

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

А.А. ВОЛЧЕК, О.И. ГРЯДУНОВА

МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК РЕК БЕЛАРУСИ

(Основные закономерности формирования и методы расчета)

монография

Брест
БрГУ имени А.С. Пушкина
2010

УДК 551.48(476.7)

ББК 26.22(4Беи)

Б73

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

Рецензенты:

Доктор географических наук, профессор

А.М. Владимиров

Доктор технических наук, профессор

Э.И. Михневич

Волчек, А.А.

Минимальный сток рек Беларуси : монография / А.А. Волчек, О.И. Грядунова ; Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина – Брест : БрГУ, 2010. – 300, с.

ISBN

В монографии представлены закономерности формирования минимального стока рек Беларуси, показана роль отдельных факторов в пространственно-временных колебаний стока на основе анализа более 150 временных рядов за период с 1881 по 2000 гг. дана оценка влияния природных факторов и антропогенных воздействий на современном этапе на минимальный сток. Предложена методика оценки минимального стока при отсутствии данных наблюдений.

Книга рассчитана на гидрологов, мелиораторов, гидротехников. Она может быть использована в качестве учебного пособия студентами географических, гидрометеорологических и технических вузов.

УДК 551.48(476.7)

ББК 26.22(4Беи)

ISBN

©А.А. Волчек, О.И. Грядунова, 2010

©УО «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина», 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
ГЛАВА 1 ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ	9
1.1 Основные сведения из истории изучения минимального стока	9
1.2 Принятые понятия существующих терминов	15
1.3 Периоды малой водности на реках Беларуси за период инструментальных наблюдений и летописных изда- ний	19
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ	27
2.1 Источники исходной информации	27
2.2 Выбор репрезентативного периода	29
2.3 Анализ однородности рядов гидрологических величин ..	35
2.4 Восстановление пропусков в наблюдениях	39
2.5 Особенности картографирования водных ресурсов	41
ГЛАВА 3 ФОРМИРОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ	44
3.1. Физико-географические факторы, формирующие ми- нимальный сток рек	44
3.1.1 Геология, гидрогеология и рельеф	44
3.1.2 Климат	50
3.1.3 Почвенный и растительный покров	54
3.1.4 Болота и озера	55
3.2. Влияние природно-климатических факторов на фор- мирование минимального стока	57
ГЛАВА 4. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ	64
4.1. Временная (внутрирядная) структура минимального стока рек Беларуси	64
4.2. Пространственная структура минимального стока рек Беларуси	73
4.2.1 Анализ однородности полей гидрологических величин минимального стока	73

4.2.2 Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний минимального стока	78
4.2.3 Выделение гидрологически однородных районов минимального стока	84
4.3. Изменения минимального стока рек Беларуси	89
4.4 Прогнозная оценка колебаний минимального стока рек Беларуси	102
ГЛАВА 5. РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА ВОДЫ МАЛЫХ РЕК БЕЛАРУСИ	118
5.1. Расчет минимального стока рек при отсутствии гидрометрических наблюдений	118
Заключение	132
Литература	135
Приложение А Результаты исследований однородности временных рядов	148
Приложение Б Результаты спектрально-временного анализа.	154
Приложение В Результаты количественной оценки изменений минимального стока	162
Приложение Г Результаты прогнозной оценки минимального стока	166

ВВЕДЕНИЕ

Республика Беларусь обладает широким спектром природных ресурсов, которые позволяют увеличить темпы устойчивого развития экономики. Экологический аспект устойчивого развития республики предполагает охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, сохранение биологического разнообразия. Важное место в Концепции и Стратегии устойчивого развития Беларуси отводится вопросам охраны и использования водных ресурсов, так как в последнюю четверть XX века они начали испытывать значительные изменения под воздействием как антропогенных, так и природных факторов [26].

Водные ресурсы страны, одно из важнейших богатств, отличаются от других природных компонентов – земельных, растительных, полезных ископаемых и т.д. – высокой изменчивостью. Их особенность заключается также в том, что различные водные ресурсы – речные, подземные воды и почвенная влага – находятся в тесной взаимосвязи и взаимообусловленности между собой [30].

Ресурсы поверхностных вод Беларуси составляют $58 \text{ км}^3/\text{год}$, из которых 64% ($36,4 \text{ км}^3$) формируются в пределах Беларуси. Приток воды с территории соседних государств (России и Украины) равен $21,6 \text{ км}^3$, или 36%. В зависимости от водности года изменяется и суммарный речной сток, в многоводные годы он может достигать 96 км^3 в год, снижаясь в маловодные до 36 км^3 в год. Местный сток изменяется в соответствии с водностью года от 61 до 24 км^3 в год.

Реки страны принадлежат к бассейнам двух морей – Черного и Балтийского, соответственно 56% и 44% площади водосбора. Из общего числа рек и ручьев (20,8 тыс.) суммарной протяженностью 90,6 тыс. км абсолютное большинство водотоков относится к малым равнинным рекам. **Малая река** – это река, имеющая размер водосборной площади менее $2\,000 \text{ км}^2$ и длину не более 200 км. Малые реки дренируют до 80% территории Беларуси и формируют до 70% водных ресурсов [12]. Статус достаточно **больших рек**, длина которых более 500 км, имеют только семь рек – Западная Двина, Неман, Виляя (бассейн Балтийского моря), Днепр, Березина, Сож и Припять (бассейн Черного моря).

