, выделить устойчивые циклы не представляется возможным.

В настоящее время для описания многолетних колебаний стока в основном используются простая цепь Маркова (учитывается корреляция между смежными членами ряда) и сложная цепь Маркова (допускается наличие ближних и дальних внутрирядных связей). В этом случае ключевым моментом для описания многолетних колебаний стока является автокорреляционная функция.

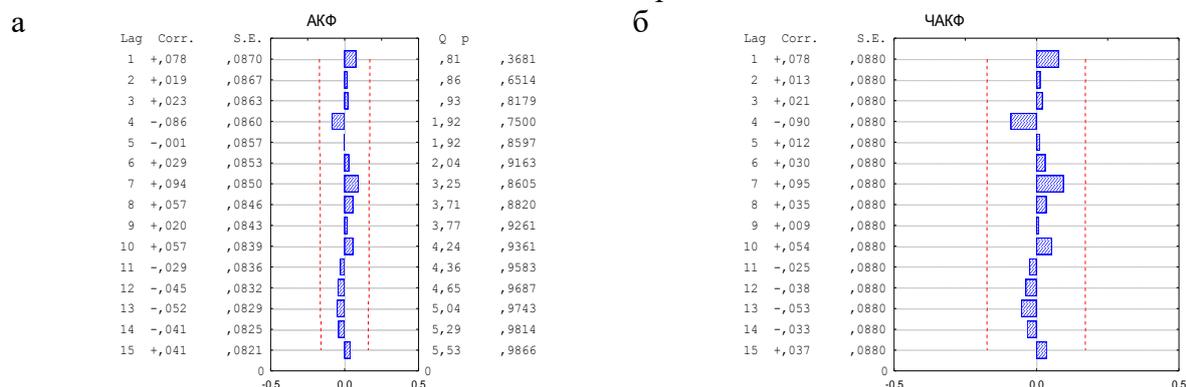
Анализ значимости коэффициентов автокорреляции максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси показал, что гипотеза независимости максимального стока дождевых паводков на 5 %-ном уровне значимости не может быть принятой. Соответственно возникает необходимость оценки особенностей внутрирядной динамики максимальных расходов воды паводков для выбора моделей, которые наилучшим образом описывают процесс их колебаний. Получены выборочные автокорреляционные функции (АКФ) и частные автокорреляционные функции (ЧАКФ) для рядов максимальных расходов воды дождевых паводков (рисунок 5.6).



Западная Двина – г. Витебск

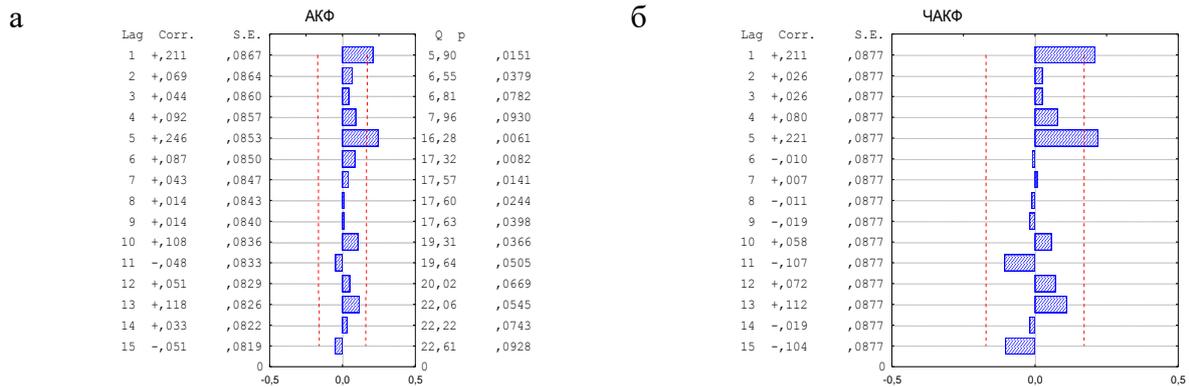


Неман – г. Гродно



Днепр – г. Орша

Рисунок 5.6 – Автокорреляционная функция (а) и частная автокорреляционная функция (б) максимальных расходов воды паводков



Припять – г. Мозырь

Рисунок 5.6. Окончание

Анализ АКФ и ЧАКФ показал, что для большинства временных рядов закономерности формирования максимального паводочного стока в многолетнем разрезе могут быть идентифицированы моделями AP(1) и AP(2), т. к. АКФ и ЧАКФ имеют значимые величины ординат при  $k \neq 1$ , тогда как все остальные значения в основном статистически незначимы и характеризуются чередованием положительных и отрицательных значений [13].

Комплексный анализ многолетних рядов максимальных расходов воды дождевых паводков с помощью АКФ и ЧАКФ послужил основанием для разработки прогнозных моделей в виде сложной цепи Маркова. Процессы паводкообразования обладают региональной обусловленностью, связанной с локальностью выпадения осадков, вызывающих паводки. Поэтому универсальную математическую модель, пригодную повсеместно, построить не представляется возможным. Модели паводков должны иметь региональный характер. В связи с этим модели строились отдельно по речным бассейнам. Частный вид моделей представлен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Прогнозные модели рек Беларуси

Река – створ	Модель	R
Зап. Двина – г. Витебск	$Q_t = -0,24 \cdot Q_{t-6} - 0,23 \cdot Q_{t-21} - 0,19 \cdot Q_{t-23} + 0,20 \cdot Q_{t-25} - 0,23 \cdot Q_{t-42} + 762 + \xi(t)$	0,51
Улла – д. Бочейково	$Q_t = 0,41 \cdot Q_{t-16} + 20,8 + \xi(t)$	0,46
Нача – д. Нача	$Q_t = -0,36 \cdot Q_{t-6} + 0,32 \cdot Q_{t-16} + 0,32 \cdot Q_{t-35} + 1,38 + \xi(t)$	0,52
Неман – г. Гродно	$Q_t = 0,19 \cdot Q_{t-2} + 0,33 \cdot Q_{t-5} + 147 + \xi(t)$	0,40
Неман – г. Столбцы	$Q_t = -0,23 \cdot Q_{t-6} + 0,30 \cdot Q_{t-15} + 0,32 \cdot Q_{t-31} + 13,3 + \xi(t)$	0,57
Днепр – г. Могилев	$Q_t = 0,41 \cdot Q_{t-29} + 142 + \xi(t)$	0,42
Днепр – г. Речица	$Q_t = 0,25 \cdot Q_{t-17} + 0,23 \cdot Q_{t-29} + 206 + \xi(t)$	0,31
Березина – г. Борисов	$Q_t = 0,22 \cdot Q_{t-10} + 0,20 \cdot Q_{t-25} - 0,20 \cdot Q_{t-39} + 36,7 + \xi(t)$	0,38
Сож – г. Гомель	$Q_t = -0,19 \cdot Q_{t-39} + 243 + \xi(t)$	0,26

Продолжение таблицы 5.3

Уза – д. Прибор	$Q_t = -0,26 \cdot Q_{t-15} + 0,36 \cdot Q_{t-16} - 0,24 \cdot Q_{t-23} - 0,20 \cdot Q_{t-25} + 0,17 \cdot Q_{t-31} + 5,75 + \xi(t)$	0,74
Припять – г. Мозырь	$Q_t = 0,20 \cdot Q_{t-1} + 0,24 \cdot Q_{t-5} + 224 + \xi(t)$	0,32
Горынь – д. Мал. Викоровичи	$Q_t = 0,31 \cdot Q_{t-5} + 151 + \xi(t)$	0,32
Птичь – д. Лучицы	$Q_t = -0,27 \cdot Q_{t-22} + 0,21 \cdot Q_{t-27} - 0,24 \cdot Q_{t-33} + 89,8 + \xi(t)$	0,41
Оресса – д. Андреевка	$Q_t = -0,34 \cdot Q_{t-9} - 0,34 \cdot Q_{t-25} - 0,26 \cdot Q_{t-28} + 60,2 + \xi(t)$	0,53

Примечание:  $Q_t$  – максимальные расходы воды паводков в  $t$ -й год,  $R$  – коэффициенты множественной корреляции

Коэффициент множественной корреляции  $R$  для полученных моделей принимает значения от 0,26 (р. Сож – г. Гомель) до 0,74 (р. Уза – д. Прибор). Анализ автокорреляционных функций показал, что для моделей характерно наличие как дальних, так и ближних внутрирядных связей.

Таким образом, многолетние колебания максимальных расходов воды дождевых паводков на реках Беларуси характеризуются наличием циклов продолжительностью от 2 до 33 лет. Поскольку амплитуда и длительность циклов изменяются во времени, выделить устойчивые циклы не представляется возможным, что требует дальнейших более детальных исследований. Разработка прогнозных моделей позволит совершенствовать систему мониторинга и минимизировать возможный ущерб от наводнений, вызываемых дождевыми паводками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа многолетних колебаний максимальных расходов воды паводков установлено, что в период 1966–2010 гг. по сравнению с периодом от начала инструментальных наблюдений до 1965 г. на большинстве рек Беларуси произошло уменьшение величины максимальных расходов воды дождевых паводков на 10–30 %, за исключением рек бассейна Припяти, где их величина в результате проведения крупномасштабных мелиораций увеличилась на 10–20 %. В период современного потепления климата (1988–2010) по сравнению с предшествующим периодом (1966–1987) на реках севера и северо-востока страны произошло увеличение максимальных расходов воды дождевых паводков на 20–30 %, на реках юга и запада – уменьшение на 10–30 %. Установлена связь изменения величины дождевых паводков с изменением количества выпадающих осадков. Так, произошел рост паводкообразующих осадков в период современного потепления климата на севере и северо-востоке Беларуси, уменьшение – на юго-западе. Выявлено также перераспределение суточных осадков 1 %-ной обеспеченности по месяцам года.

На большинстве рек Беларуси выявлена тенденция к росту величины максимальных расходов воды зимних паводков за период инструментальных наблюдений. При этом их абсолютная величина существенно не увеличилась по сравнению с более ранними периодами в связи с увеличением их частоты. Исключение составляют реки бассейна Западной Двины, для которых характерен заметный рост на 20–40 % величины максимальных расходов воды зимних паводков в период современного потепления климата.

Построена карта модулей максимальных расходов воды дождевых паводков 10 %-ной обеспеченности, отражающая пространственную структуру распределения величины паводков по территории страны. Так, средние значения модулей на реках Беларуси составляют 20–25 л/(с·км<sup>2</sup>). Наибольшие они в бассейнах Западной Двины и Днестра (30–35 л/(с·км<sup>2</sup>)), наименьшие – в бассейне Припяти (10–20 л/(с·км<sup>2</sup>)).

Установлена цикличность колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков. Выявлены как короткопериодические 2-, 3-, 5-, 6-летние циклы, так и длиннопериодические 20- и 33-летние циклы. Поскольку амплитуда и длительность циклов изменяются во времени, выделить устойчивые циклы не представляется возможным.

Проведено районирование территории Беларуси по синхронности колебаний максимальных расходов воды дождевых паводков. Выделено четыре района синхронных колебаний дождевого паводочного стока: Двинско-Днепровский, Неманский, Бугский и Припятский, для которых харак-

терны сходные тенденции к изменениям величины паводков и чередование периодов с повышенным либо пониженным дождевым паводочным стоком. На реках Двинско-Днепровского района в периоды потеплений климата (потепление Арктики и современное), которые сопровождались увеличением количества выпадающих атмосферных осадков, наблюдался рост величины дождевых паводков, в период 1966–1987 гг. – снижение. Реки Неманского района имеют резко выраженную тенденцию к снижению величины дождевых паводков, особенно заметную с середины 80-х гг. XX в. На реках Бугского района, также имеющих тенденцию к снижению величины паводков, в многолетнем ряду очень заметно выделяются большие дождевые паводки, которые наблюдались на всех реках района в 1970-е гг. Бугский район соответствует зоне уменьшения атмосферных осадков в современный период потепления климата. На реках Припятского района наибольшие паводки отмечались в период 1966–1987 гг., при этом большое влияние на величину дождевых паводков оказало проведение крупномасштабной мелиорации.

Анализ гидрографов дождевых паводков показал, что наиболее часто на реках Беларуси отмечаются однопиковые паводки. Вероятность появления двухпиковых паводков составляет около 20 %, трехпиковых – около 10 %. Паводки с более чем тремя пиками на реках страны отмечаются крайне редко. Средняя продолжительность дождевых паводков на малых и средних реках Беларуси составляет около 32 суток, на больших – около 50 суток, наибольшая она в бассейне Припяти, наименьшая – в бассейне Немана и Западного Буга.

Проанализировано соотношение величин максимальных расходов воды дождевых паводков и весенних половодий. Установлено, что по величине максимального расхода воды весенние половодья превышают дождевые паводки примерно в 3–4 раза. При этом превышение половодий высокими дождевыми паводками возможно при обеспеченности половодий на больших реках более 50 % (на Припяти – более 35 %, на Соже – более 65 %), на малых и средних реках – более 25–30 % (на левых притоках Днепра – более 40 %, на правых притоках Припяти – более 10 %). Наиболее часто дождевые паводки превышают половодья и формируют наибольшие расходы воды в году в бассейнах Припяти, Западного Буга и Вилии, реже всего – в бассейне Днепра, особенно на его левых притоках. С середины 80-х гг. XX в. на всех реках Беларуси наблюдается тенденция к увеличению частоты превышения половодий дождевыми паводками.

Разработаны модели определения модулей максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений с использованием гидрографических характеристик водосборов рек, которые являются более эффективными по сравнению

с формулами, рекомендуемыми в нормативных документах. Выявлена роль различных гидрографических характеристик водосборов в формировании модулей максимальных расходов вод дождевых паводков.

Усовершенствована методика построения гидрографов дождевых паводков на реках Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, которая позволяет получать приемлемые для практики результаты без привлечения рек-аналогов. Построена карта слоя стока за паводок 10 %-ной обеспеченности, и рассчитаны коэффициенты перехода к другим расчетным обеспеченностям. Проведена дифференциация коэффициентов несимметричности гидрографов паводков (необходимых для определения коэффициента формы гидрографа, абсциссы и ординаты расчетного гидрографа) и коэффициентов, учитывающих неравенство параметров слоя стока за паводок и максимальных расходов воды дождевых паводков.

Повышение хозяйственной ценности пойменных территорий из-за осуществления мелиоративных мероприятий, развития населенных пунктов, транспортной и коммуникационной инфраструктуры способствуют росту ущербов от наводнений. Выявленные в ходе исследования тенденции в изменении величины максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси в современных условиях могут быть использованы при обосновании, разработке и реализации мероприятий по уменьшению негативных последствий и ущербов, вызываемых дождевыми паводками, а также при разработке комплексной программы по предотвращению ущербов от наводнений, создании единой системы планирования и управления противопаводковой защитой в масштабах страны. Дальнейшее изучение процессов паводкообразования будет направлено на совершенствование прогнозирования.

## ГЛОССАРИЙ

*Водный режим* – изменение во времени (обычно за год) уровней и расходов воды в реках или объемов воды в озерах и болотах.

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

*Гидрограф паводка* – график, характеризующий изменение расходов воды за период паводка.

*Гидрографическая сеть* – совокупность рек и других постоянно и временно действующих водотоков, а также озер на какой-либо территории.

*Гидрологические характеристики* – количественные оценки элементов гидрологического режима и морфологических особенностей морских бассейнов.

*Гидрологический режим* – закономерные изменения состояния водного объекта во времени, обусловленные физико-географическими свойствами бассейна и в первую очередь его климатическими условиями.

*Гидрологическое районирование* – разделение земной поверхности на отдельные районы, однородные по характеру гидрологического режима поверхностных и грунтовых вод.

*Коэффициент автокорреляции  $r(\tau)$*  – характеризует связь ряда гидрологических величин с этим же рядом, сдвинутым на некоторый интервал времени  $\tau$ .

*Коэффициент асимметрии  $C_s$*  – безразмерный статистический параметр, характеризующий степень несимметричности распределения ряда рассматриваемой гидрометеорологической величины относительно ее среднего значения.

*Коэффициент вариации (изменчивости)  $C_v$*  – безразмерный статистический параметр, характеризующий изменчивость гидрометеорологической величины относительно ее среднего значения.

*Коэффициент корреляции  $r$*  – мера тесноты связи между рассматриваемыми характеристиками (переменными).

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

*Кривая распределения* – кривая, графически изображающая относительные повторяемости, с которыми случайная величина принимает свои различные возможные значения.

*Максимальный расход воды* – наибольший расход воды половодья или паводка.

*Межень* – фаза водного режима реки, наблюдающаяся в летне-осенний или зимний сезоны, характеризующаяся наличием относительно малых, устойчивых по величине расходов воды.

*Модуль стока  $q$ ,  $\text{м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$*  – количество воды, стекающей в единицу времени с единицы площади водосбора.

*Наводнение* – затопление территории водой в результате подъема уровня воды в реке или озере, которое причиняет материальный ущерб, наносит урон здоровью населения или приводит к гибели людей.

*Наибольший дождевой паводок* – дождевой паводок, имеющий наиболее значительный максимальный расход воды среди всех паводков данного года (периода года).

*Обеспеченность гидрологической характеристики (вероятность превышения)* – вероятность того, что рассматриваемое значение гидрологической характеристики может быть превышено среди совокупности всех возможных ее значений.

*Объем стока  $W$ ,  $\text{км}^3$  или  $\text{м}^3$  (для малых рек)* – количество воды, протекающее через расчетный створ водотока (или в пункте наблюдения).

*Паводок* – фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года и характеризуется интенсивным, обычно кратковременным, увеличением расходов и уровней воды, вызывается дождями (дождевой паводок) или снеготаянием во время оттепелей.

*Период инструментальных наблюдений* – период, в течение которого ведутся регулярные наблюдения за гидрологическими характеристиками рек Гидрометеорологической службой страны.

*Половодье* – фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды и вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и атмосферных осадков.

*Расход воды  $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$*  – объем воды, протекающий через живое сечение потока в единицу времени.

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

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

*Слой стока  $h$* , мм – количество воды, стекающей с водосбора за определенный период времени и равномерно распределенной по площади водосбора.

*Среднеквадратическое отклонение (погрешность)  $\sigma$*  – мера рассеивания (дисперсия) значений гидрометеорологической характеристики от ее среднего значения.

*Стокообразующие осадки* – все дожди, в результате выпадения которых возникает поверхностный сток, т.е. дожди со слоем выше слоя потерь.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян, А. Б. Антропогенные факторы наводнений / А. Б. Авакян, А. А. Полюшин // Водные ресурсы. – 1989. – № 3. – С. 5–13.
2. Авакян, А. Б. Наводнения / А. Б. Авакян, А. А. Полюшин. – М. : Знание, 1989. – 46 с.
3. Авакян, А. Б. Наводнения в мире в последние годы XX в. / А. Б. Авакян, М. Н. Истомина // Водные ресурсы. – 2000. – № 5. – С. 517–523.
4. Азява, Г. В. Защита от паводковых наводнений в Белорусском Полесье. Состояние и перспектива / Г. В. Азява, В. В. Аземша // Белорусское Полесье : сб. науч.-практ. ст. – Пинск : Фонд «Белорус. Полесье», 2001. – Вып. 1. – С. 49–51.
5. Алексеев, Г. А. Обоснование формулы максимального расхода паводка / Г. А. Алексеев // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1960. – Вып. 79. – С. 18–74.
6. Алексеев, Г. А. Расчет дождевых осадков на основе применения кривых поверхностей распределения вероятностей / Г. А. Алексеев // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1950. – Вып. 26 (80). – С. 3–27.
7. Алексеев, Г. А. Расчеты паводочного стока рек СССР : практическое пособие / Г. А. Алексеев. – Л. : Гидрометеиздат, 1955. – 198 с.
8. Алексеев, Н. А. Стихийные явления в природе / Н. А. Алексеев. – М. : Мысль, 1988. – 254 с.
9. Алибегова, Ж. Д. Пространственно-временная структура полей жидких осадков / Ж. Д. Алибегова. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 229 с.
10. Андреянов, В. Г. Методические основы исследования и расчета внутригодового распределения стока / В. Г. Андреянов // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1957. – Вып. 61. – С. 30–105.
11. Андреянов, В. Г. Циклические колебания годового стока и их учет при гидрологических расчетах / В. Г. Андреянов // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1959. – Вып. 68. – С. 3–49.
12. Бабкин, В. И. Динамика стока рек Центрального района России / В. И. Бабкин, В. Н. Воробьев, Н. П. Смирнов // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 9. – С. 80–83.
13. Банерджи, С. Расчет дождевых паводков с больших бассейнов по осадкам / С. Банерджи, Д. Минтан // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Т. 1. – С. 478–485.
14. Бельчиков, В. А. Методические указания к построению математической модели формирования дождевых паводков и ее использованию для выпуска оперативных прогнозов расхода воды с помощью ЭВМ / В. А. Бельчиков, В. И. Корень, Л. С. Кучмент. – М., 1974. – 151 с.

15. Бефани, А. Н. Вопросы региональной гидрологии. Паводочный сток / А. Н. Бефани. – К. : УМК ВО, 1989. – 132 с.
16. Бефани, А. Н. Научно-методические основы расчета и прогноза дождевых паводков на территории СССР / А. Н. Бефани, Н. Ф. Бефани, Е. Д. Гопченко // Тез. докл. V Всесоюз. гидрол. съезда. – Л. : Гидрометеоздат, 1986. – С. 47–50.
17. Бефани, А. Н. Основы теории ливневого стока / А. Н. Бефани // Тр. ОГМИ, 1949. – Ч. 1, вып. 4. – С. 39–175.
18. Бефани, А. Н. Основы теории ливневого стока / А. Н. Бефани // Тр. ОГМИ, 1958. – Ч. 2, вып. 14. – 310 с.
19. Бефани, Н. Ф. Прогнозирование дождевых паводков на основе территориально общих зависимостей / Н. Ф. Бефани. – Л. : Гидрометеоздат, 1977. – 182 с.
20. Бефани, Н. Ф. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам / Н. Ф. Бефани, Г. П. Калинин. – Л. : Гидрометеоздат, 1983. – 390 с.
21. Блакітная кніга Беларусі : энцыклапедыя / Беларус. энцыкл. ; рэдкал. Н.А. Дзісько [і інш.]. – Мінск : Беларус. энцыкл., 1994. – 415 с.
22. Богомазова, З. П. Исследование выдающихся дождей Северо-Западного района Европейской территории СССР и их зависимости от площади распространения / З. П. Богомазова, З. П. Петрова // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоздат, 1947. – Вып. 1 (55). – С. 106–143.
23. Боровиков, В. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. 2-е изд. (+CD) / В. Боровиков. – СПб., 2003. – 688 с.
24. Булавко, А. Г. Влияние осушения болот на элементы водного баланса рек Белорусского Полесья / А. Г. Булавко ; под ред. В. В. Романова. – М. : Гидрометеоздат. – 1961. – 152 с.
25. Булавко, А. Г. Водный баланс речных бассейнов / А. Г. Булавко. – Л. : Гидрометеоздат, 1971. – 304 с.
26. Булавко, А. Г. Водорегулирующее значение болот и последствия их осушения / А. Г. Булавко, Б. С. Маслов // Гидротехника и мелиорация. – 1982. – № 8. – С. 53–56.
27. Виноградов, Ю. Б. Метод расчета максимальных расходов дождевых паводков / Ю. Б. Виноградов // Тр. КазНИГМИ. – Л. : Гидрометеоздат, 1970. – Вып. 36. – С. 103–109.
28. Виноградов, Ю. Б. Метод расчета характеристик дождевых паводков / Ю. Б. Виноградов // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеоздат, 1969. – Т. 1. – С. 334–344.
29. Виноградов, Ю. Б. Современные проблемы гидрологии / Ю. Б. Виноградов, Т. А. Виноградова. – М. : Академия, 2008. – 320 с.

30. Вишневский, П. Ф. Расчет максимального стока дождевых паводков на территории Украины и Молдавии (при отсутствии или недостаточности гидрометрических данных) / П. Ф. Вишневский // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Т. 1. – С. 515–524.
31. Владимиров, А. М. Гидрологические расчеты / А. М. Владимиров. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 365 с.
32. Владимиров, А. М. Опасные гидрологические явления / А. М. Владимиров // Проблемы современной гидрологии : сб. науч. тр. – СПб. : Изд. РГГМУ, 2004. – С. 60–65.
33. Водогрецкий, В. Е. Антропогенное изменение стока малых рек / В. Е. Водогрецкий. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 176 с.
34. Возможные изменения водных ресурсов и водного режима в бассейне Днепра при различных сценариях потепления климата / В. Ю. Гергиевский [и др.] // Водные ресурсы и устойчивое развитие экономики Беларуси : материалы науч.-практ. конф. – Минск : ЦНИИКИВР, 1996. – С. 21–48.
35. Войцехович, В. О. Сучасні зміни максимального стоку річок Українського Полісся / В. О. Войцехович, Л. І. Лузан // Наук. праці УкрНДГМІ. – 1999. – Вип. 247. – С. 125–135.
36. Волчек, А. А. Влияние гидрографических факторов на величину дождевых паводков рек Беларуси / А. А. Волчек, Т. А. Шелест // Мелиорация. – 2010. – № 1 (63). – С. 36–48.
37. Волчек, А. А. Водные ресурсы Брестской области / А. А. Волчек, М. Ю. Калинин. – Минск : Изд. центр БГУ, 2002. – 440 с.
38. Волчек, А. А. Закономерности формирования элементов водного баланса речных водосборов Беларуси в современных условиях : автореф. дис. ... докт. геогр. наук : 25.00.27 / А. А. Волчек ; Ин-т географии РАН. – М., 2006. – 38 с.
39. Волчек, А. А. Минимальный сток рек Беларуси : монография / А. А. Волчек, О. И. Грядунова. – Брест : Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина, 2010. – 300 с.
40. Волчек, А. А. Многолетние колебания паводочного стока на р. Припять / А. А. Волчек, Т. А. Шелест // Прыроднае асяроддзе Палесся: аблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. прац / Палескі аграрна-экалагічны інстытут НАН Беларусі ; рэдкал.: М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Брэст : Альтернатыва, 2008. – Т. 2. – С. 8–12.
41. Волчек, А. А. Моделирование гидрографов дождевых паводков рек Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений / А. А. Волчек, Т. А. Шелест // Вестн. Брест. гос. технич. ун-та. Сер. Водохо-

зьяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2013. – № 2 (80). – С. 3–7.

42. Волчек, А. А. О превышении максимальных расходов воды дождевых паводков над расходами весеннего половодья на реках Беларуси / А. А. Волчек, Т. А. Шелест // Весн. Брэсц. ун-та. – Сер. 5. Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – 2013. – № 1. – С. 43–51.

43. Волчек, А. А. Пространственно-временные колебания дождевых паводков на реках Белоруссии / А. А. Волчек, Т. А. Шелест // Изв. РАН. Сер. географическая. – 2012. – № 1. – С. 68–80.

44. Волчек, А. А. Синхронности в колебаниях стока рек Беларуси и его оценка / А. А. Волчек // Природные ресурсы : НАН, Минприроды. – 2001. – № 2. – С. 25–32.

45. Волчек, А. А. Формирование зимних паводков на реках Беларуси / А. А. Волчек, Т. А. Шелест // Уч. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. – 2012. – № 25. – С. 5–19.

46. Волчек, Ан. А. Закономерности колебаний максимального стока рек Беларуси и методы прогнозирования его трансформации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.16 / Ан. А. Волчек ; БрГТУ. – Брест, 2009. – 27 с.

47. Волчек, Ан. А. Оценка изменения максимального стока весеннего половодья рек Беларуси / Ан. А. Волчек, В. В. Лукша // Изв. НАН Беларуси. Сер. биол. наук. – 2005. – № 5, ч. 1. – С. 47–50.

48. Воскресенский, К. П. Принципы расчета гидрографов паводков / К. П. Воскресенский // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Т. 1. – С. 227–233.

49. Гарцман, Б. И. Прогноз гидрографа дождевых паводков на реках Дальнего Востока / Б. И. Гарцман, Т. С. Губарева // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 5. – С. 70–80.

50. Геаграфія Беларусі : энцыкл. даведнік / рэдкал. М. М. Курловіч [і інш.]. – Мінск : Беларус. энцыкл., 1992. – 382 с.

51. Георгиевский, Ю. М. Гидрологические прогнозы : учебник / Ю. М. Георгиевский, С. В. Шаночкин. – СПб. : Изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.

52. Гирс, А. А. Макроциркуляционный метод долгосрочных прогнозов / А. А. Гирс. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 488 с.

53. Гирс, А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы / А. А. Гирс. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 280 с.

54. Гопченко, Е. Д. Гидрология с основами мелиорации / Е. Д. Гопченко, А. В. Гушля. – Л. : Гидрометеиздат, 1989. – 296 с.

55. Горбачев, П. Ф. Методы расчета ливневого стока / П. Ф. Горбачев. – М. : Изд. Власть Советов при президиуме ВЦИК, 1937. – 167 с.

56. Горошко, Н. В. Факторы и закономерности пространственной корреляции годового стока рек бассейна Верхней Оби / Н. В. Горошко, Д. А. Бураков // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 1. – С. 101–109.

57. Горошков, И. Ф. Гидрологические расчеты / И. Ф. Горошков. – Л. : Гидрометеиздат, 1979. – 431 с.

58. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши // Государственный комитет по гидрометеорологии Республики Беларусь. Т. III. Ч. 1 Реки и каналы. Ч. 2. Озера и водохранилища.

59. Гриневич, Г. А. Композиционное моделирование гидрографов / Г. А. Гриневич, Н. А. Петелина, А. Г. Гриневич. – М. : Наука, 1972. – 164 с.

60. Давыдов, Л. К. Общая гидрология / Л. К. Давыдов, А. П. Дмитриева, Н. Г. Конкина. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – 462 с.

61. Данилович, И. С. Географические закономерности формирования водного режима рек Беларуси под влиянием атмосферной циркуляции : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.23 / И. С. Данилович ; Бел. гос. ун-т. – Минск, 2010. – 24 с.

62. Дружинин, В. С. Районирование территории Северо-Запада РФ по условиям формирования годового стока / В. С. Дружинин, А. В. Сикан // Водные ресурсы Северо-Западного региона России : сб. науч. тр. / РГГМУ ; под ред. А. М. Владимирова, В. Н. Воробьева. – СПб. : Изд. РГГМУ, 1999. – Вып. 121. – С. 24–29.

63. Дружинин, В. С. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации / В. С. Дружинин, А. В. Сикан. – СПб. : Изд. РГГМУ, 2001. – 168 с.

64. Евстигнеев, В. М. Многолетние колебания и норма стока реки Шилки в связи с особенностями развития основных форм циркуляции / В. М. Евстигнеев // Проблемы речного стока. – М. : Изд. МГУ. – 1968. – С. 31–34.

65. Евстигнеев, В. М. Речной сток и гидрологические расчеты / В. М. Евстигнеев. – М. : Изд-во МГУ, 1990. – 300 с.

66. Железняк, И. А. Регулирование паводочного стока / И. А. Железняк. – Л. : Гидрометеиздат, 1965. – 326 с.

67. Железняков, Г. В. Влияние болот на максимальные расходы рек / Г. В. Железняков, Н. Н. Захаровская // Метеорология и гидрология. – 1967. – № 7. – С. 68–77.

68. Железняков, Г. В. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока / Г. В. Железняков, Т. А. Неговская, Е. Е. Овчаров ; под ред. Г. В. Железнякова. – М. : Колос, 1984. – 205 с.

69. Жук, В. А. Оценка синхронности многолетних колебаний годового стока на основе анализа корреляционной матрицы / В. А. Жук, В. А. Скор-

няков // Расчеты речного стока (Методы пространственного обобщения). – М. : Изд. МГУ, 1984. – С. 6–21.

70. Зайков, Б. Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время / Б. Д. Зайков. – Л. : Гидрометеиздат, 1954. – 135 с.

71. Зайков, Б. Д. Очерки гидрологических исследований в России / Б. Д. Зайков ; под ред. А. П. Доманицкого. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – 326 с.

72. Заруцкая, И. П. Картографирование природных условий и ресурсов / И. П. Заруцкая. – М. : Недра, 1988. – 299 с.

73. Зимонт, И. Л. Изучение процессов формирования дождевых паводков на застроенных территориях / И. Л. Зимонт, Н. П. Лобанская // Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда : в 11 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – Т. 3. – С. 445–452.

74. Иванов, А. Н. Гидрология и регулирование стока / А. Н. Иванов, Т. А. Неговская. – М. : Колос, 1979. – 384 с.

75. Исмайлов, Г. Х. Анализ многолетних колебаний годового стока Волги / Г. Х. Исмайлов, В. М. Федоров // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 5. – С. 517–525.

76. Казакевич, Д. И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии / Д. И. Казакевич. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 320 с.

77. Кайсл, Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных / Ч. Кайсл. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 138 с.

78. Калинин, В. Г. Оценка необходимой продолжительности периода наблюдений при изучении зимнего стока рек / В. Г. Калинин, Н. А. Трофимов // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38, № 2. – С. 142–147.

79. Калинин, Г. П. Циклические колебания стока рек Северного полушария / Г. П. Калинин, А. И. Давыдова // Проблемы речного стока. – М. : Изд. Моск. ун-та, 1968. – С. 9–22.

80. Киндюк, Б. В. Исследование процесса водообразования высоких дождевых паводков / Б. В. Киндюк // Тр. Одесского политехнич. ун-та. – 2002. – Вып. 2 (18). – С. 188–193.

81. Климат Беларуси / под ред. В. Ф. Логинова. – Минск : Ин-т геол. наук АН Беларуси, 1996. – 234 с.

82. Клюева, К. А. Влияние осушительной мелиорации на гидрогеологический режим ряда рек Белоруссии / К. А. Клюева // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – Вып. 208. – С. 187–211.

83. Клюева, К. А. Влияние осушительных мелиораций на годовой сток рек Белоруссии / К. А. Клюева, Ю. М. Покумейко // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 1. – С. 61–69.

84. Клюева, К. А. Оценка влияния осушительных мелиораций на водный режим рек Белоруссии / К. А. Клюева, Ю. М. Покумейко // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – № 16. – С. 62–97.
85. Крицкий, С. Н. Об основах методики расчета максимального стока / С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Т. 1. – С. 18–32.
86. Кузин, П. С. Географические закономерности гидрологического режима рек / П. С. Кузин, В. И. Бабкин. – Л. : Гидрометеиздат, 1979. – 200 с.
87. Кузин, П. С. Закономерности распределения дождевых паводков на территории СССР / П. С. Кузин // Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда : в 11 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – Т. 2. – С. 388–396.
88. Кузин, П. С. Циклические колебания стока рек северного полушария / П. С. Кузин. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 179 с.
89. Кузин, П. С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР / П. С. Кузин. – Л. : Гидрометеиздат, 1960. – 455 с.
90. Куксин, И. Е. Оценка физически возможных максимумов дождевого стока / И. Е. Куксин // Паводки и защита от них : тез. докл. науч.-техн. семинара-совещания, Хабаровск, 12–14 авг. 1968 г. / М-во мелиорации и водного хоз-ва СССР. – М., 1968. – С. 27–30.
91. Кучмент, Л. С. Математическое моделирование речного стока / Л. С. Кучмент. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 191 с.
92. Кучмент, Л. С. Модели процессов формирования речного стока / Л. С. Кучмент. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 144 с.
93. Кучмент, Л. С. Формирование речного стока. Физико-математические модели / Л. С. Кучмент, В. Н. Демидов, Ю. Г. Мотовилов. – М. : Наука, 1983. – 216 с.
94. Лалыкин, Н. В. Расчет максимальных расходов дождевых паводков на малых реках и временных водотоках Украинского Полесья / Н. В. Лалыкин, Я. А. Мольчак // Тр. УкрНИГМИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – Вып. 149. – С. 78–89.
95. Лихацевич, А. П. Мелиорация земель в Беларуси / А. П. Лихацевич, А. С. Мееровский, Н. К. Вахонин. – Минск : БелНИИМиЛ, 2001. – 308 с.
96. Лобанов, В. А. Определение расчетных гидрологических характеристик с учетом исторических максимумов / В. А. Лобанов, В. Е. Беликов // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 2. – С. 89–99.
97. Лобанов, В. А. Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов / В. А. Лобанов, В. Н. Никитин // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 11. – С. 60–69.

98. Лобанова, А. Г. Пространственные корреляционные функции речного стока рек бассейна Днепра / А. Г. Лобанова, А. В. Рождественский // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – № 11. – С. 93–113.
99. Логинов, В. Ф. Анализ и моделирование гидрографов дождевых паводков рек Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Т. А. Шелест // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42, № 3. – С. 268–278.
100. Логинов, В. Ф. Весенние половодья на реках Беларуси: пространственно-временные колебания и прогноз / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Ан. А. Волчек. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 244 с.
101. Логинов, В. Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек. – Минск : Тонпик, 2006. – 160 с.
102. Логинов, В. Ф. Изменения климата Беларуси и их последствия / В. Ф. Логинов, Г. И. Сачок, В. С. Микуцкий. – Минск : Тонпик, 2003. – 330 с.
103. Логинов, В. Ф. Климатические исследования в институте / В. Ф. Логинов // Природопользование : сб. науч. тр. / Ин-т природопользования НАН Беларуси ; гл. ред. А. К. Карабанов. – Минск, 2012. – Вып. 22. – С. 123–140.
104. Логинов, В. Ф. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, П. В. Шведовский. – Брест : Изд. БГТУ, 2004. – 301 с.
105. Логинов, В. Ф. Причины и следствия климатических изменений / В. Ф. Логинов. – Минск : Навука і тэхніка, 1992. – 319 с.
106. Логинов, В. Ф. Спектрально-временной анализ уровня режима озер и колебаний расходов воды крупных рек Беларуси / В. Ф. Логинов, В. Ф. Иконников // Природопользование : сб. науч. тр. // Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии НАН Беларуси ; под ред. И. И. Лиштвана, В. Ф. Логинова. – Минск : Тонпик, 2003. – Вып. 9. – С. 25–33.
107. Лук'янець, О. І. Річки правобережжя Прип'яті в періоди високої водності: повторюваність дощових паводків та особливості гідрологічного режиму / О. І. Лук'янець, М. М. Сусідко // Наук. праці УкрНДГМІ. – 1999. – Вип. 247. – С. 136–143.
108. Марпл-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.
109. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 248 с.
110. Международный симпозиум по паводкам и их расчетам / отв. ред. А. П. Доманицкий. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 638 с.
111. Мелиорация и освоение поймы Припяти / А. Е. Волков [и др.] ; под ред. С. Г. Скоропанова, Г. Д. Горбутовича. – Минск : Ураджай, 1982. – 247 с.

112. Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета / под ред. В. Д. Быкова, Г. П. Калинина. – М. : Изд-во МГУ, 1967. – 280 с.
113. Мониторинг, использование и управление водными ресурсами бассейна р. Припять / под общ. ред. М. Ю. Калинина, А. Г. Ободовского. – Мн. : Белсэнс, 2003. – 269 с.
114. Набиванец, Ю. Б. Высокие половодья и паводки в бассейне р. Стырь / Ю. Б. Набиванец, Л. А. Горбачева, В. Н. Корнеев // Наук. праці УкрНДГМІ, 2010. – Вып. 259. – С. 217–230.
115. Нежиховский, Р. А. Наводнения на реках и озерах / Р. А. Нежиховский. – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – 184 с.
116. Нежиховский, Р. А. Руслловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды (Методические основы и практика прогнозов паводочно-го стока рек) / Р. А. Нежиховский. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 476 с.
117. Округ, С. И. Защита от наводнений / С. И. Округ // Белорусское Полесье : сб. науч.-практ ст. / Пинск. Фонд «Белорусское Полесье», 2001. – Вып. 1. – С. 60–62.
118. Определение расчетных гидрологических характеристик : пособие П1-98 к СНиП 2.01.14-83. – Минск : М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2000. – 174 с.
119. Попов, Е. Г. Гидрологические прогнозы / Е. Г. Попов. – 2-е изд. – Л. : Гидрометеиздат, 1979. – 256 с.
120. Природа Беларуси : энциклопедия : в 3 т. – Минск : Беларус. энцыкл., 2010. – Т. 2 : Климат и вода. – 504 с.
121. Природная среда Беларуси / под ред. В. Ф. Логинова ; НАН Беларуси. Ин-т проблем использования природ. ресурсов и экологии. – Минск : БИП-С, 2002. – 424 с.
122. Проблемы Полесья / АН БССР ; редкол.: С. Х. Будыка (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1980. – Вып. 6. – 272 с.
123. Пузаченко, Ю. Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях / Ю. Г. Пузаченко. – М. : Академия, 2004. – 416 с.
124. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения : ТКП 45-3.04-168-2009(02250) // Минск : Стройтехнорм, 2010. – 55 с.
125. Раткович, Д. Я. Актуальные проблемы стохастической гидрологии / Д. Я. Раткович // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27, № 6. – С. 645–654.
126. Раткович, Д. Я. Многолетние колебания речного стока. Закономерности и регулирование / Д. Я. Раткович. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 255 с.
127. Раткович, Д. Я. Развитие вероятностных методов в гидрометеорологии / Д. Я. Раткович, М. И. Фортус // Водные ресурсы. – 1999. – Т. 26, № 5. – С. 568–582.

128. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 5. Белоруссия и Верхнее Поднепровье. – Л. : Гидрометеиздат, 1966. – Ч. 1, 2 : Основные гидрологические характеристики. – 720 с.

129. Родье, Ж. Усовершенствование методики расчета максимальных паводочных расходов воды при недостаточности гидрометрических данных / Ж. Родье // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Т. 1. – С. 304–312.

130. Рождественский, А. В. Оценка точности гидрологических расчетов / А. В. Рождественский, А. В. Ежов, А. В. Сахарюк. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 276 с.

131. Рождественский, А. В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик / А. В. Рождественский. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 269 с.

132. Рождественский, А. В. Современная проблема инженерных гидрологических расчетов по обобщению гидрологической информации в России / А. В. Рождественский, А. Г. Лобанова // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 7. – С. 81–95.

133. Рождественский, А. В. Статистические методы в гидрологии / А. В. Рождественский, А. И. Чеботарев. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.

134. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь : в 3 т. / под ред. А. И. Бедрицкого. – СПб. ; М. : Летний сад, 2009. – Т. 2 : К–П. – 310 с.

135. Ростомов, Г. Д. Метод расчета ливневого стока с малых водосборов / Г. Д. Ростомов // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Т. 1. – С. 105–114.

136. Рутковский, П. П. Проблема наводнений в Республике Беларусь и пути ее решения / П. П. Рутковский // Природные ресурсы. – 2001. – № 2. – С. 59–63.

137. Сакович, В. М. Районирование территории Северо-Запада и Карелии по синхронности многолетних колебаний минимального летне-осеннего стока / В. М. Сакович // Водные ресурсы Северо-Западного региона России : сб. науч. тр. / РГГМУ ; под ред. А. М. Владимирова, В. Н. Воробьева. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 1999. – Вып. 121. – С. 29–31.

138. Самнер, Г. Математика для географов / Г. Самнер. – М. : Прогресс, 1981. – 296 с.

139. Сачок, Г. И. Пространственно-временная структура гидрометеорологического режима Белоруссии и прилегающих регионов / Г. И. Сачок. – Минск : Наука и техника, 1980. – 221 с.

140. Сикан, А. В. Особенности применения статистических критериев для оценки однородности гидрологических рядов / А. В. Сикан, Е. Е. Пузикова // Проблемы современной гидрологии : сб. науч. тр. сотруд-

ников гидрол. фак-та / РГГМУ ; редкол.: А. М. Догановский [и др.]. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2004. – С. 173–177.

141. Смирнов, Н. П. Пространственно-временные закономерности многолетних колебаний стока рек СССР / Н. П. Смирнов // Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда : в 11 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – Т. 3. – С. 299–306.

142. Смирнова, Е. А. Расчетные характеристики осадков на территории СССР / Е. А. Смирнова // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Т. 1. – С. 105–114.

143. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик / Госстрой СССР. – М. : Стройиздат, 1985. – 36 с.

144. Соколов, А. А. О превышении максимальных расходов воды летне-осенних дождевых паводков над расходами весеннего половодья / А. А. Соколов // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1965. – Вып. 127. – С. 188–195.

145. Соколов, А. А. Очерки развития гидрологии в СССР / А. А. Соколов, А. И. Чеботарев. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 310 с.

146. Соколовский, Д. Л. О математизации гидрологии и методах математического моделирования и расчета паводков / Д. Л. Соколовский // Метеорология и гидрология. – 1971. – № 5. – С. 60–67.

147. Соколовский, Д. Л. О методах расчета максимальных паводков (состояние и перспективы развития) / Д. Л. Соколовский, И. А. Шикломанов // Тр. ЛГМИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – Вып. 39. – С. 149–162.

148. Соколовский, Д. Л. О методике расчета максимальных расходов и гидрографов весенних и дождевых паводков / Д. Л. Соколовский // Тр. ОГМИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1958. – Вып. 15. – С. 41–51.

149. Соколовский, Д. Л. Речной сток (основы теории и методики расчетов) / Д. Л. Соколовский. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. – 539 с.

150. Сомов, Н. В. Асинхронность колебаний стока крупных рек СССР / Н. В. Сомов // Метеорология и гидрология. – 1963. – № 5. – С. 14–21.

151. Соседко, М. Н. Опыт уточнения оценок повторяемости максимальных расходов воды дождевых паводков (на примере горных рек Карпат) / М. Н. Соседко, С. П. Шендрик // Тр. УкрНИГМИ. – М. : Гидрометеиздат, 1990. – Вып. 235 : Исследование, расчеты и прогнозы речного стока. – С. 50–57.

152. Срибный, М. Ф. Классификация паводков / М. Ф. Срибный // Проблемы паводков. – М. : Изд-во АН СССР. – 1959. – С. 7–12.

153. Срибный, М. Ф. Основные этапы развития учения о паводках / М. Ф. Срибный // Проблемы паводков. – М. : Изд-во АН СССР. – 1959. – С. 13–35.

154. Станкевич, А. П. Математическая модель наводнений в бассейне р. Припять / А. П. Станкевич, В. Н. Корнеев, Г. С. Чекан // Природные ресурсы. – 2001. – № 2. – С. 127–134.
155. Статистические методы в природопользовании / В. Е. Валуев [и др.]; под ред. В. Е. Валуева. – Брест : Брест. политехн. ин-т, 1999. – 252 с.
156. Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларуси : справочник / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь ; под общ. ред. М. А. Гольберга. – Минск : Белорус. науч.-исслед. центр «Экология», 2002. – 132 с.
157. Таратунин, А. А. Наводнения на территории Российской Федерации / А. А. Таратунин. – 2-е изд. – Екатеринбург : Изд-во ФГУП РосНИИВХ, 2008. – 432 с.
158. Таратунин, А. А. Наводнения по континентам и странам мира / А. А. Таратунин ; под ред. Н. И. Коронкевича. – Екатеринбург : Изд-во ФГУП РосНИИВХ, 2011. – 480 с.
159. Таратунин, А. А. Руководящие принципы по предупреждению наводнений и защите от них / А. А. Таратунин // Тр. VI Всерос. гидрол. съезда. – М. : Метеоагентство Росгидромета, 2006. – С. 241.
160. Тюрин, Ю. Н. Анализ данных на компьютере / Ю. Н. Тюрин, А. А. Макаров. – М. : ИНФРА-М, 2003. – 544 с.
161. Федорова, Е. В. К разработке региональных программ защиты населенных пунктов от наводнений / Е. В. Федорова, Г. Я. Одинцова, Н. Н. Кодраева // Тр. VI Всерос. гидрол. съезда. – М. : Метеоагентство Росгидромета, 2006. – С. 242–245.
162. Фомченков, А. К. Пространственно-временная изменчивость стока рек Европы / А. К. Фомченков // Водные ресурсы. – 1980. – № 6. – С. 52–63.
163. Франку, Ж. Опыт классификации максимальных паводков, наблюдаемых на земном шаре / Ж. Франку // Междунар. симпозиум по паводкам и их расчетам : в 2 т. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – Т. 1. – С. 562–573.
164. Христофоров, А. В. Теория случайных процессов в гидрологии / А. В. Христофоров. – М. : Изд. МГУ, 1994. – 141 с.
165. Чеботарев, А. И. Выбор и обоснование формул для расчета максимальных расходов воды дождевых паводков / А. И. Чеботарев, Б. И. Серпик // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1973. – № 11. – С. 3–47.
166. Швец, Г. И. Выдающиеся гидрологические явления на юго-западе СССР / Г. И. Швец. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 244 с.
167. Швец, Г. И. Многовековая изменчивость стока Днепра / Г. И. Швец. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 83 с.

168. Шебеко, В. Ф. Влияние осушения низинных болот на режим стока весеннего половодья и летних паводков / В. Ф. Шебеко // Метеорология и гидрология. – 1970. – № 12. – С. 52–58.

169. Шебеко, В. Ф. Влияние осушительных мелиораций на водный режим территорий / В. Ф. Шебеко. – Минск : Ураджай, 1983. – 200 с.

170. Шелест, Т. А. Выдающиеся дождевые паводки на реках Беларуси / Т. А. Шелест // Вуч. Зап. Брэсц. ун-та. – 2016. – Вып. 11. – Ч. 2. : Прыродазнаўчыя навукі. – С. 130–141.

171. Шелест, Т. А. Моделирование стока дождевых паводков на реках Белорусского Поозерья в зависимости от гидрографических характеристик / Т. А. Шелест // Молодежь в науке – 2009 : приложение к журналу «Весці Нац. акад. навук Беларусі». Сер. хим. наук / Нац. акад. наук Беларусі, Совет молодых ученых НАН Беларусі ; редкол.: Н. П. Крутько (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – Ч. 1. – С. 161–164.

172. Шелест, Т. А. Оценка пространственно-временных колебаний дождевого паводочного стока рек Беларуси в современных условиях : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.03.05 / Т. А. Шелест ; БрГУ им. А. С. Пушкина. – Брест, 2014. – 24 с.

173. Шелутко, В. А. Опыт учета цикличности в расчетах стока / В. А. Шелутко // Тр. IV Всесоюзного гидрол. съезда : в 11 т. – Л. : Гидрометеоиздат, 1975. – Т. 3. – С. 232–240.

174. Шерешевский, А. И. К определению максимальных расходов воды дождевых паводков с малых водосборов / А. И. Шерешевский, И. К. Срибный // Тр. УкрНИГМИ. – М. : Гидрометеоиздат, 1991. – Вып. 240. – С. 17–24.

175. Шкляр, А. Х. Климатические ресурсы Белоруссии и использование их в сельском хозяйстве / А. Х. Шкляр. – Минск : Выш. шк., 1973. – 432 с.

176. Шпока, И. Н. Пространственно-временное распределение опасных метеорологических явлений на территории Беларуси : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.30 / И. Н. Шпока ; БрГУ им. А.С. Пушкина. – Брест, 2012. – 23 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Основные статистические характеристики временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Беларуси

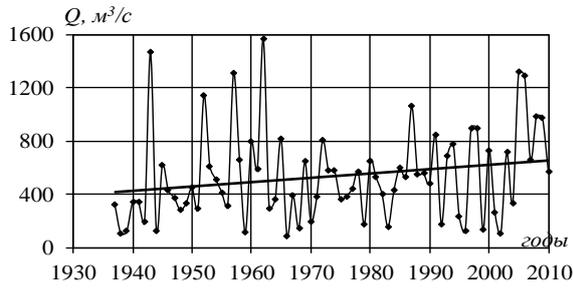
Река – створ	Период наблюдений, годы	$Q_{ср}, м^3/с$	Коэффициенты		
			$C_v$	$C_s$	$r(I)$
Зап. Двина – г. Витебск	1877–2010	472±26	0,65±0,06	1,05	0,03
Зап. Двина – г. Полоцк	1937–2010	529±40	0,65±0,08	1,02	-0,06
Кривинка – д. Добригоры	1954–2010	4,23±0,4	0,78±0,09	1,52	0,04
Улла – д. Бочейково	1929–2010	39,2±3,3	0,76±0,07	1,87	-0,03
Эса – д. Гадивля	1952–2006	9,12±1,0	0,83±0,09	2,02	-0,10
Оболь – п.г.т. Оболь	1956–2010	42,0±5,4	0,90±0,09	1,45	-0,17
Полота – д. Янково	1927–2010	9,99±0,8	0,74±0,07	2,17	-0,10
Нача – д. Нача	1927–2010	2,64±0,3	0,98±0,07	1,68	-0,08
Дисна – п.г.т. Шарковщина	1945–2010	53,6±7,0	1,06±0,07	2,50	-0,13
Березовка – д. Саутки	1950–2010	10,3±1,5	1,12±0,08	1,94	0,21
Дрыса – д. Дерновичи	1962–2010	59,9±6,1	0,71±0,09	1,63	0,03
Нища – д. Соколище	1958–2010	19,9±1,7	0,62±0,09	1,42	-0,14
Неман – г. Столбцы	1922–2010	36,1±2,8	0,72±0,07	1,83	0,02
Неман – д. Белица	1925–2010	180±9,1	0,47±0,07	1,32	-0,13
Неман – г. Мосты	1951–2010	225±11	0,39±0,09	1,43	-0,24
Неман – г. Гродно	1878–2010	308±11	0,43±0,06	1,00	-0,04
Ольшанка – д. Богданово	1963–2010	5,63±1,3	1,55±0,08	4,74	-0,05
Ислочь – д. Боровиковщина	1956–2010	13,6±2,0	1,09±0,08	2,82	-0,07
Гавья – д. Лубинята	1956–2010	14,0±0,8	0,41±0,09	1,10	-0,03
Дитва – д. Поречаны	1955–2001	10,4±1,0	0,69±0,10	1,25	-0,01
Щара – г. Слоним	1957–2010	32,2±2,0	0,46±0,09	1,50	0,11
Свислочь – д. Сухая Долина	1948–2010	18,9±1,3	0,54±0,08	0,99	0,12
Котра – Сахкомбинат	1946–2010	20,9±1,6	0,62±0,08	2,47	-0,04
Вилия – д. Стешницы	1952–2010	19,8±1,6	0,60±0,09	1,40	-0,01
Вилия – г. Вилейка	1949–2010	51,7±3,8	0,58±0,09	0,97	-0,01
Вилия – д. Михалишки	1946–2010	114±6,9	0,49±0,08	1,08	-0,05
Нарочь – д. Черемшицы	1963–2010	2,03±0,1	0,43±0,10	0,67	0,13
Нарочь – д. Нарочь	1945–2010	22,2±1,7	0,62±0,08	2,02	-0,09
Ошмянка – д. Бол. Яцыны	1955–2010	23,7±2,1	0,65±0,09	2,93	0,04
Копаявка – д. Черск	1949–2010	3,53±0,4	0,94±0,08	2,41	0,20
Мухавец – г. Брест	1967–2010	43,5±4,0	0,60±0,10	1,65	0,22
Рыта – д. Мал. Радваничи	1952–2010	10,5±1,3	0,98±0,08	3,29	0,11
Лесная – г. Каменец	1946–2010	15,7±1,4	0,71±0,08	1,80	0,24
Пульва – г. Высокое	1959–2010	4,35±0,5	0,87±0,09	2,10	0,16
Днепр – г. Орша	1882–2010	215±12	0,61±0,06	1,24	0,08
Днепр – г. Могилев	1931–2010	209±16	0,67±0,07	1,43	0,07
Днепр – г. Жлобин	1936–2010	243±19	0,71±0,08	2,33	-0,01
Днепр – г. Речица	1895–2010	406±18	0,48±0,06	1,24	0,01

*Продолжение таблицы А.1*

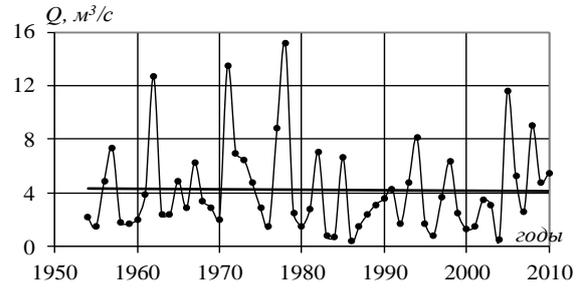
Ухлясть – д. Радьков	1930–2010	4,51±0,5	0,93±0,07	2,39	0,12
Друть – д. Городище	1948–2010	39,1±8,2	1,66±0,06	6,41	–0,05
Березина – г. Борисов	1881–2010	44,0±2,3	0,59±0,06	2,21	–0,04
Березина – г. Бобруйск	1881–2010	162±6,8	0,48±0,06	1,60	–0,13
Бобр – д. Куты	1957–2010	8,70±1,3	1,11±0,08	3,14	–0,13
Свислочь – д. Теребуты	1936–2010	43,7±2,3	0,46±0,08	1,78	–0,06
Сушанка – д. Суша	1946–2010	3,01±0,4	0,99±0,08	2,79	–0,15
Сож – г. Славгород	1897–2010	159±11	0,76±0,06	2,31	0,17
Сож – г. Гомель	1900–2010	219±13	0,62±0,06	2,53	0,01
Остер – д. Ходунь	1951–2010	31,4±2,9	0,72±0,08	1,87	–0,09
Проня – д. Летяги	1936–1939, 1958–2010	49,4±6,5	1,14±0,07	3,34	0,03
Беседь – д. Светиловичи	1929–2010	46,6±7,1	1,37±0,06	4,28	–0,02
Жадунька – г. Костюковичи	1949–2010	6,05±0,8	1,07±0,07	2,99	–0,05
Уза – д. Прибор	1928–2010	5,96±0,73	1,12±0,07	3,20	–0,07
Припять – д. Черничи	1931–2010	284±23	0,72±0,07	2,11	0,25
Припять – г. Мозырь	1881–2010	370±24	0,73±0,06	2,41	0,21
Неслуха – д. Рудск	1970–2010	5,56±0,65	0,75±0,10	1,25	0,25
Ясельда – г. Береза	1945–2010	9,23±0,7	0,64±0,08	1,14	0,19
Ясельда – д. Сенин	1945–2010	28,2±2,5	0,73±0,08	2,02	0,31
кан. Винец – д. Рыгали	1962–2010	1,85±0,2	0,88±0,09	1,88	–0,01
Меречанка – д. Красеево	1970–2010	2,82±0,40	0,92±0,10	1,21	0,14
Цна – д. Дятловичи	1954–2010	7,32±0,9	0,96±0,08	1,67	0,04
Горынь – д. М. Викоровичи	1922–2010	219±24	1,05±0,06	2,24	0,01
Случь – д. Ленин	1955–2010	22,9±2,6	0,94±0,07	2,59	0,06
кан. Бычок – д. Озераны	1971–2010	2,51±0,26	0,66±0,10	1,54	0,19
Уборть – д. Краснобережье	1926–2010	71,8±9,4	1,21±0,06	2,05	–0,05
Птичь – д. Дараганово	1920–2010	10,8±0,8	0,66±0,07	1,33	0,08
Птичь – д. Лучицы	1895–2010	67,4±3,9	0,62±0,06	1,24	–0,01
Шать – д. Шацк	1963–2010	2,36±0,2	0,69±0,09	1,45	0,01
Оресса – д. Андреевка	1926–2010	29,8±1,8	0,55±0,07	0,85	0,06
Словечна – д. Кузьмичи	1928–1998	18,7±2,9	1,31±0,07	2,03	–0,15
Чертеня – д. Некрашевка	1930–1991	10,0±1,4	1,14±0,08	1,88	0,14

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

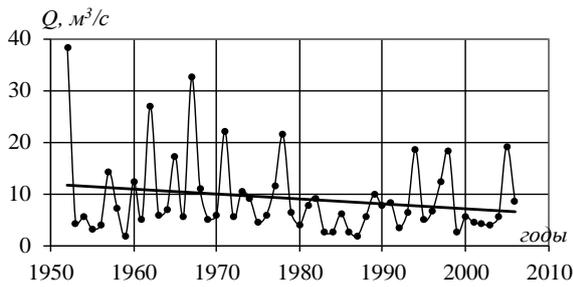
### Многолетние колебания максимальных расходов воды дождевых паводков



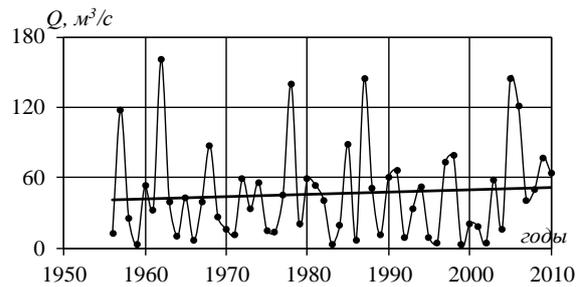
Западная Двина – г. Полоцк



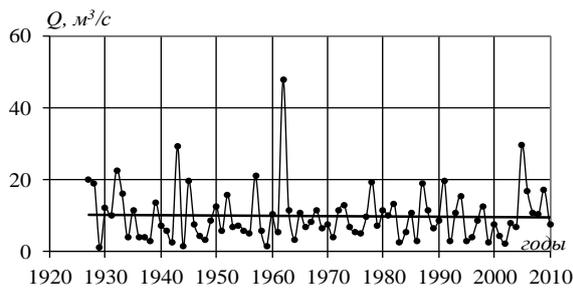
Кривинка – д. Добригоры



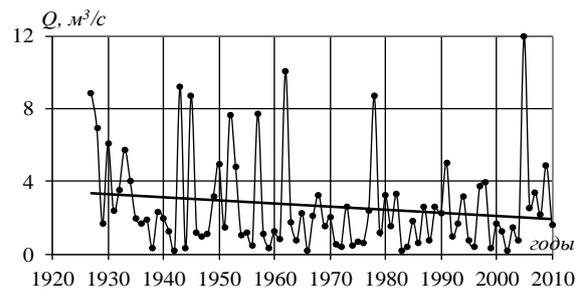
Эса – д. Гадивля



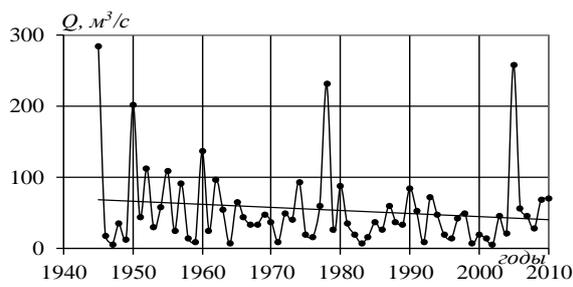
Оболь – п.г.т. Оболь



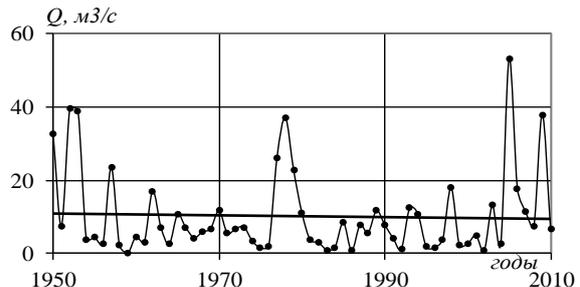
Полота – д. Янково



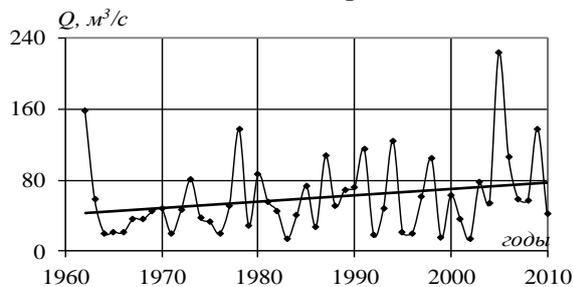
Нача – д. Нача



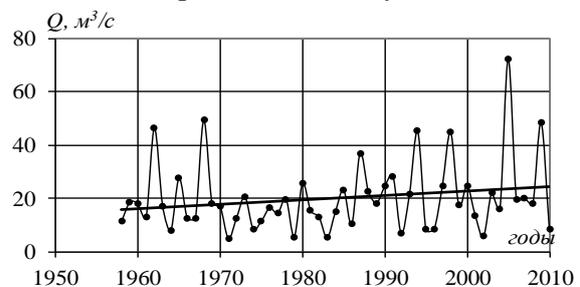
Дисна – п.г.т. Шарковщина



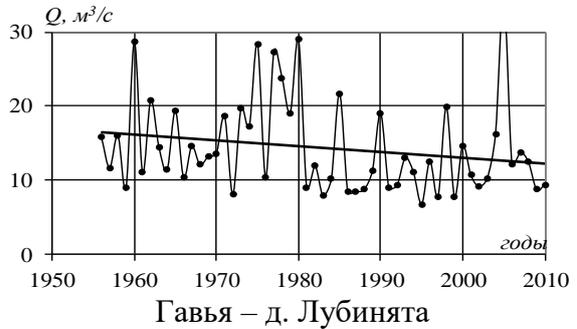
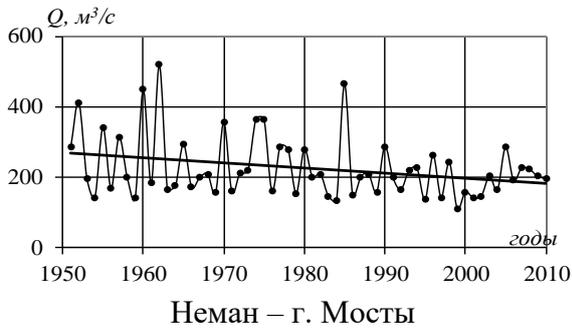
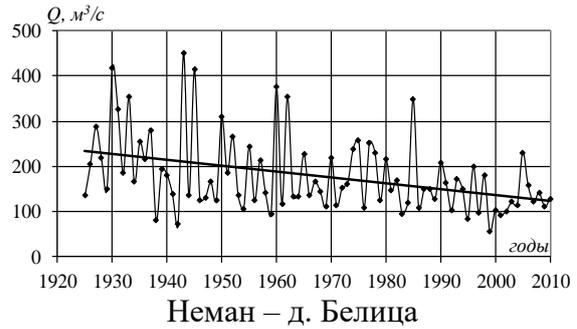
Березовка – д. Сautки

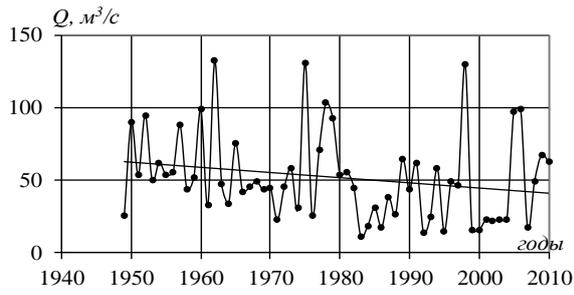


Дрыса – д. Дерновичи

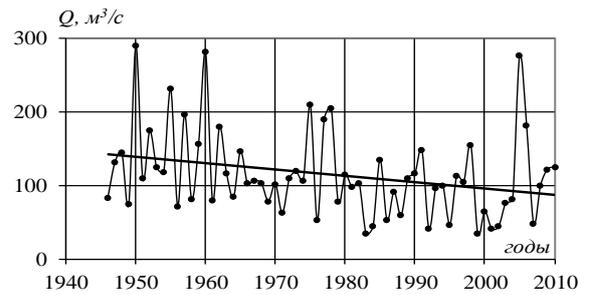


Ница – д. Соколище

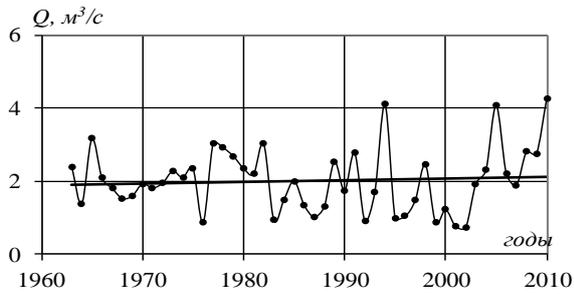




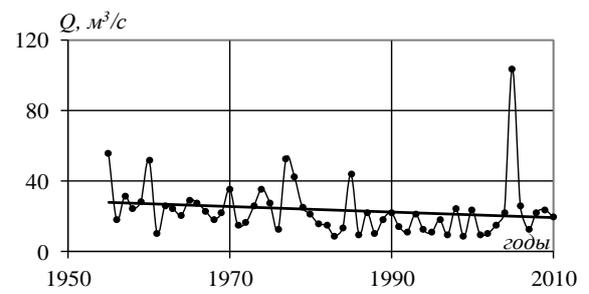
Виляя – г. Вилейка



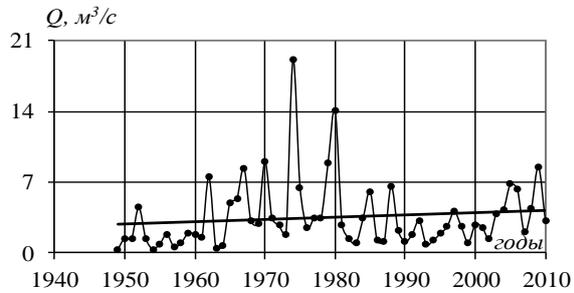
Виляя – д. Михалишки



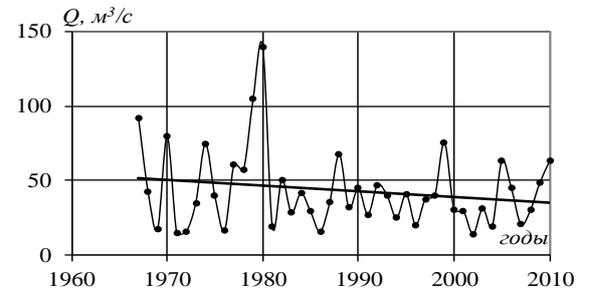
Нарочь – д. Черемшицы



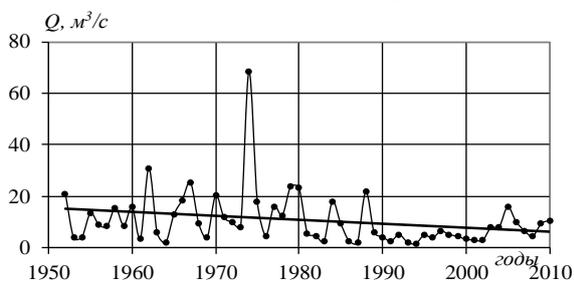
Ошмянка – д. Большие Яцыны



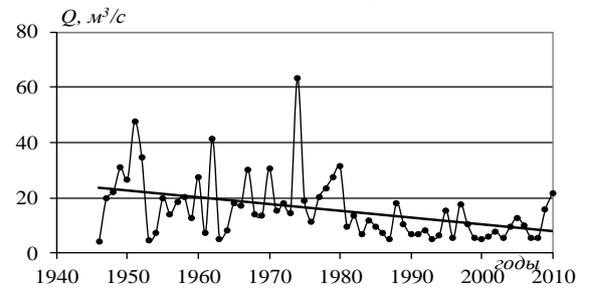
Копаявка – д. Черск



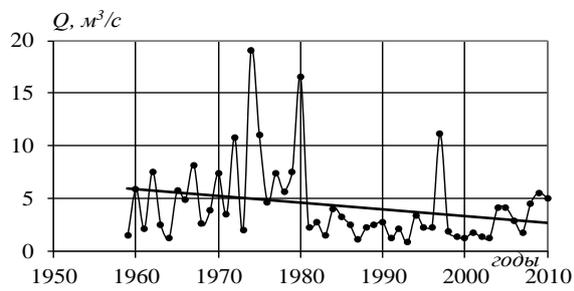
Мухавец – г. Брест



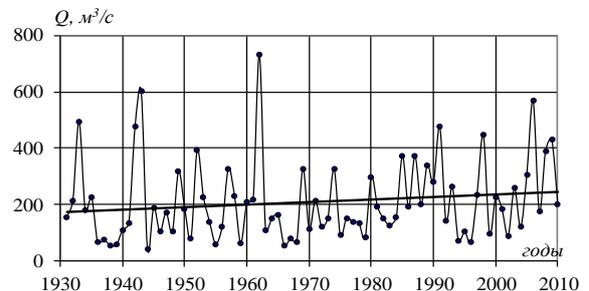
Рыта – д. Малые Радваничи



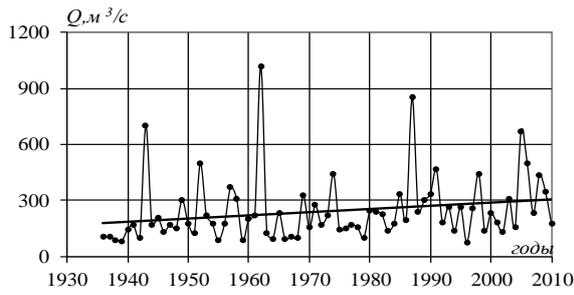
Лесная – г. Каменец



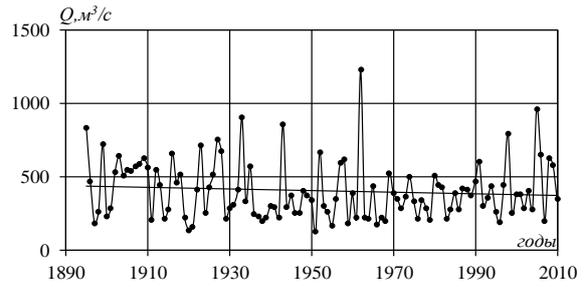
Пульва – г. Высокое



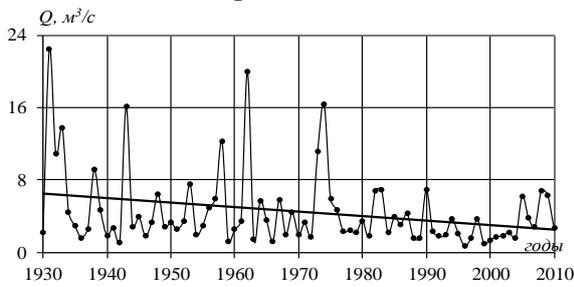
Днепр – г. Могилев



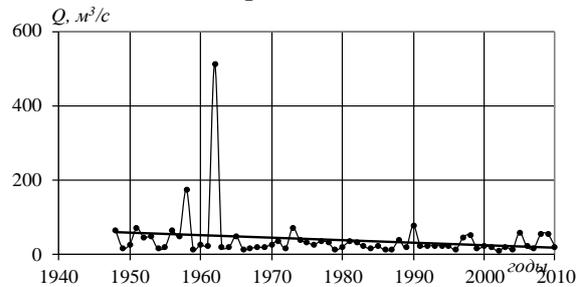
Днепр – г. Жлобин



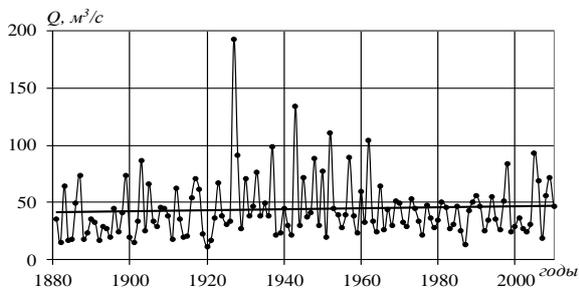
Днепр – г. Речица



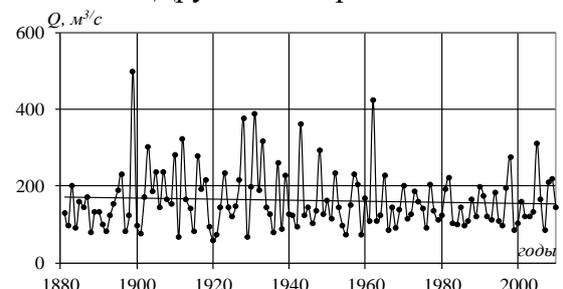
Ухлясть – д. Радков



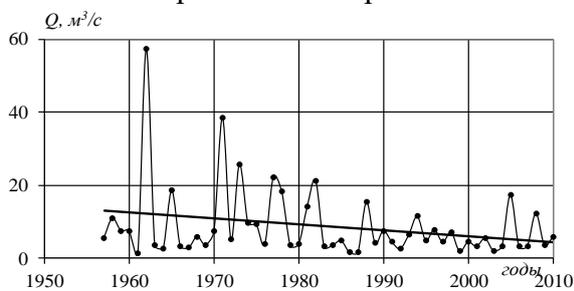
Друть – д. Городище



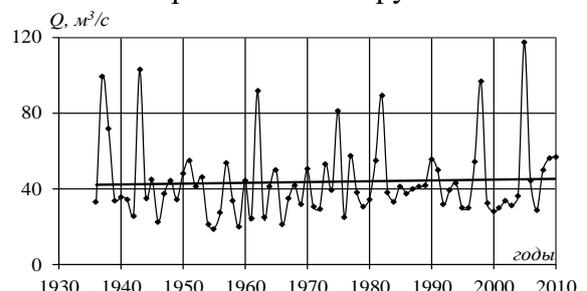
Березина – г. Борисов



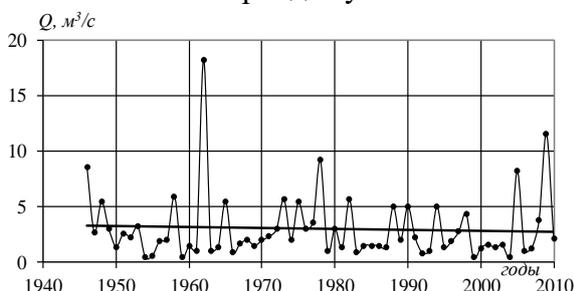
Березина – г. Бобруйск



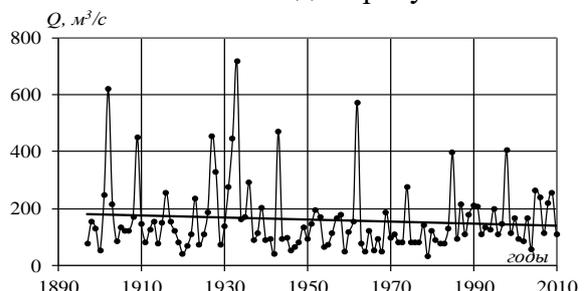
Бобр – д. Куты



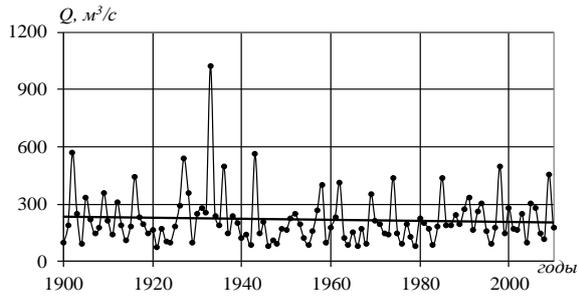
Свислоч' – д. Теробуты



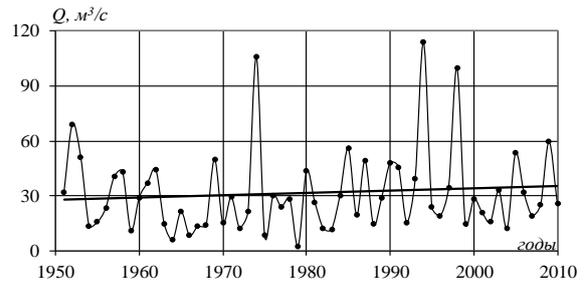
Сушанка – д. Суша



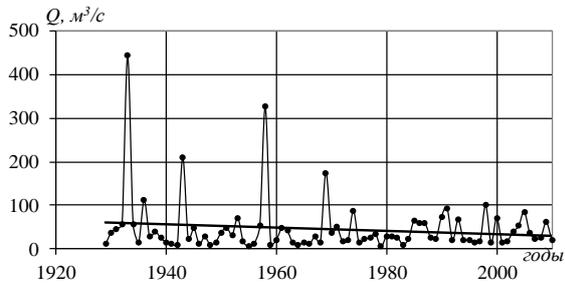
Сож – г. Славгород



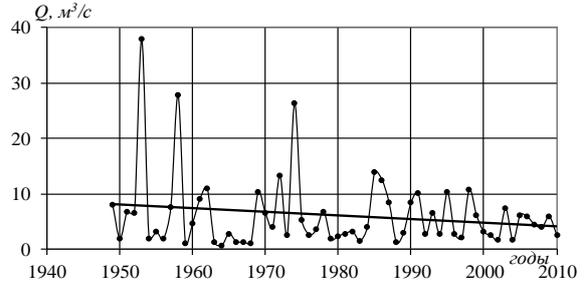
Сож – г. Гомель



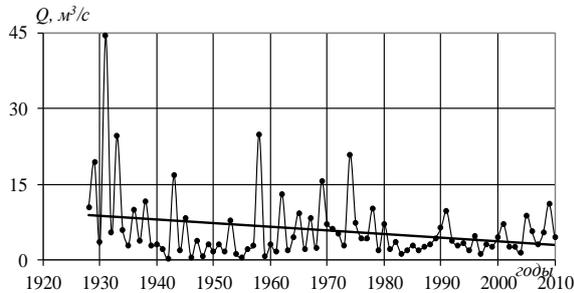
Остер – д. Ходунь



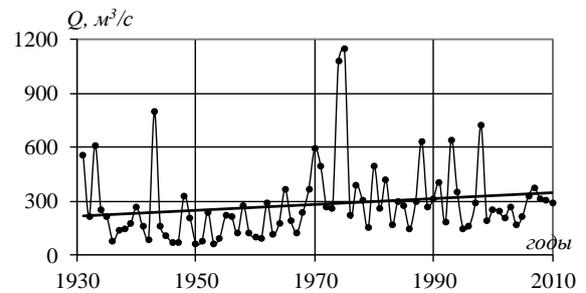
Беседь – д. Светиловичи



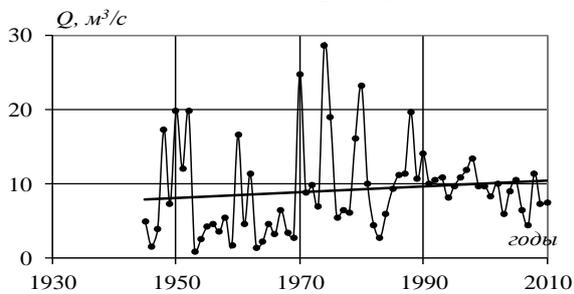
Жадунька – г. Костюковичи



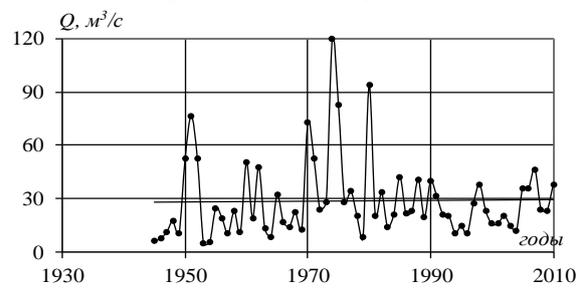
Уза – д. Прибор



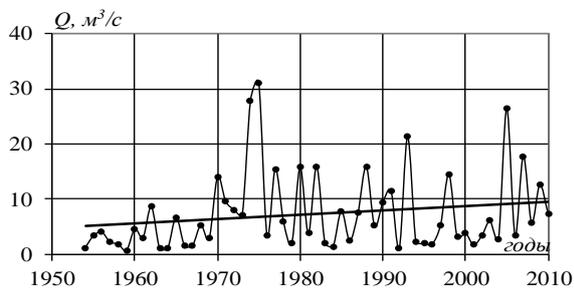
Припять – д. Черничи



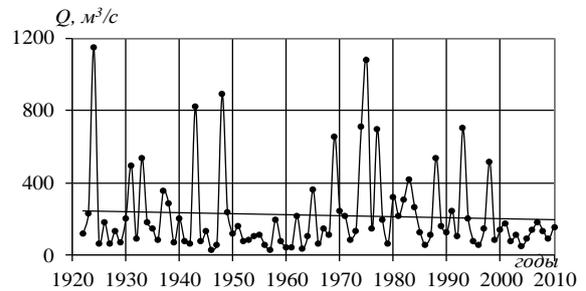
Ясельда – г. Береза



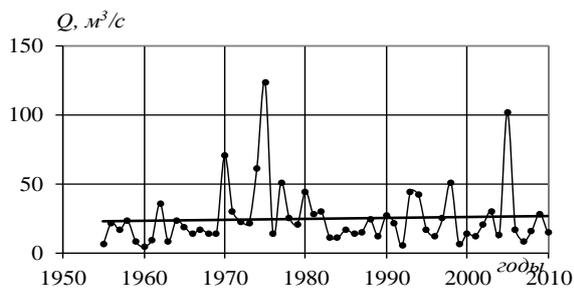
Ясельда – д. Сенин



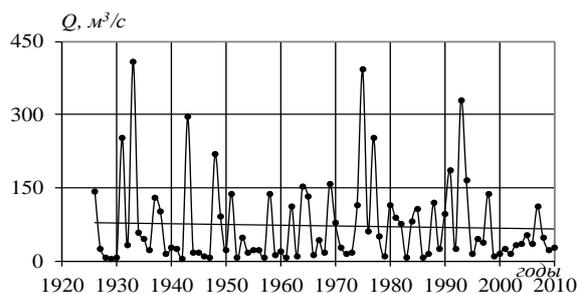
Цна – д. Дятловичи



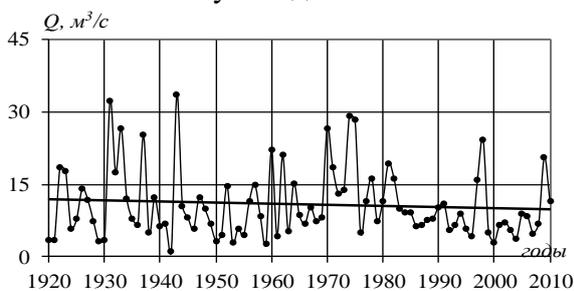
Горынь – д. Малые Викоровичи



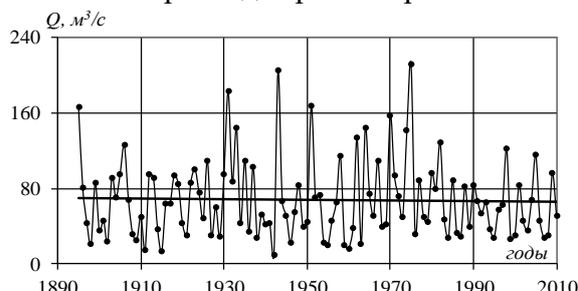
Случь – д. Ленин



Уборть – д. Краснобережье



Птичь – д. Дараганово



Птичь – д. Лучицы

Таблица Б.1 – Параметры линейных трендов максимальных расходов воды дождевых паводков

Река – створ	Градиент изменения стока $a$ , (м³/с)/10 лет	Коэффициент корреляции $r$
Зап. Двина – г. Полоцк	3,35	<b>0,21</b>
Кривинка – д. Добригоры	-0,00	0,01
Эса – д. Гадивля	-0,09	0,20
Оболь – г.п. Оболь	0,19	0,08
Полота – д. Янково	-0,01	0,03
Нача – д. Нача	-0,02	0,16
Дисна – п.г.т. Шарковщина	-0,43	0,14
Березовка – д. Саутки	-0,02	0,03
Дрыса – д. Дерновичи	0,71	0,23
Нища – д. Соколище	0,17	0,19
Неман – г. Столбцы	-0,40	0,12
Неман – д. Белица	-1,30	<b>0,38</b>
Неман – г. Мосты	-1,48	<b>0,29</b>
Ольшанка – д. Богданово	0,06	0,09
Ислочь – д. Боровиковщина	-0,25	<b>0,27</b>
Гавья – д. Лубинята	-0,08	0,20
Щара – г. Слоним	-0,22	0,23
Свислочь – д. Сухая Долина	-0,08	0,14
Котра – Сахкомбинат	-0,16	<b>0,24</b>
Вилия – д. Стешницы	-0,02	0,02
Вилия – г. Вилейка	-0,35	0,21
Вилия – д. Михалишки	-0,84	<b>0,27</b>

*Продолжение таблицы Б.1*

Нарочь – д. Черемшицы	0,00	0,07
Ошмянка – д. Бол. Яцыны	-0,15	0,16
Копаяювка – д. Черск	0,02	0,12
Мухавец – г. Брест	-0,39	0,19
Рыта – д. Мал. Радваничи	-0,15	0,25
Лесная – г. Каменец	-0,24	<b>0,41</b>
Пульва – г. Высокое	-0,06	0,25
Днепр – г. Могилев	0,86	0,14
Днепр – г. Жлобин	1,68	0,21
Днепр – г. Речица	-0,51	0,09
Ухлясть – д. Радьков	-0,05	<b>0,27</b>
Друть – д. Городище	-0,67	0,19
Березина – г. Борисов	0,04	0,06
Березина – г. Бобруйск	-0,13	0,06
Бобр – д. Куты	-0,16	0,25
Свислочь – д. Теребуты	0,04	0,04
Сушанка – д. Суша	-0,01	0,05
Сож – г. Славгород	-0,35	0,09
Сож – г. Гомель	-0,26	0,06
Остер – д. Ходунь	0,13	0,10
Беседь – д. Светиловичи	-0,37	0,14
Жадунька – г. Костюковичи	-0,07	0,18
Уза – д. Прибор	-0,07	<b>0,25</b>
Припять – д. Черничи	1,58	0,18
Ясельда – г. Береза	0,04	0,12
Ясельда – д. Сенин	0,02	0,01
Цна – д. Дятловичи	0,08	0,19
Горынь – д. Малые Викоровичи	-0,56	0,06
Случь – д. Ленин	0,07	0,05
Уборть – д. Краснобережье	-0,18	0,05
Птичь – д. Лучицы	-0,06	0,05
Птичь – д. Дараганово	-0,02	0,08

*Примечание – Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции на 5 %-ном уровне значимости*

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

Таблица В.1 – Суточные атмосферные осадки 1 %-ной обеспеченности за различные периоды

Метеостанция	Период	Месяц					
		май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Верхнедвинск	1965–1987	32,3	39,9	53,3	47,6	29,5	27,3
	1988–2010	39,8	61,5	34,8	39,6	44,3	28,5
Шарковщина	1965–1987	28,1	37,4	46,6	56,6	33,0	29,6
	1988–2010	37,5	49,6	63,7	40,4	36,1	33,0
Лепель	1965–1987	49,9	43,2	54,4	37,5	31,4	25,1
	1988–2010	32,6	41,2	53,1	51,1	38,5	34,1
Витебск	1965–1987	34,5	42,9	38,3	42,5	37,5	23,2
	1988–2010	31,8	40,5	51,3	60,7	41,5	30,8
Гродно	1965–1987	34,4	46,7	39,9	54,5	22,4	33,6
	1988–2010	35,6	36,5	57,8	40,8	42,7	27,7
Волковыск	1965–1987	28,6	36,3	54,4	55,2	27,1	23,1
	1988–2010	43,7	35,5	50,9	50,0	50,1	30,7
Вилейка	1965–1987	32,3	39,9	40,4	53,3	30,2	24,5
	1988–2010	43,3	39,8	43,6	55,8	31,5	34,0
Лида	1965–1987	39,5	62,9	43,7	48,4	27,8	20,6
	1988–2010	43,4	35,5	51,5	55,1	49,1	37,7
Новогрудок	1965–1987	43,2	69,0	42,2	49,9	28,2	24,8
	1988–2010	40,1	34,5	89,8	61,9	53,2	41,1
Гомель	1965–1987	38,9	62,8	44,2	41,4	30,0	28,7
	1988–2010	44,3	38,9	58,5	40,1	48,3	40,7
Славгород	1965–1987	28,4	42,5	48,1	55,8	36,2	24,4
	1988–2010	29,4	43,3	55,6	42,3	38,5	30,7
Могилев	1965–1987	28,0	43,2	50,1	45,3	29,7	23,4
	1988–2010	33,6	36,8	59,1	43,8	31,6	29,3
Жлобин	1965–1987	29,9	40,7	43,7	48,5	34,9	28,4
	1988–2010	33,1	40,0	65,4	42,9	41,3	38,2
Борисов	1965–1987	36,3	45,3	54,6	48,0	34,5	24,1
	1988–2010	32,6	49,0	61,2	49,1	42,1	31,5
Брест	1965–1987	33,3	42,6	63,0	58,9	35,2	35,0
	1988–2010	46,3	38,4	44,6	64,0	48,2	26,4
Пружаны	1965–1987	38,1	58,9	47,4	47,4	30,9	27,0
	1988–2010	31,5	43,9	49,9	38,6	47,9	27,4
Житковичи	1965–1987	36,9	50,6	41,5	72,1	35,8	28,6
	1988–2010	32,9	39,4	77,2	40,9	39,6	35,5
Василевичи	1965–1987	35,4	48,7	44,2	59,2	40,6	25,3
	1988–2010	34,7	44,2	60,9	53,7	54,4	35,7
Пинск	1965–1987	33,0	37,4	46,7	45,4	34,1	28,6
	1988–2010	32,2	48,0	62,0	48,1	34,4	36,6

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Годы с дождевыми паводками различной обеспеченности

Река – створ	Период наблюдений	Обеспеченность, %		
		$\leq 1$	1–5	6–10
Зап. Двина–г. Витебск	1877–2010	1908	1902, 1905, 1917, 1927, 1943, 2005	1878, 1887, 1952, 1957, 1962, 1987, 2006
Зап. Двина – г. Полоцк	1937–2010	1962	1943, 1957, 2005	1952, 1987, 2006
Кривинка – д. Добригоры	1954–2010	–	1962, 1971, 1978	1977, 2005, 2008
Улла – д. Бочейково	1929–2010	1962	1932, 1943, 2005	1933, 1952, 1978, 1994
Эса – д. Гадивля	1952–2006	–	1952, 1962, 1967	1971, 1978, 2005
Оболь – п.г.т. Оболь	1956–2010	–	1962, 1987, 2005	1978, 2006
Полота – д. Янково	1927–2010	1962	1932, 1943, 2005	1927, 1945, 1957, 1991
Нача – д. Нача	1927–2010	2005	1927, 1943, 1962	1945, 1952, 1957, 1978
Дисна – п.г.т. Шарковщина	1945–2010	–	1945, 1978, 2005	1950, 1952, 1955, 1960
Березовка – д. Саутки	1950–2010	–	1952, 1953, 2005	1950, 1978, 2009
Дрыса – д. Дерновичи	1962–2010	–	1962, 2005	1978, 1994, 2009
Нища – д. Соколище	1958–2010	–	1968, 2005	1962, 1994, 2009
Неман – г. Столбцы	1922–2010	1930	1927, 1933, 1943	1931, 1945, 1960, 1962, 1982
Неман – д. Белица	1925–2010	1943	1930, 1945, 1960	1931, 1933, 1950, 1962, 1985
Неман – г. Мосты	1951–2010	–	1960, 1962, 1985	1952, 1974, 1975
Неман – г. Гродно	1878–2010	1943	1885, 1903, 1922, 1930, 1931, 1950	1894, 1923, 1927, 1933, 1952, 1962, 1985
Ольшанка – д. Богданово	1963–2010	–	1985, 2005	1977, 1980, 1998
Ислочь – д. Боровиковщина	1956–2010	–	1960, 1962	1977, 1982, 1993
Гавья – д. Лубинята	1956–2010	–	1960, 1975, 1980	1977, 1978
Дитва – д. Поречаны	1955–2001	–	1955, 1967	1960, 1973, 1980
Щара – г. Слоним	1957–2010	–	1970, 1974, 1975	1960, 1980
Свислочь – д. Сухая Долина	1948–2010	–	1950, 1974, 1975	1957, 1965, 1980
Котра – Сахкомбинат	1946–2010	–	1950, 1952, 2009	1960, 1974, 1975
Вилия – г. Вилейка	1949–2010	–	1962, 1975, 1998	1960, 1978, 2006
Вилия – д. Стешицы	1952–2010	–	1962, 1991, 1998	1952, 1978, 1989
Вилия – д. Михалишки	1946–2010	–	1950, 1955, 1960	1975, 1978, 2005
Нарочь – д. Черемшицы	1963–2010	–	1994, 2010	1965, 1977, 2005
Нарочь – д. Нарочь	1945–2010	–	1945, 1960, 1978	1950, 1962, 1991, 2005
Опшмянка – д. Бол. Яцыны	1955–2010	–	1955, 1977, 2005	1960, 1978, 1985
Копаявка – д. Черск	1949–2010	–	1970, 1974, 1980	1967, 1979, 2009

*Продолжение таблицы Г.1*

Мухавец – г. Брест	1967–2010	–	1979, 1980	1967, 1970
Рыга – д. Малые Радваничи	1952–2010	–	1962, 1967, 1974	1979, 1980, 1988
Лесная – г. Каменец	1946–2010	–	1951, 1962, 1974	1949, 1952, 1980
Пульва – г. Высокое	1959–2010	–	1974, 1980	1972, 1975, 1997
Днепр – г. Орша	1882–2010	1927	1908, 1933, 1943, 1962, 1991, 2006	1892, 1895, 1899, 1916, 1923, 1928
Днепр – г. Могилев	1931–2010	1962	1933, 1943, 2006	1942, 1952, 1991, 2009
Днепр – г. Жлобин	1936–2010	1962	1943, 1987, 2005	1952, 1974, 1991, 2006
Днепр – г. Речица	1895–2010	1962	1895, 1933, 1943, 1998, 2005	1899, 1916, 1923, 1927, 1928, 1952
Ухлясть – д. Радьков	1930–2010	1931	1943, 1962, 1974	1932, 1933, 1958, 1973
Друть – д. Городище	1948–2010	–	1958, 1962, 1990	1948, 1951, 1973
Березина – г. Борисов	1881–2010	1927	1928, 1937, 1943, 1952, 1962, 2005	1903, 1933, 1948, 1950, 1957, 1998
Березина – г. Бобруйск	1881–2010	1899	1912, 1928, 1931, 1933, 1943, 1962	1903, 1910, 1916, 1948, 1998, 2005
Бобр – д. Куты	1957–2010	–	1962, 1971, 1973	1965, 1977
Свислочь – д. Теребуты	1936–2010	2005	1937, 1943, 1998	1938, 1962, 1975, 1982
Сушанка – д. Суша	1946–2010	–	1962, 1978, 2009	1946, 1958, 2005
Сож – г. Славгород	1897–2010	1933	1902, 1909, 1927, 1943, 1962	1928, 1931, 1932, 1936, 1985, 1998
Сож – г. Гомель	1900–2010	1933	1902, 1927, 1936, 1943, 1998	1916, 1962, 1974, 1985
Остер – д. Ходунь	1951–2010	–	1974, 1994, 1998	1952, 1985, 2009
Проня – д. Летяги	1936–1939, 1958–2010	1962	1943, 1985, 2009	1942, 1969, 1998
Беседь – д. Светиловичи	1929–2010	1933	1943, 1958, 1969	1936, 1974, 1991, 1998
Жадунька – г. Костюковичи	1949–2010	–	1953, 1958, 1974	1972, 1985, 1986
Уза – д. Прибор	1928–2010	1931	1933, 1958, 1974	1929, 1943, 1962, 1969
Припять – д. Черничи	1931–2010	1975	1943, 1974, 1998	1933, 1970, 1988, 1993
Припять – г. Мозырь	1881–2010	1975	1931, 1943, 1974, 1988, 1993, 1998	1889, 1913, 1926, 1933, 1970, 1980
Неслуха – д. Рудск	1970–2010	–	1975	1974, 1991
Ясельда – г. Береза	1945–2010	–	1970, 1974, 1980	1950, 1952, 1975, 1988
Ясельда – д. Сенин	1945–2010	–	1951, 1974, 1975	1950, 1952, 1970, 1980
кан. Винец – д. Рыгали	1962–2010	–	1962, 1970	1965, 1974, 1979

*Продолжение таблицы Г.1*

Меречанка – д. Красеево	1970–2010	–	1975, 2007	1974, 1979
Цна – д. Дятловичи	1954–2010	–	1974, 1975, 2005	1982, 1993, 2007
Горынь – д. Малые Викоровичи	1922–2010	1924	1943, 1948, 1975	1969, 1974, 1977, 1988, 1993
Случь – д. Ленин	1955–2010	–	1970, 1975, 2005	1974, 1977, 1998
кан. Бычок – д. Озераны	1971–2010	–	1975	1977, 1993
Уборть – д. Краснобережье	1926–2010	1933	1943, 1975, 1993	1931, 1948, 1977, 1991
Птичь – д. Дараганово	1920–2010	–	1931, 1933, 1943, 1974, 1975	1937, 1960, 1970, 1998
Птичь – д. Лучицы	1895–2010	1975	1895, 1931, 1943, 1951, 1970	1906, 1933, 1962, 1964, 1974, 1982
Шать – д. Шацк	1963–2010	–	1965, 2005	1977, 1982, 2010
Оресса – д. Андреевка	1926–2010	1975	1931, 1943, 1998	1935, 1938, 1964, 1970, 1980
Словечна – д. Кузьмичи	1928–1998	–	1948, 1977, 1980	1931, 1943, 1958, 1993
Чертедь – д. Некрашевка	1930–1991	–	1931, 1943, 1975	1933, 1948, 1958

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**

Таблица Д.1 – Годы с зимними паводками различной обеспеченности

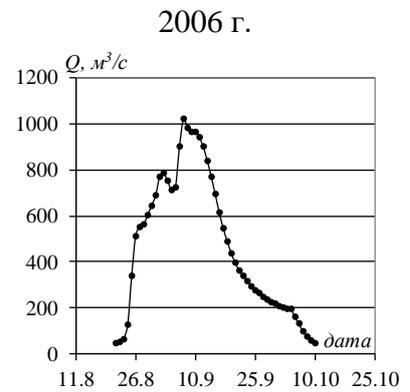
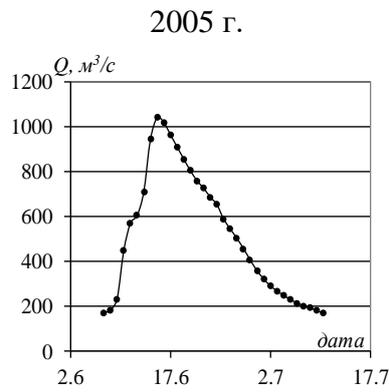
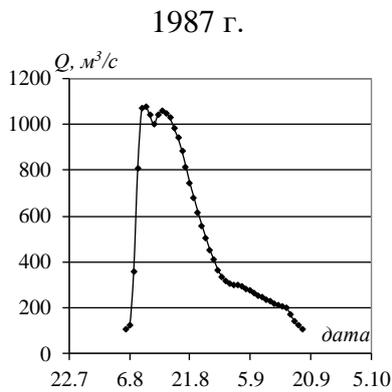
Река – створ	Период наблюдений	Обеспеченность, %		
		≤ 1	1–5	6–10
Зап. Двина – г. Витебск	1877–1940, 1945–2010	1998	1917, 1963, 1985, 2005, 2007	1880, 1887, 1914, 1916, 1960, 1961, 1997
Улла – д. Бочейково	1929–1939, 1946–2010	1989	1975, 1998	1957, 1967, 1988, 2007
Полота – д. Янково	1928–1940, 1945–2010	1963	1928, 1991, 1998	1985, 1987, 2007
Нача – д. Нача	1927–1940, 1945–2010	1939	1963, 1988, 1991	1928, 1989, 1998
Дисна – п.г.т. Шарковщина	1945–2010	–	1981, 1988, 1989	1975, 1991, 2007
Неман – г. Гродно	1877–1941, 1946–2010	1958	1883, 1894, 1916, 1936, 1939	1884, 1902, 1946, 1948, 1975, 1981, 1994
Неман – г. Столбцы	1923–1933, 1945–2010	1939	1926, 1930, 1949	1933, 1975, 1981, 2004
Виля – г. Вилейка	1949–2010	–	1949, 1957, 1975	1951, 1958
Виля – д. Михалишки	1946–2010	–	1949, 1975, 1994	1946, 1957, 1989
Котра – Сахкомбинат	1946–2010	–	1946, 1948, 1958	1971, 1989, 2004
Нарочь – д. Нарочь	1945–2010	–	1957, 1975, 1989	1991, 1994, 2007
Копаяювка – д. Черск	1949–2010	–	1971, 1975, 1982	1949, 1958, 1967
Лесная – г. Каменец	1946–2010	–	1948, 1949, 1958	1957, 1971, 1975
Днепр – г. Орша	1882–1939, 1947–2010	1998	1906, 1914, 1932, 1970, 1985	1887, 1916, 1947, 1961, 2005, 2007
Днепр – г. Могилев	1931–1941, 1944–2005	1998	1934, 1985	1933, 1947, 1989, 2007
Днепр – г. Жлобин	1936–1940, 1945–2010	–	1939, 1981, 2009	1947, 1952, 1991, 2007
Днепр – г. Речица	1895–1941, 1946–2005	2009	1910, 1939, 1963, 1981, 1991	1913, 1948, 1959, 1975, 1983
Березина – г. Бобруйск	1881–1916, 1921–1939, 1945–2010	1933	1913, 1930, 1958, 1975, 1982	1948, 1949, 1950, 1959, 1965, 1981
Сож – г. Гомель	1901–1939, 1946–2010	1975	1939, 1948, 1985, 2001	1916, 1959, 1972, 1981, 1998
Беседь – д. Светиловичи	1929–1940, 1944–2010	1970	1957, 1958, 1988	1932, 1974, 1975
Уза – д. Прибор	1929–1941, 1945–2010	1948	1957, 1979, 1994	1971, 1974, 1975, 1989
Припять – г. Мозырь	1882–1940, 1945–2010	1980	1923, 1948, 1958, 1990, 1993	1913, 1936, 1961, 1981, 1989, 1998

*Продолжение таблицы Д.1*

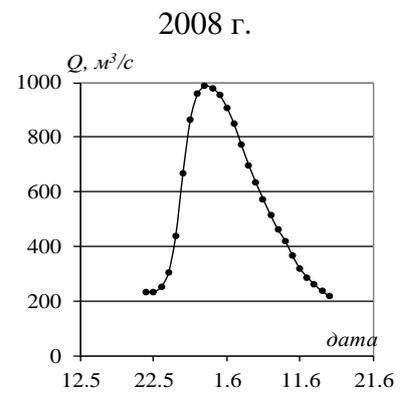
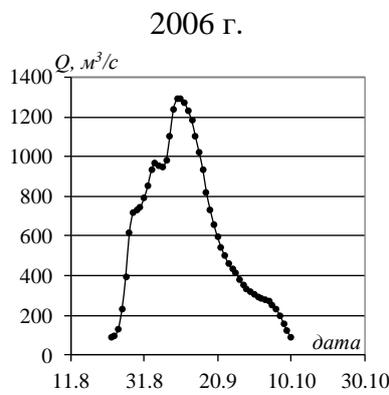
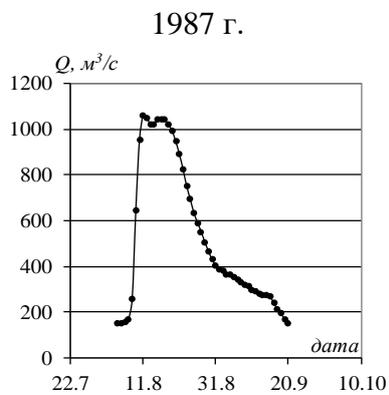
Птичь – д. Лучицы	1895–1917, 1926–1940, 1945–2010	1948	1936, 1975, 1980, 1982	1914, 1957, 1959, 1981, 1983
Оресса – д. Андреевка	1926–1940, 1944–2010	1936	1980, 1981, 2004	1975, 1982, 1994, 1998
Горынь – д. Малые Викоровичи	1922–1933, 1946–2010	1948	1975, 1982, 1998	1960, 1971, 1981
Ясельда – д. Сенин	1926–1933, 1945–2010	–	1980, 1981, 1990	1961, 1989, 1991, 1998
Уборть – д. Краснобережье	1926–1940, 1945–2010	1933	1926, 1932, 1958	1930, 1948, 1998, 2000

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

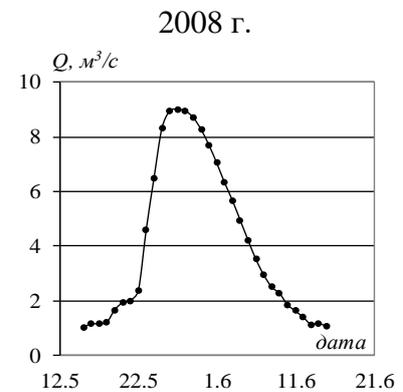
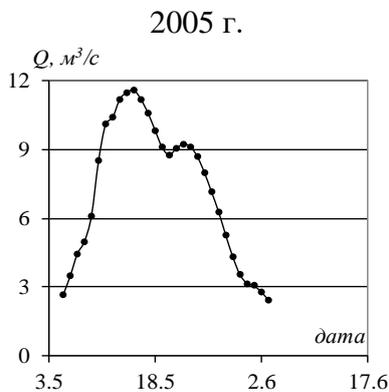
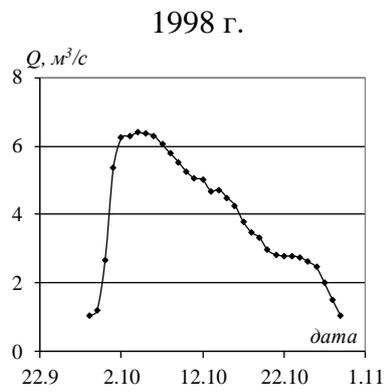
### Гидрографы дождевых паводков рек Беларуси



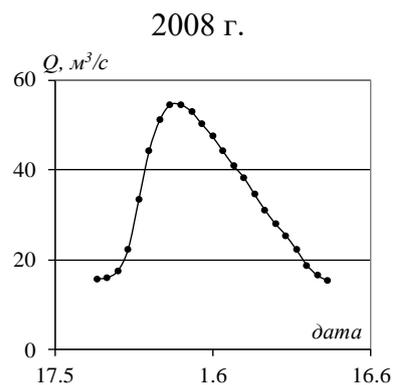
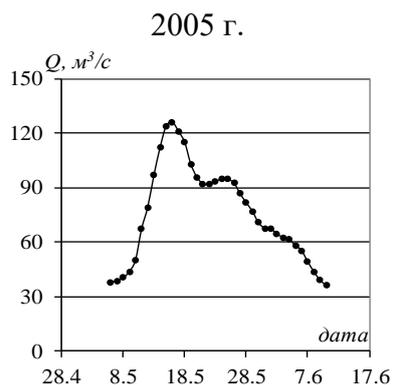
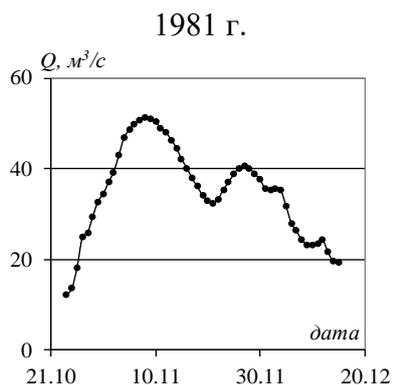
р. Западная Двина – г. Витебск



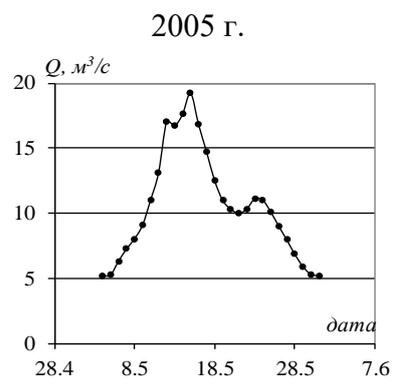
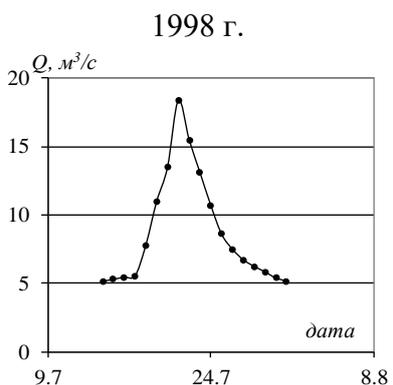
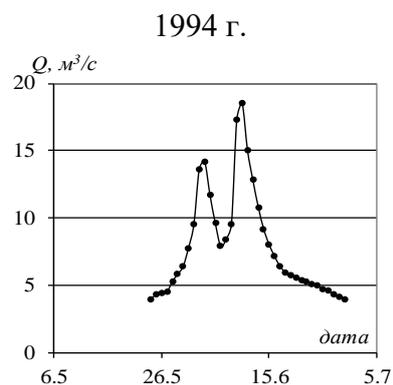
р. Западная Двина – г. Полоцк



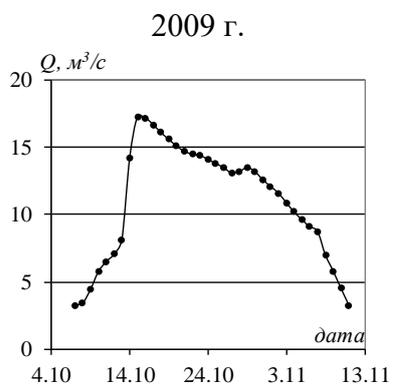
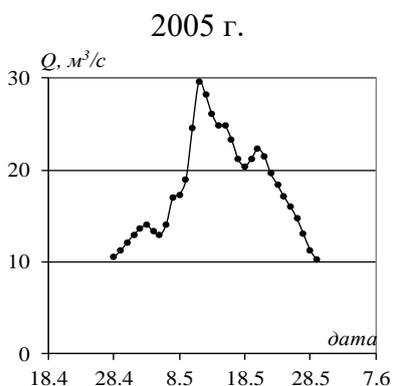
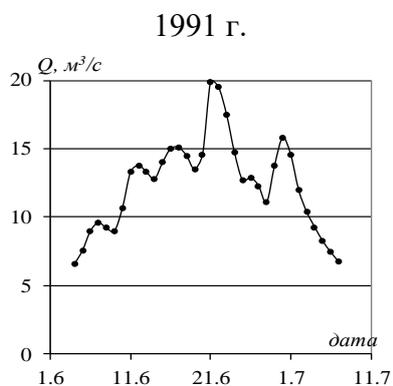
Кривинка – д. Добригоры



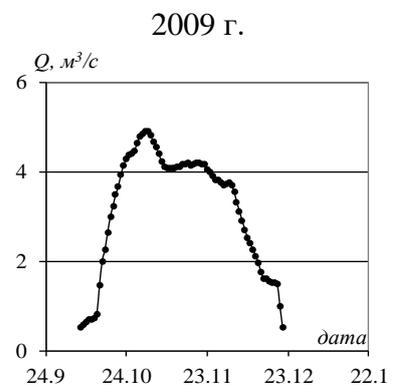
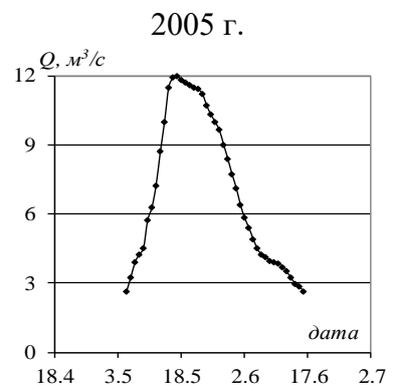
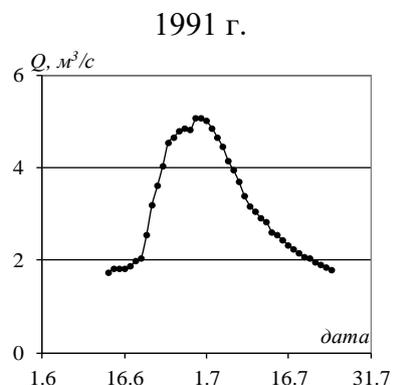
Улла – д. Бочейково



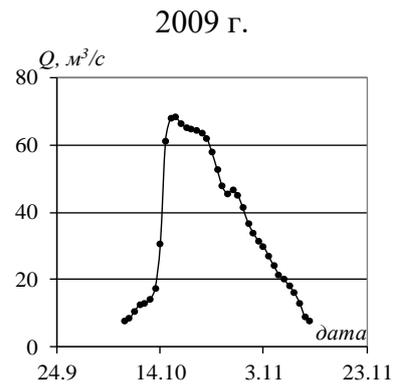
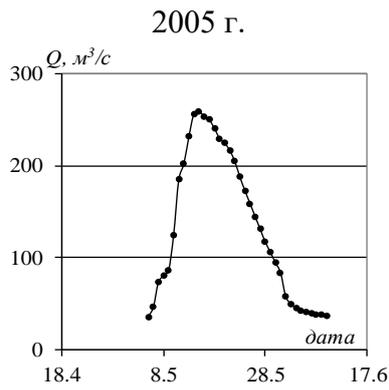
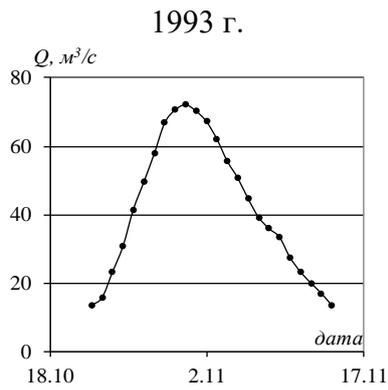
Эса – д. Гадивля



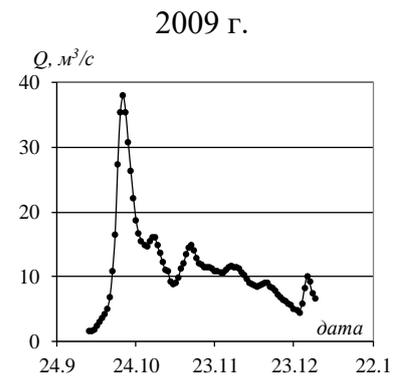
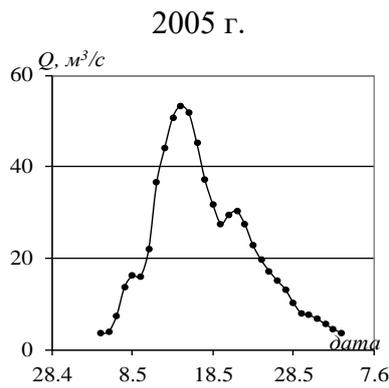
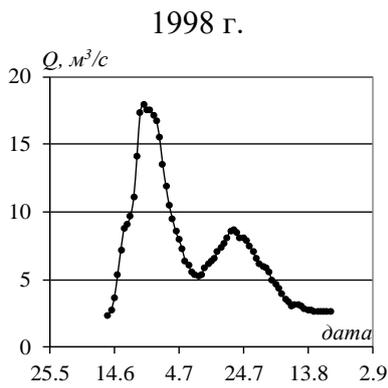
Полота – д. Янково



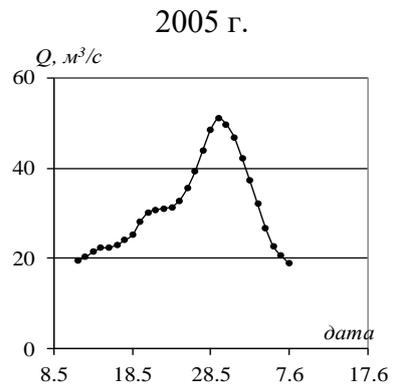
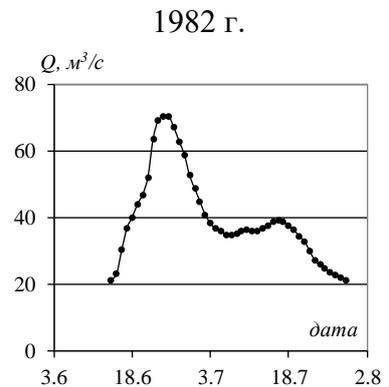
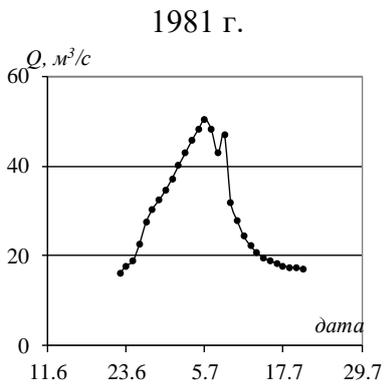
Нача – д. Нача



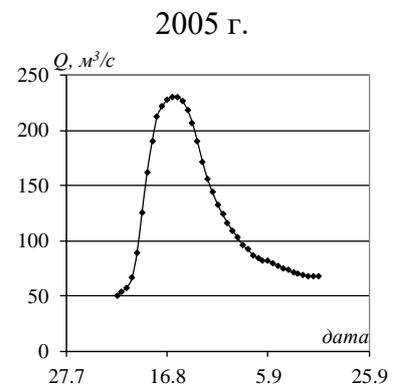
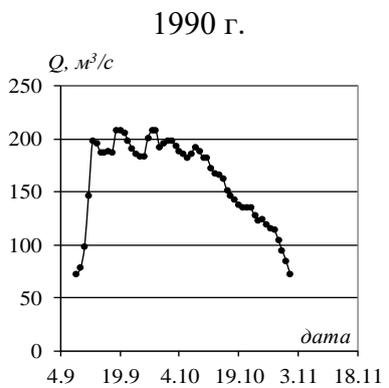
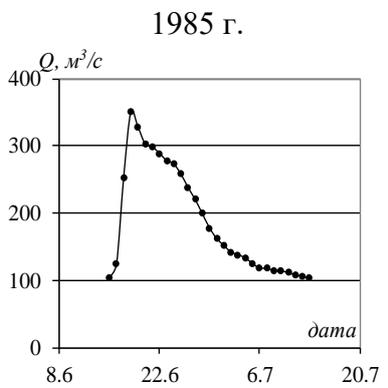
Дисна – п.г.т. Шарковщина



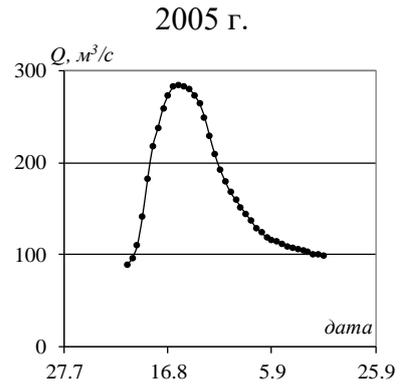
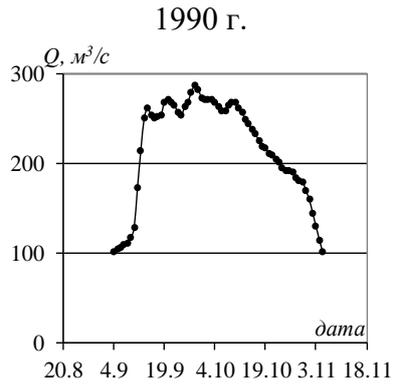
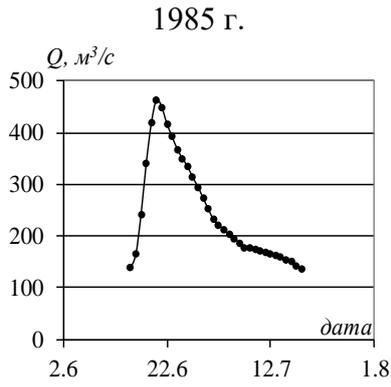
Березовка – д. Саутки



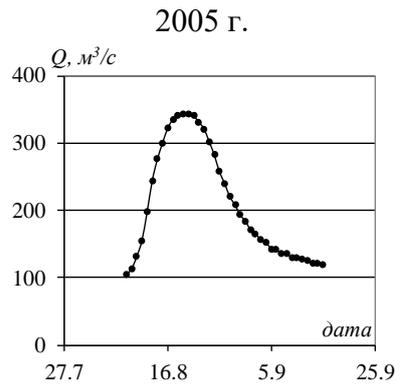
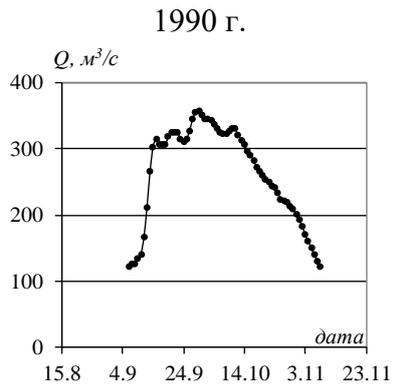
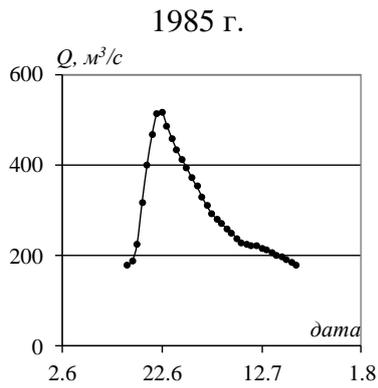
Неман – г. Столбцы



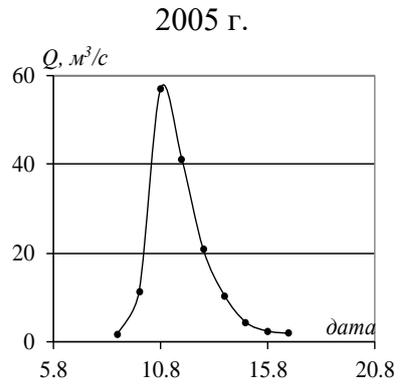
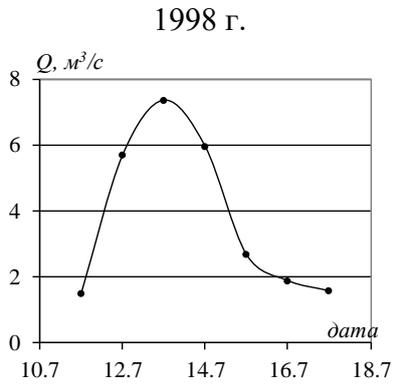
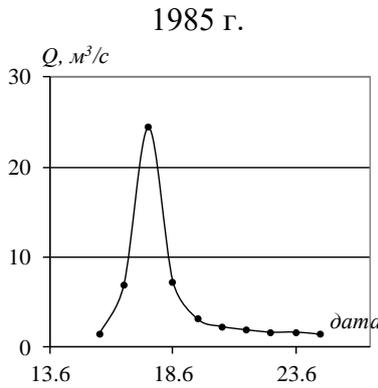
Неман – д. Белица



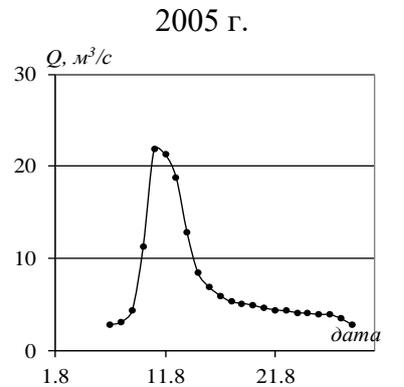
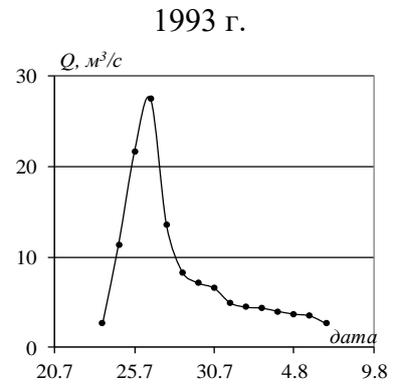
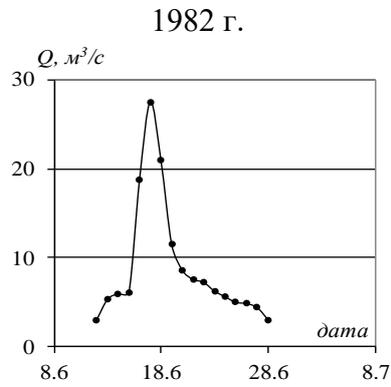
Неман – г. Мосты



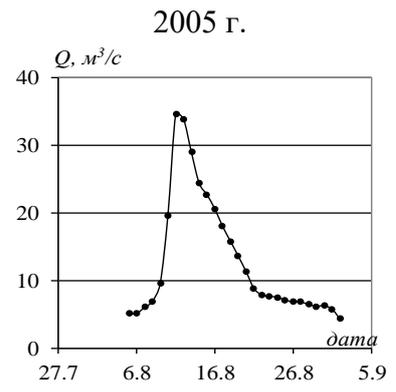
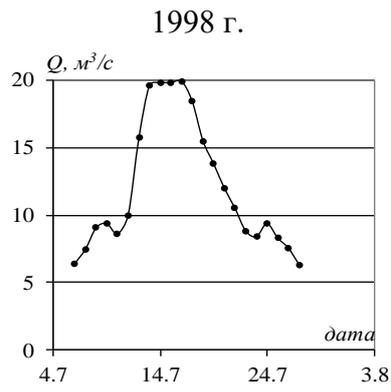
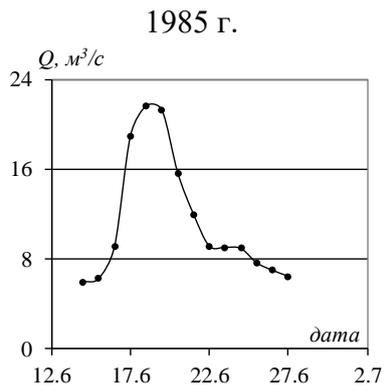
Неман – г. Гродно



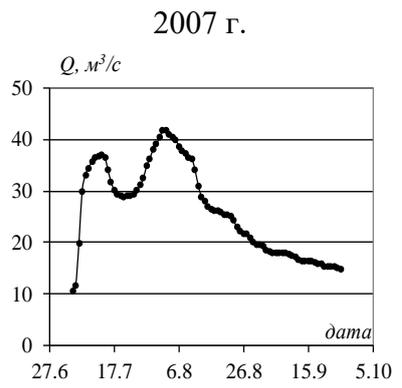
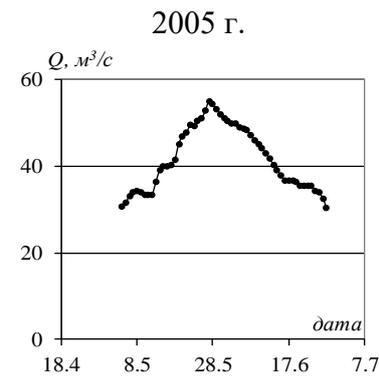
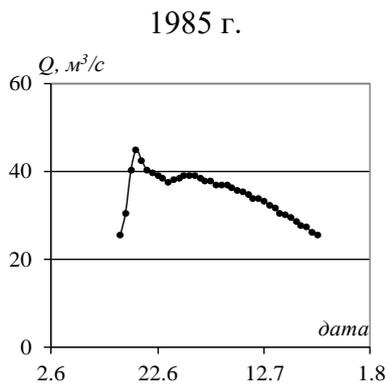
Ольшанка – д. Богданово



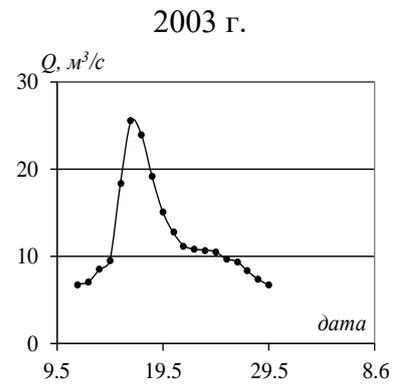
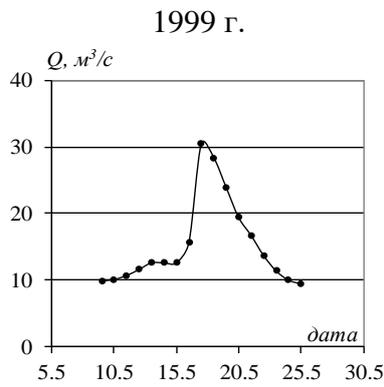
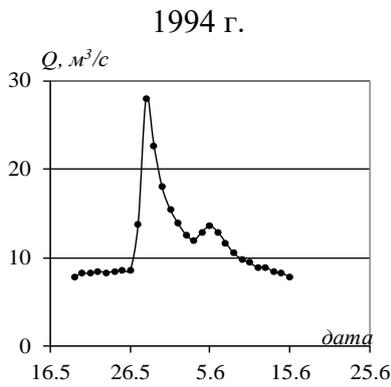
Исloch – д. Боровиковщина



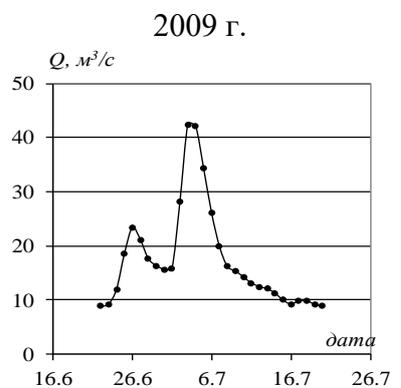
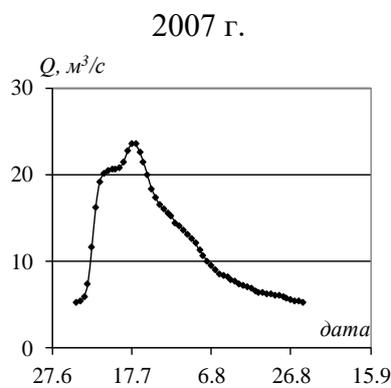
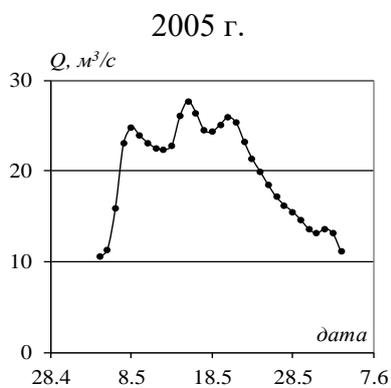
Гавья – д. Лубинята



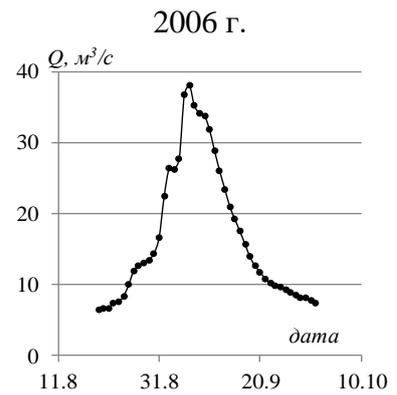
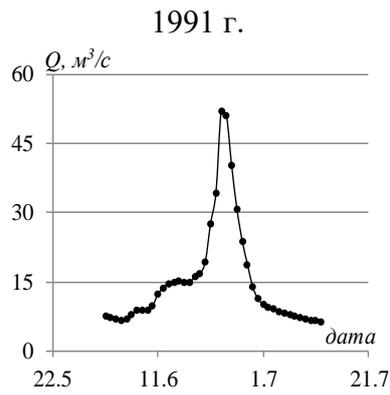
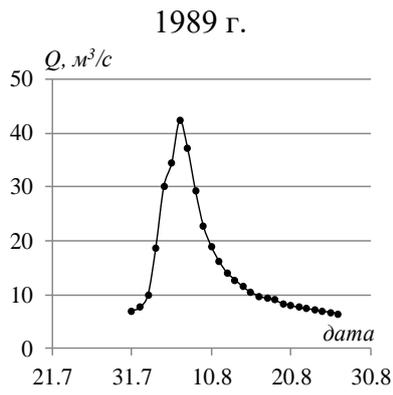
Щара – г. Слоним



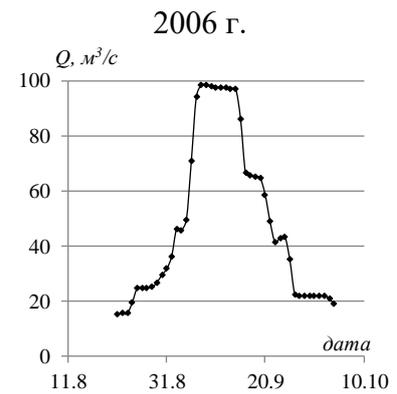
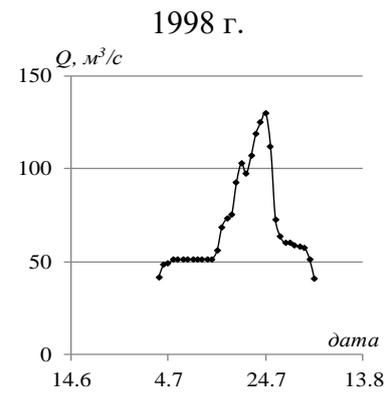
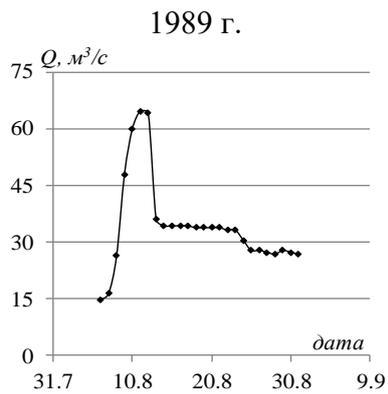
Свислочь – д. Сухая Долина



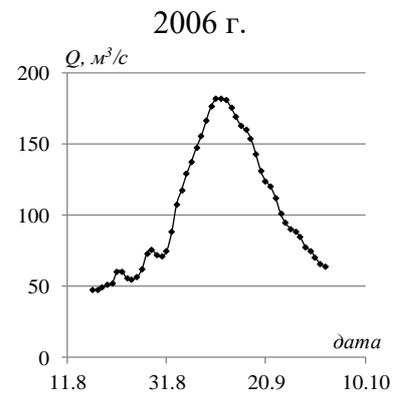
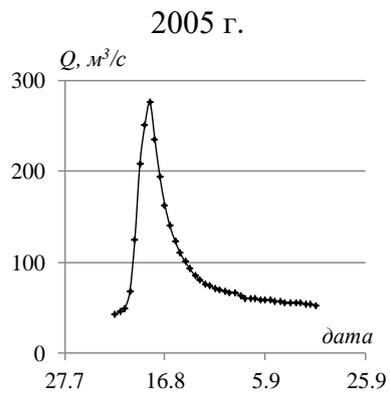
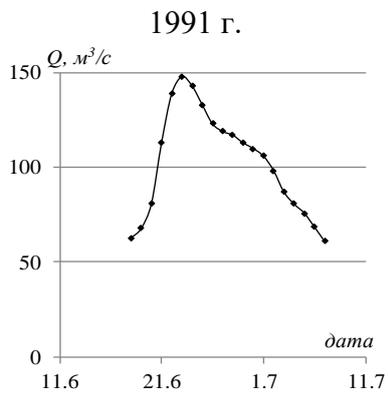
Котра – Сахкомбинат



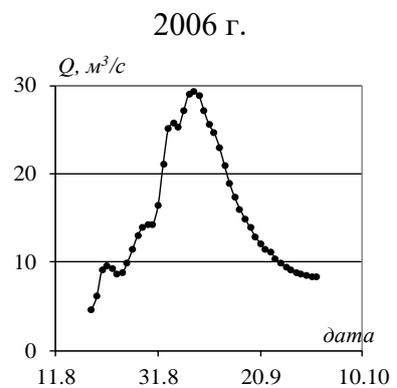
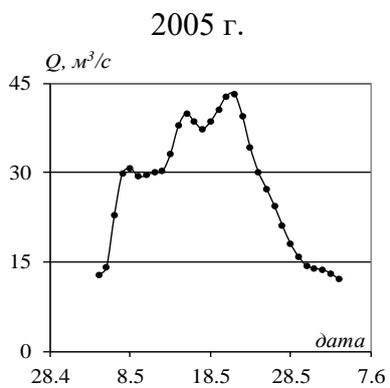
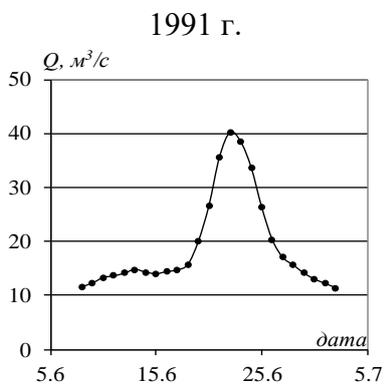
Виляя – д. Стешицы



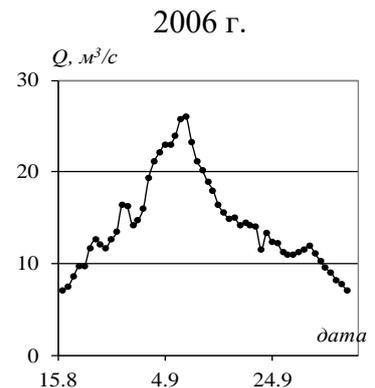
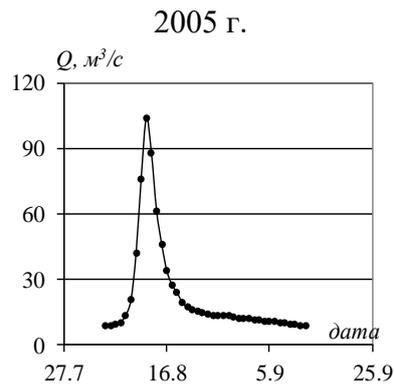
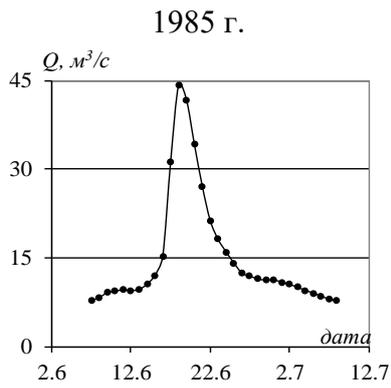
Виляя – г. Вилейка



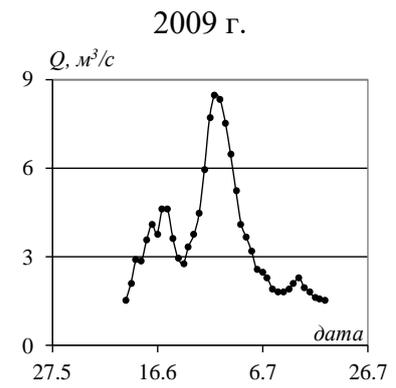
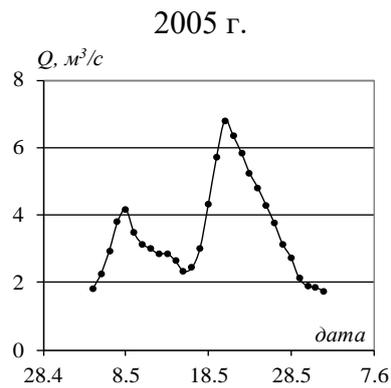
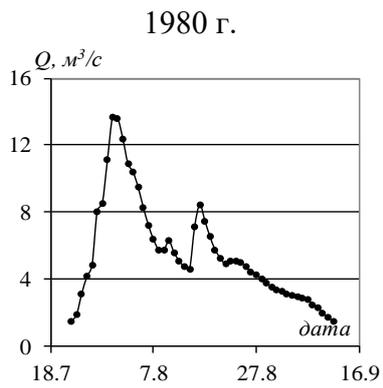
Виляя – д. Михалишки



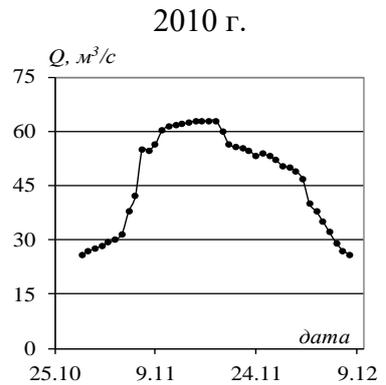
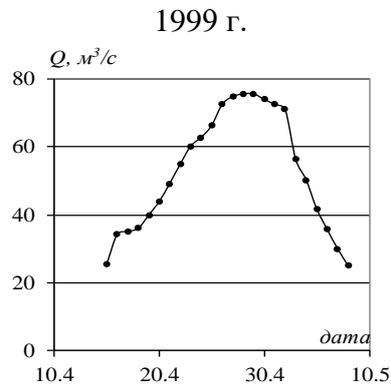
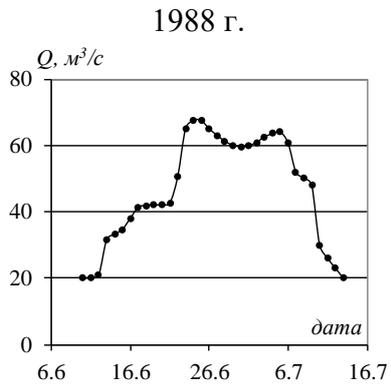
Нарочь – д. Нарочь



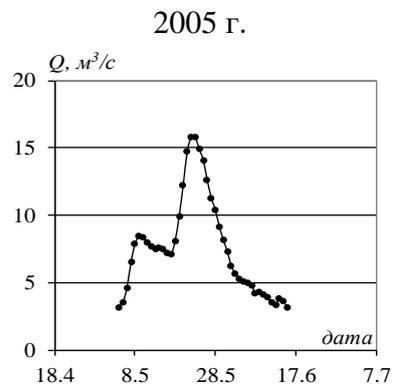
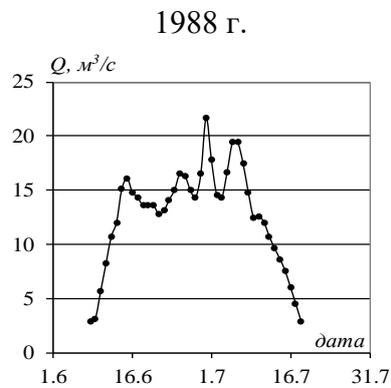
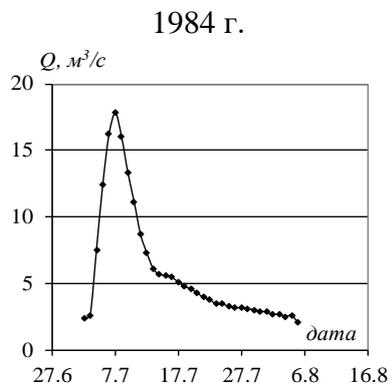
Ошмянка – д. Большие Яцыны



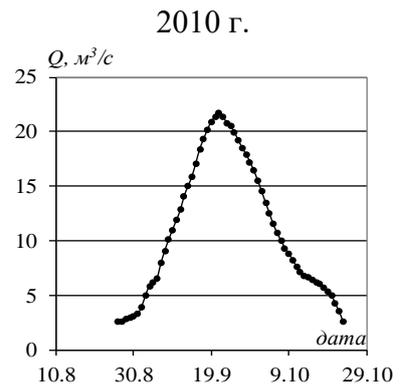
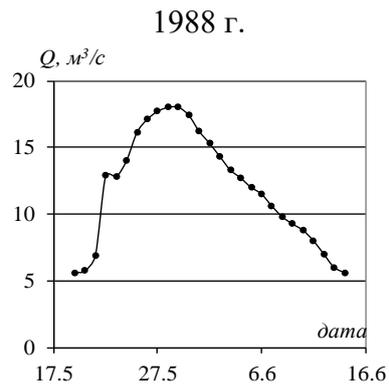
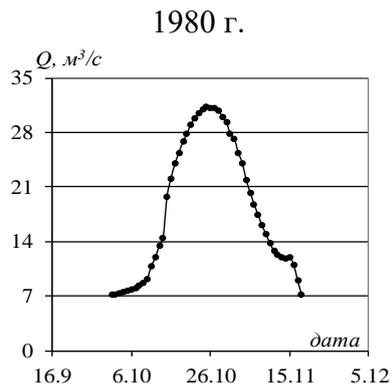
Копаяювка – д. Черск



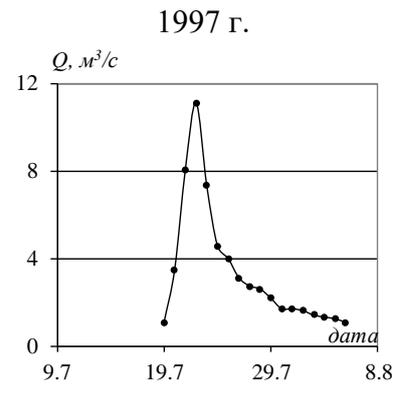
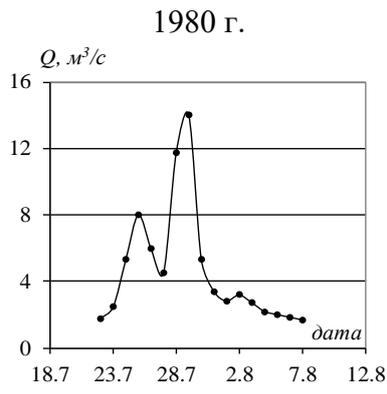
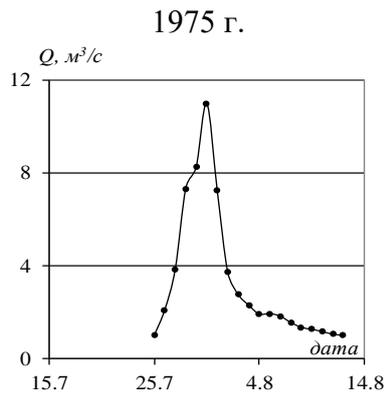
Мухавец – г. Брест



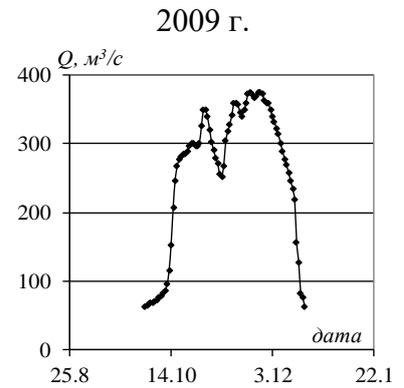
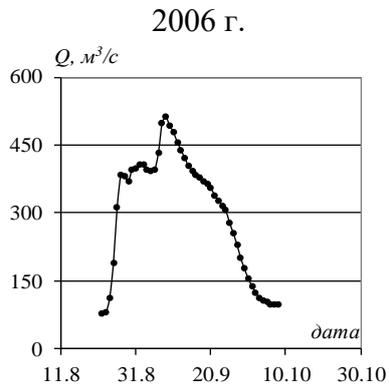
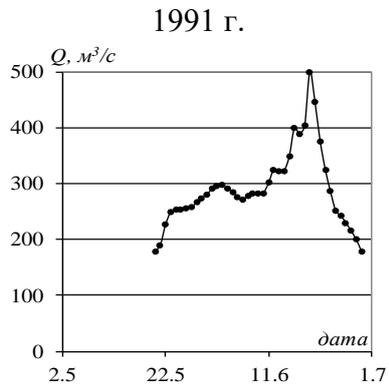
Рыга – д. Малые Радваничи



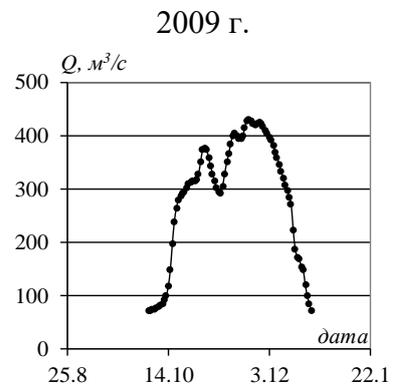
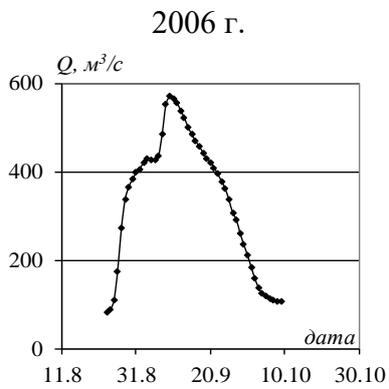
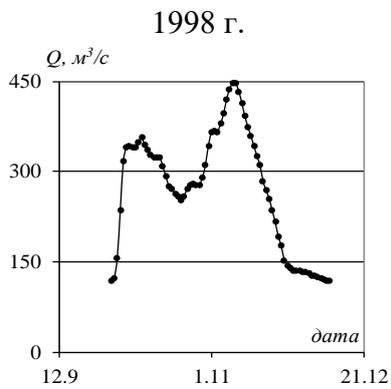
Лесная – г. Каменец



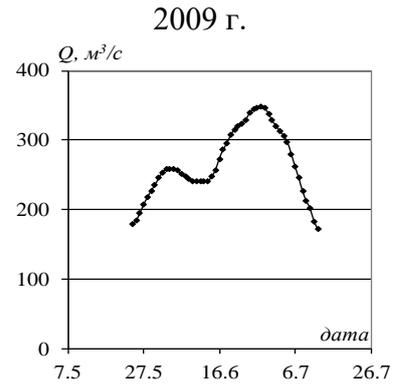
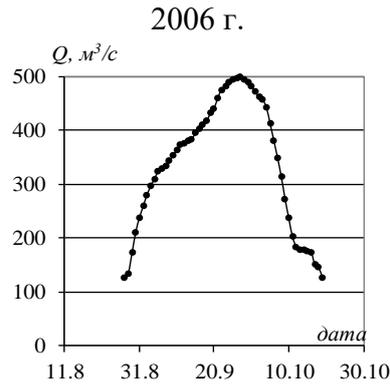
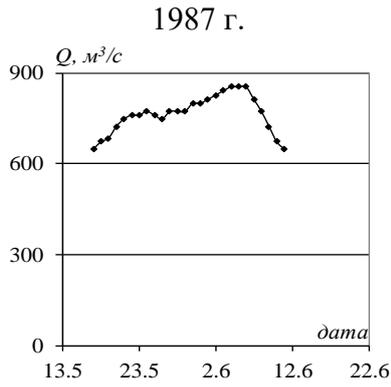
Пульва – г. Высокое



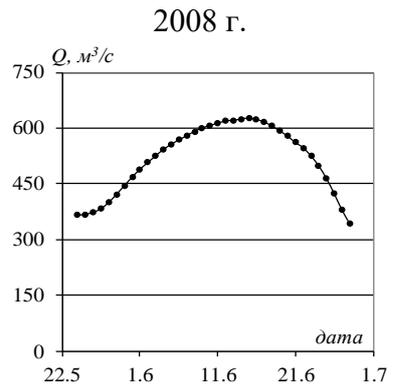
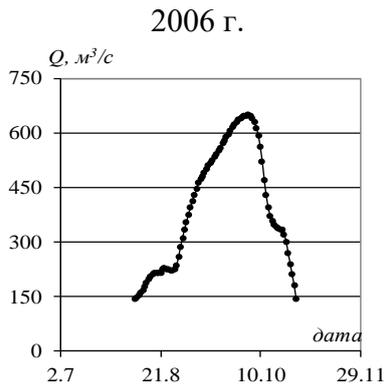
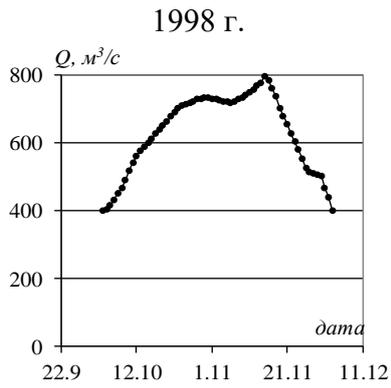
Днепр – г. Орша



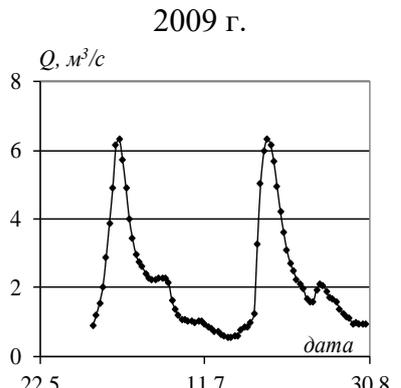
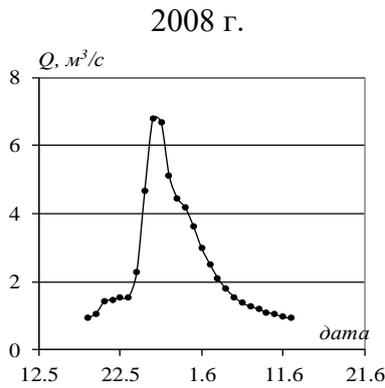
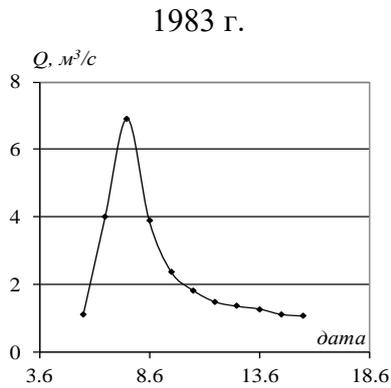
Днепр – г. Могилев



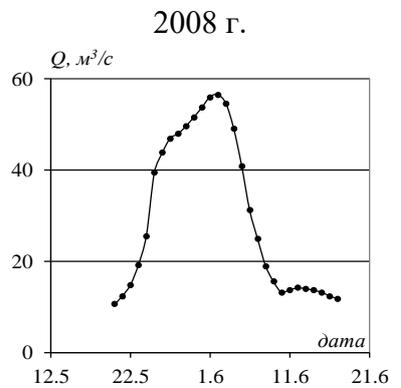
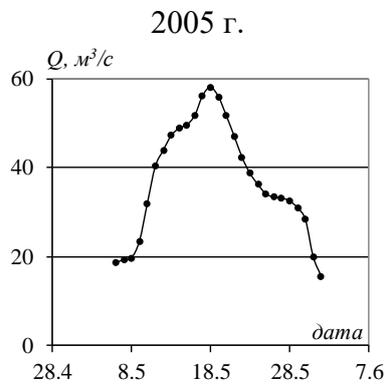
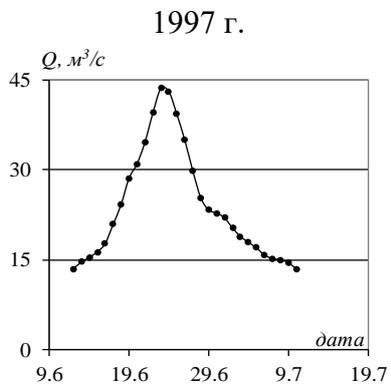
Днепр – г. Жлобин



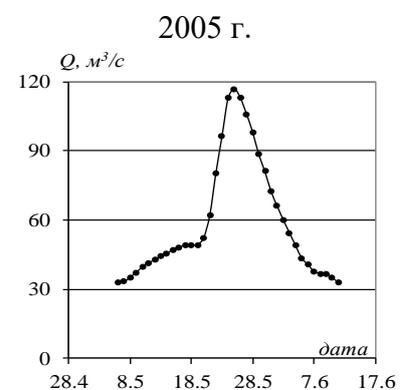
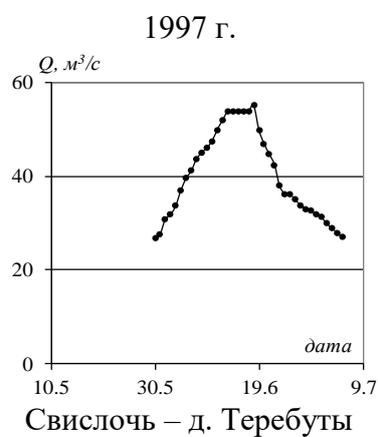
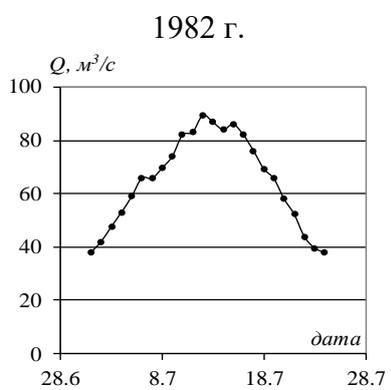
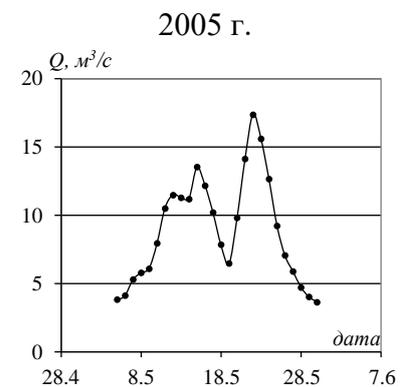
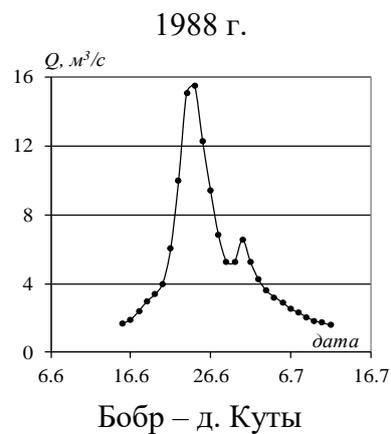
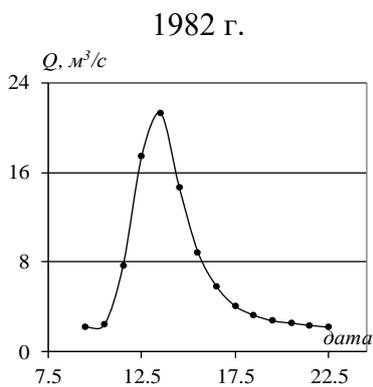
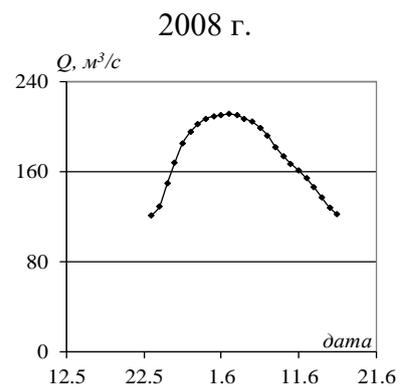
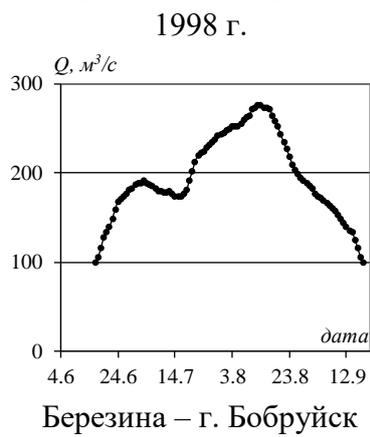
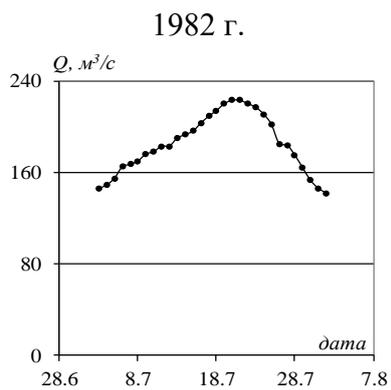
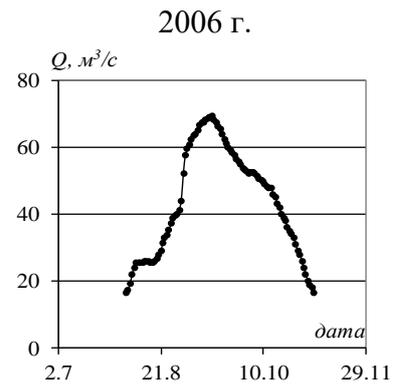
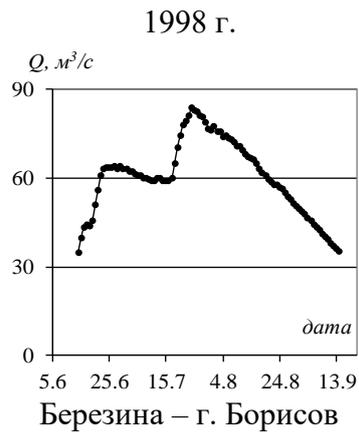
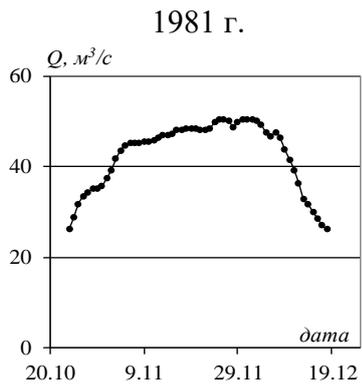
Днепр – г. Речица

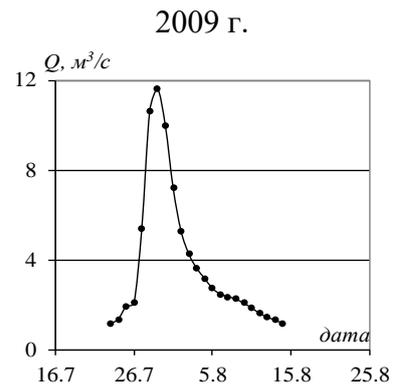
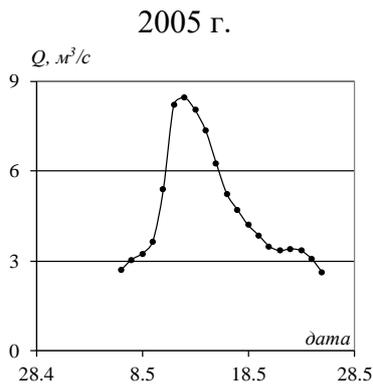
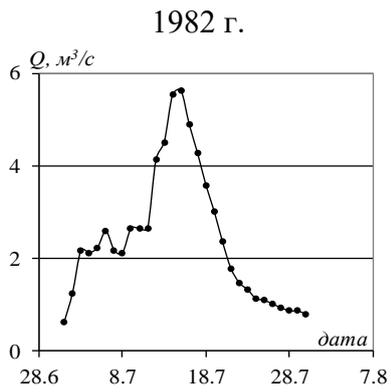


Ухлясть – д. Радьков

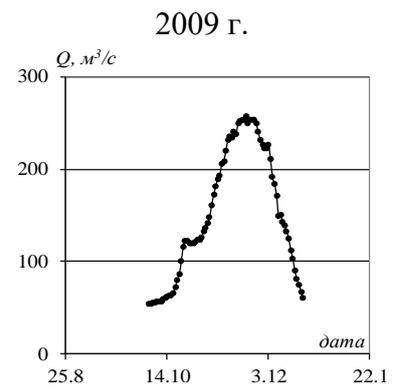
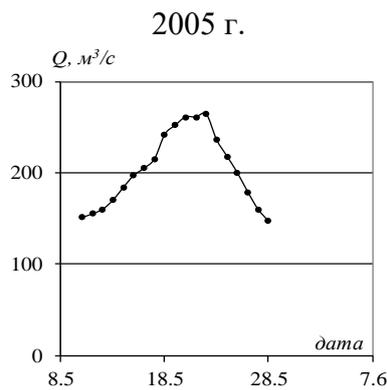
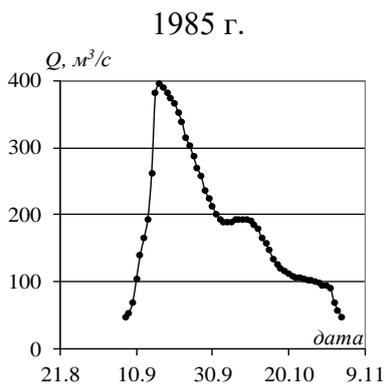


Друть – д. Городище

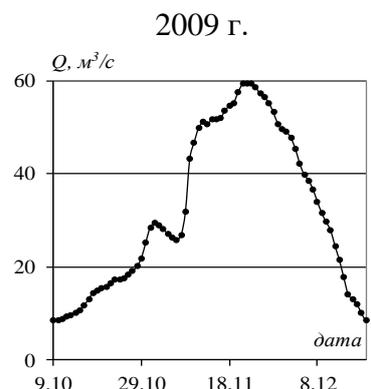
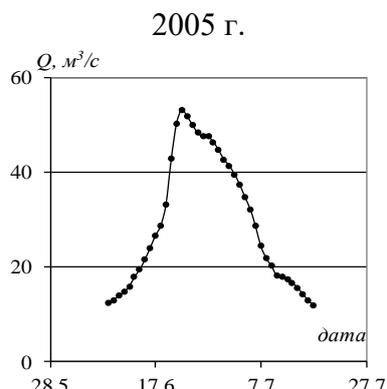
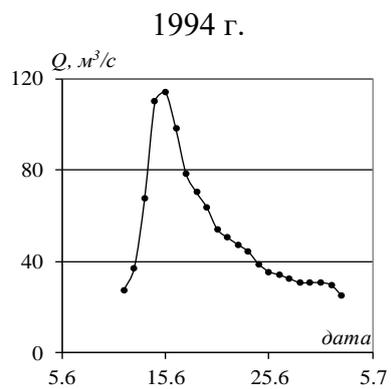




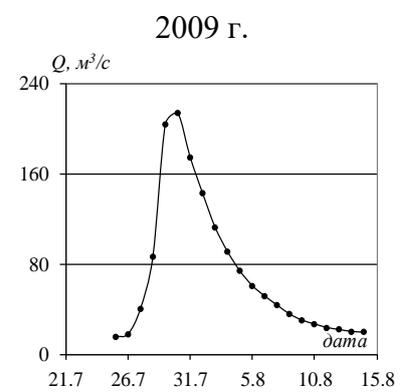
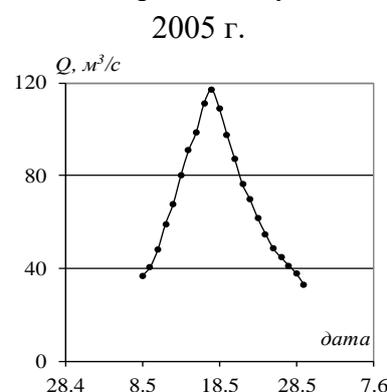
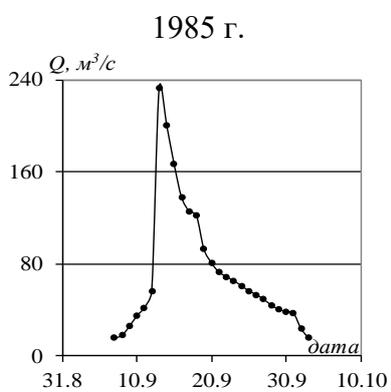
Сушанка – д. Суша



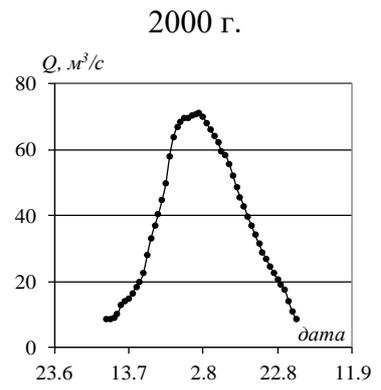
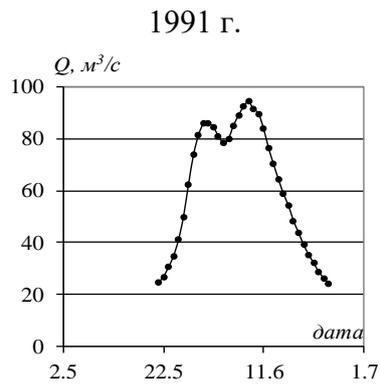
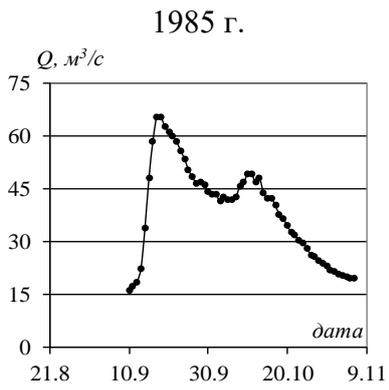
Сож – г. Славгород



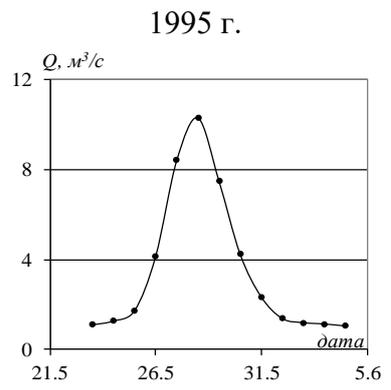
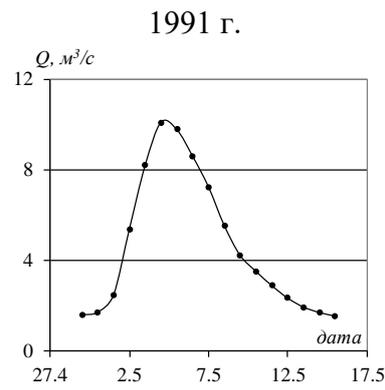
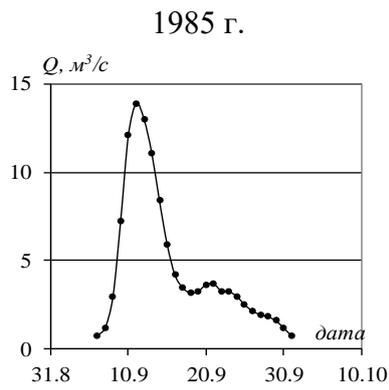
Остер – д. Ходунь



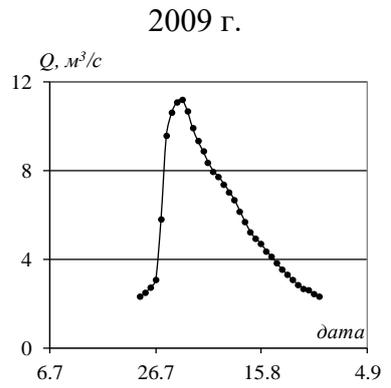
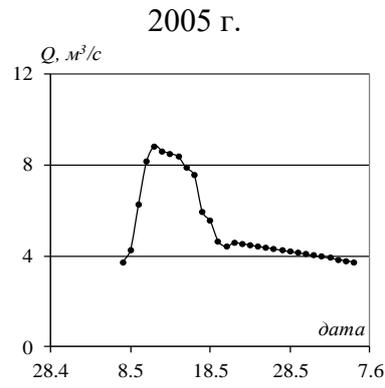
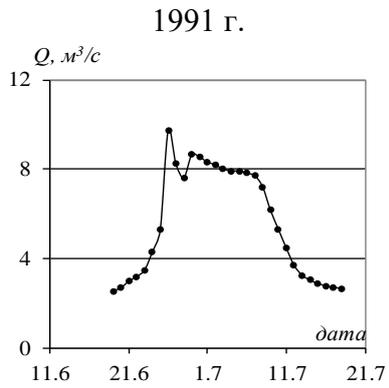
Проня – д. Летяги



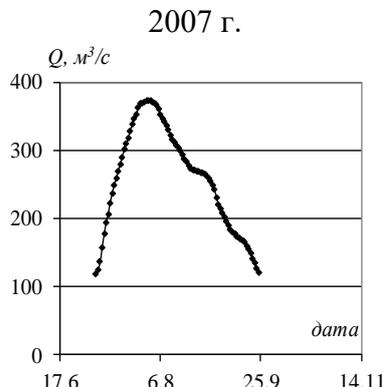
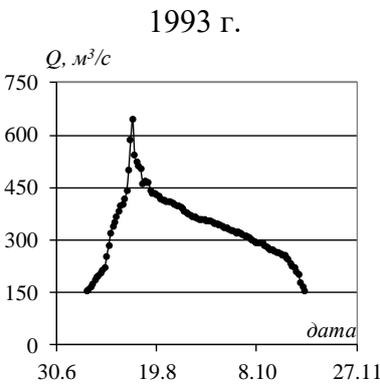
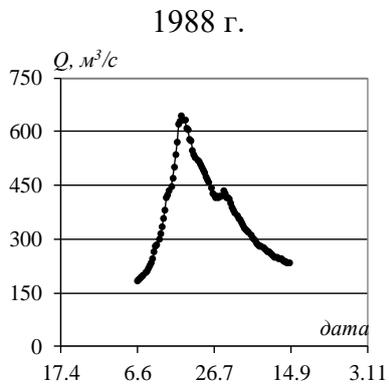
Беседь – д. Светиловичи



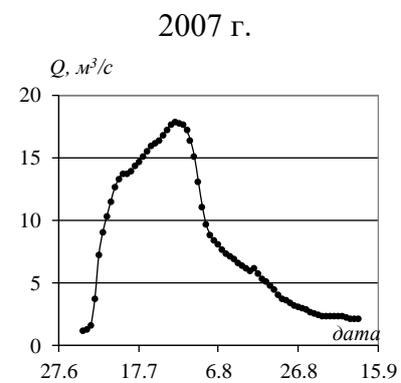
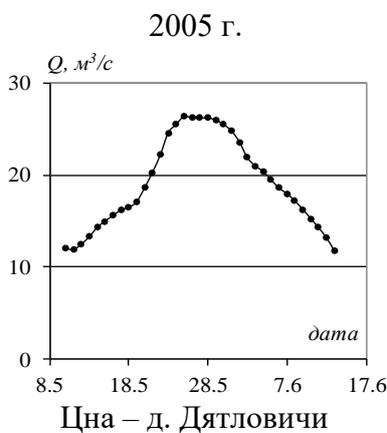
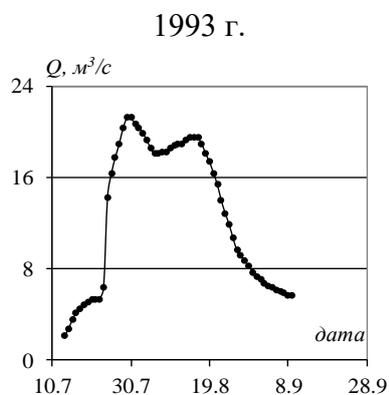
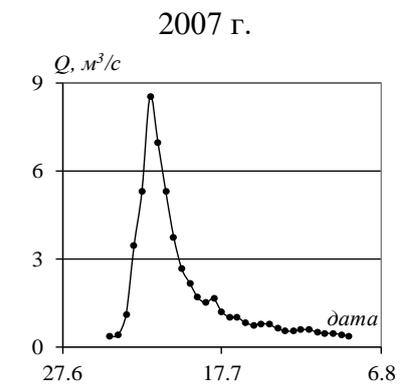
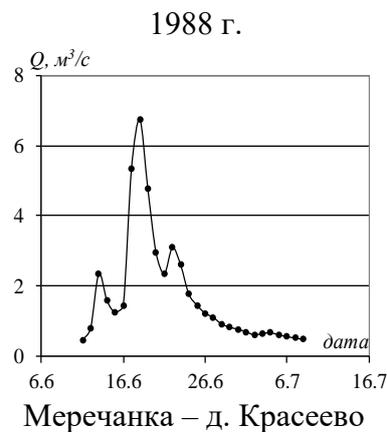
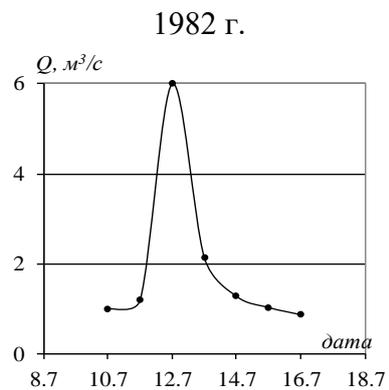
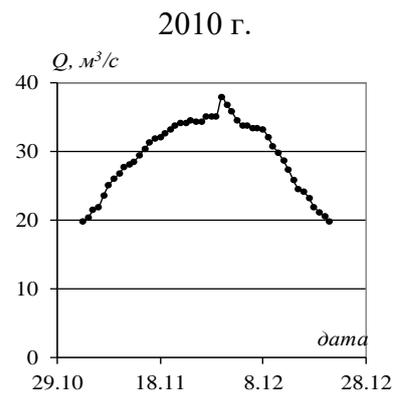
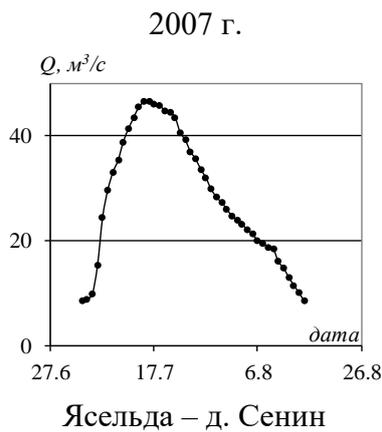
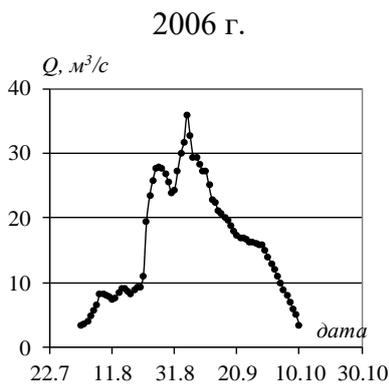
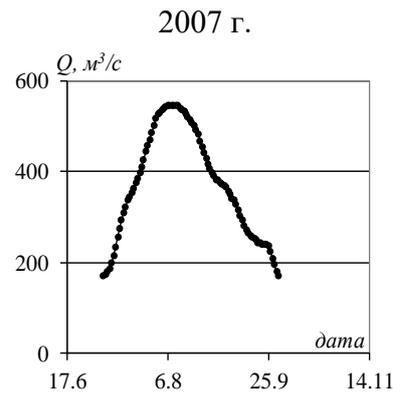
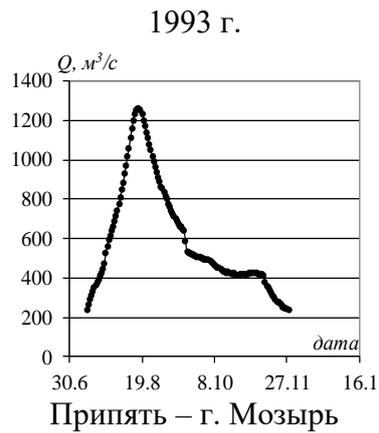
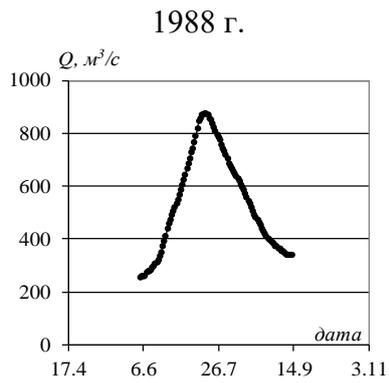
Жадунька – г. Костюковичи

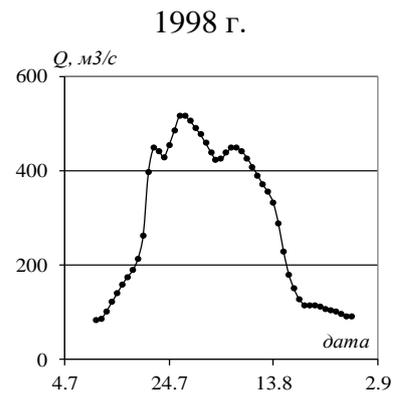
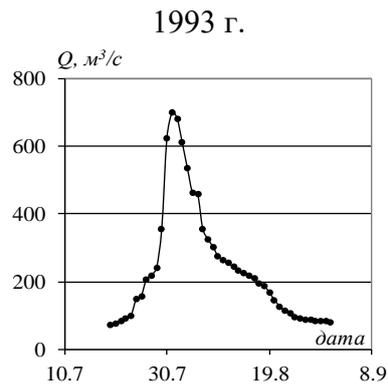
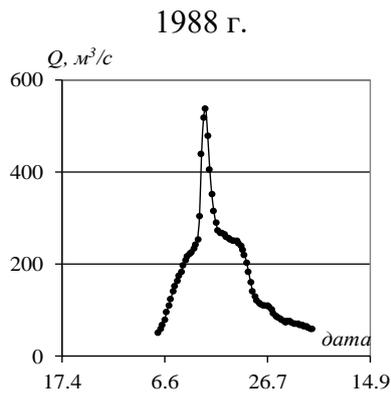


Уза – д. Прибор

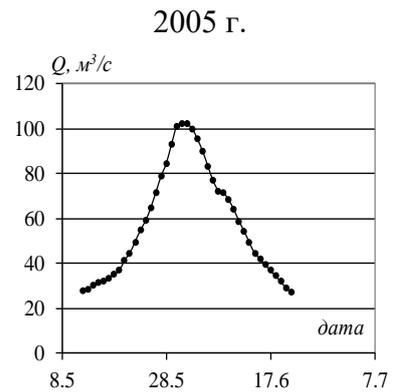
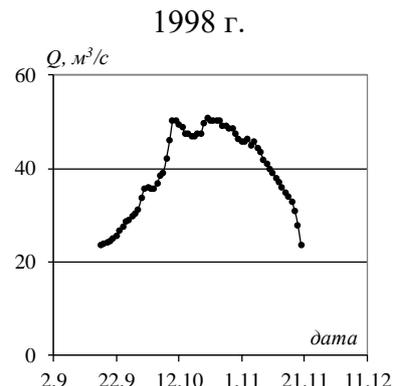
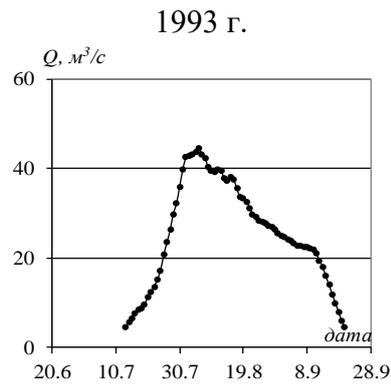


Припять – д. Черниччи

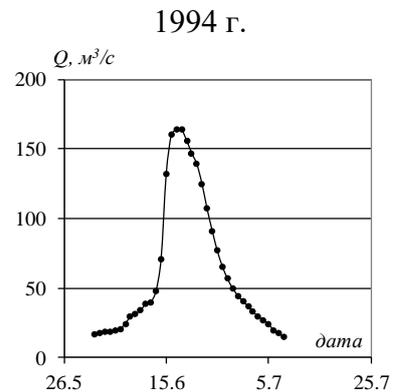
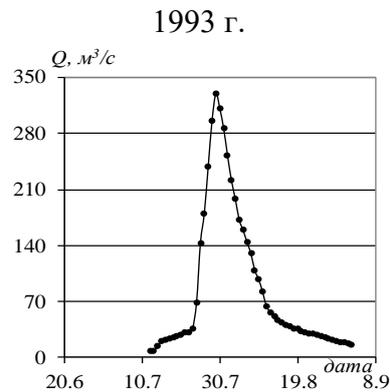
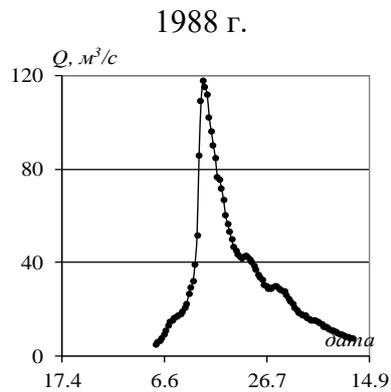




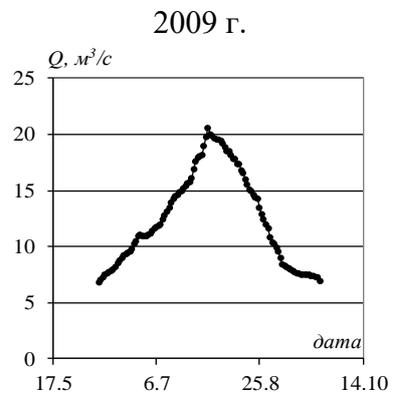
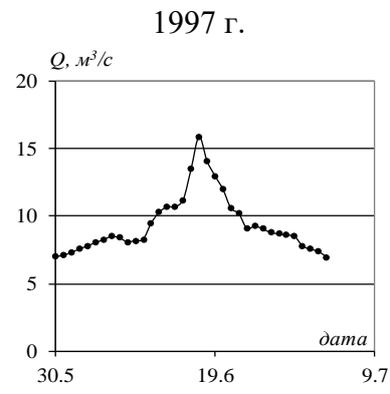
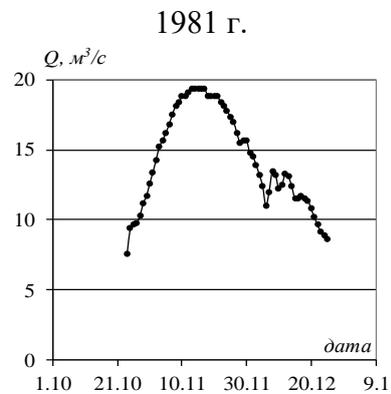
Горынь – д. Малые Викоровичи



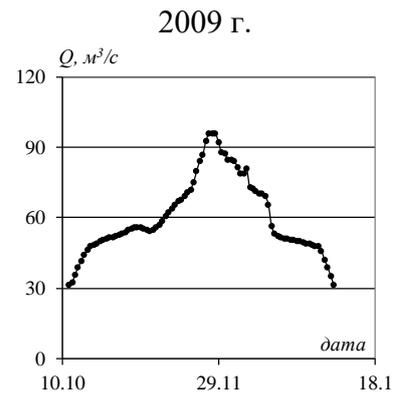
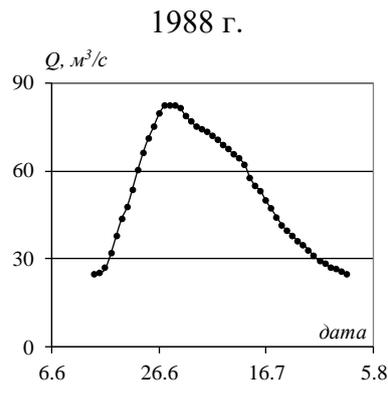
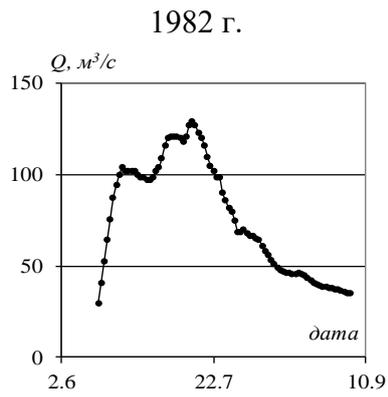
Случь – д. Ленин



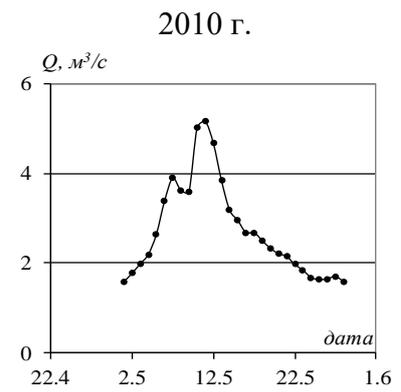
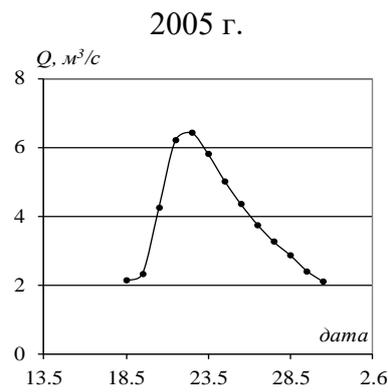
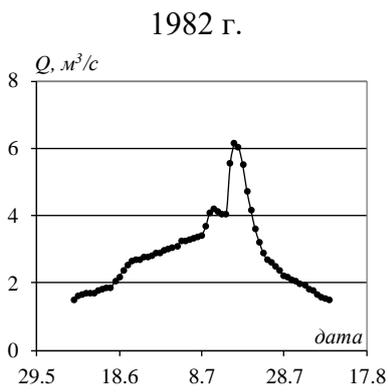
Уборть – д. Краснобережье



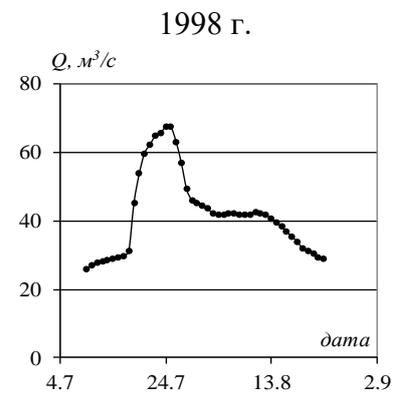
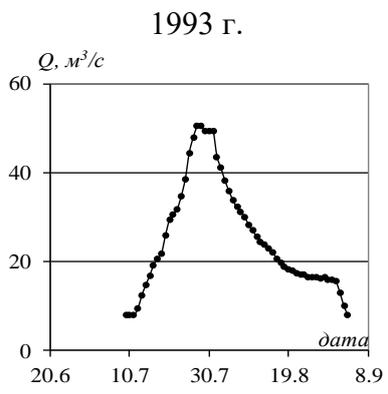
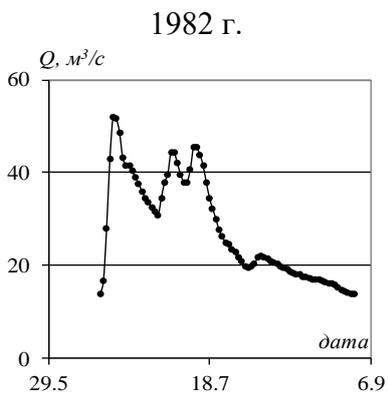
Птичь – д. Дараганово



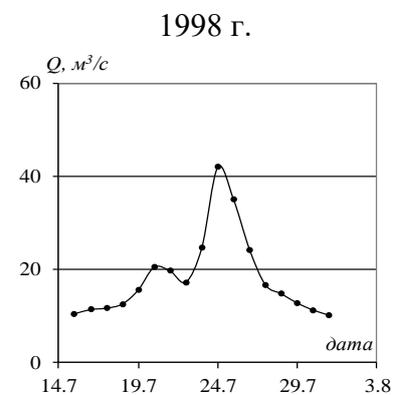
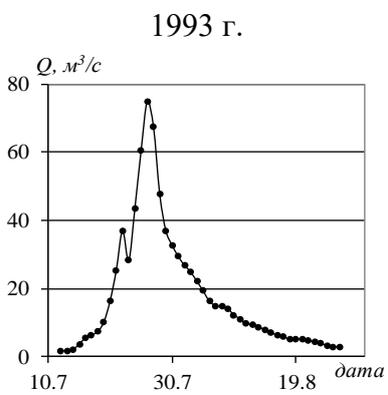
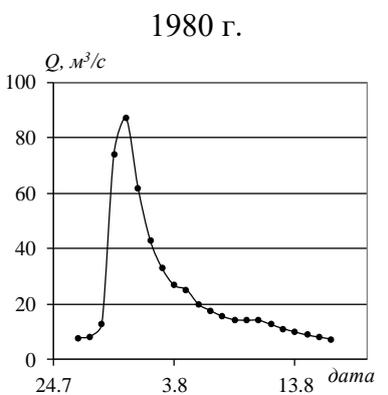
Птичь – д. Лучицы



Шать – д. Шацк



Оресса – д. Андреевка



Словечна – д. Кузьмици

*Научное издание*

**Волчек Александр Александрович**  
**Шелест Татьяна Анатольевна**

**ПАВОДКИ НА РЕКАХ БЕЛАРУСИ**

**Монография**

Подписано в печать 05.07.2016. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Ризография. Усл. печ. л. 11,63. Уч.-изд. л. 13,67.

Тираж 100 экз. Заказ № 315.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

распространителя печатных изданий

№ 1/55 от 14.10.2013.

Ул. Мицкевича, 28, 224016, Брест.