В связи с изменением климата, увеличением антропогенной нагрузки на сами реки и их водосборы особую актуальность приобретает изучение ресурсов поверхностных вод Беларуси в современных условиях. Особое

внимание необходимо уделить изучению вопросов внутригодового распределения речного стока (минимальных расходов рек), так как анализ данных наблюдений гидрометеорологических станций в Беларуси выявил пространственно-временные изменения элементов климата и в первую очередь температуры воздуха и количества атмосферных осадков [35, 87, 88]. Наибольшие изменения коснулись летнего и зимнего сезона, когда на реках Беларуси формируется летне-осенняя и зимняя межень. Большой урон хозяйству республики приносят годы с аномальными климатическими показателями, которые наиболее часто стали проявляться в последние десятилетия XX – начале XXI столетий и оказали заметное влияние на минимальный речной сток рек Беларуси.

Минимальные расходы воды, определяющие собой водные ресурсы рек в самое маловодное время года, представляют большой практический интерес. Они учитываются при решении самых разнообразных водохозяйственных задач: проектирование гидростанций для выработки энергии, водоснабжение городов, сельских населенных пунктов, водного транспорта. Величина минимального стока необходима при расчетах сброса сточных вод и самоочищения воды в реках, определение возможности судоходства и лесосплава и особенно при решении важнейшей проблемы, связанной с мелиорацией земель. В последнее время в республике уделяется много внимания развитию туризма (экотуризма), в том числе и водного. Водный туризм в Беларуси возможен в течение полугода с апреля по ноябрь, а наиболее востребованное – это лето, хотя сплавные отрезки в летне-осеннюю межень укорачиваются, поэтому для развития водного туризма также необходимо разрабатывать сезонные прогнозные модели.

В результате заборов воды происходит истощение речного стока, а при сбросах даже очищенных промышленных, сельскохозяйственных и бытовых стоков наблюдается изменение качества воды. В том и другом случаях последствием может явиться ухудшение экологического состояния реки. Наиболее остро это может происходить в маловодную фазу речного стока и, особенно, в годы с малой водностью. Таким образом, забор воды из рек ведет к общему уменьшению речного стока, а ее загрязнение практически дает тот же результат, уменьшая количество чистой воды. Однако в реке должен оставаться такой объем воды, который бы обеспечивал минимальные условия сохранения водных экосистем. **Экологический сток** – это то количество воды, которое должно оставаться в реке для обеспечения условий существования гидробионтов с одновременным сохранением ее необ-

ходимого качества. В этом случае сохраняются экосистемы пойм, а река остается элементом ландшафта. Следовательно, экологический сток обеспечивает количественное и качественное состояние водного объекта в самый маловодный период года [7, 106, 127, 128, 129].

Изученность вопросов формирования летне-осеннего и зимнего минимального стока на территории Беларуси отстает от возрастающих потребностей народного хозяйства республики. В последнее время большое внимание уделяется качественному состоянию водных ресурсов, геоэкологической оценке, гидроэкологическим исследованиям. При любом виде хозяйственного освоения водных ресурсов возникает проблема учета и оценки нижнего предела расхода воды, который необходимо оставлять в реке и не включать в хозяйственное использование и тем более изъятие. Максимальные и минимальные расходы могут выступать как стихийные явления и процессы, что крайне негативно воздействует на жизнь и деятельность человека. Наводнения и засухи приносят колоссальные материальные затраты, возросли возможности персональных компьютеров и пакетов прикладных программ, поэтому назрела необходимость провести более детальные исследования пространственно-временных колебаний годового, максимального и минимального стока рек Беларуси.

Минимальный сток рек Европейской части СССР, в том числе и Беларуси, был рассмотрен в работах Д.И. Кочерина [80], Л.А. Сибирцевой [123], Н.Д. Антонова [6], А.М. Владимирова [21–25], В.А. Баранова и Л.Н. Попова [9], А.Г. Курдова [84]. Наиболее подробно территория Беларуси изучена в работах Д.А. Данович [56], А.М. Норватова [100–103], К.А. Ключевой [75–77], В.В. Дрозда [60], П.Д. Гаттило [43], Н.М. Кургановой [83], И.М. Филипповича [131], Е.Е. Петлицкого [107, 108], Б.В. Фащевский [127, 130].

Актуальность проводимых исследований обусловлена заметными изменениями водности рек в последние десятилетия, которые связывают с глобальным потеплением и увеличением антропогенной нагрузки. Одной из наиболее важных гидрологических величин является минимальный сток и его пространственно-временные колебания. Минимальный сток определяет развитие и функционирование водных и околородных экосистем, имеет существенное значение при решении водохозяйственных задач (объемы водопотребления, сброса сточных вод). Научное и практическое значение имеет выявление закономерностей пространственно-временных колебаний минимального стока в современных условиях, адаптация суще-

ствующих и разработка новых методик определения минимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, особую значимость приобретают прогнозные оценки изменения минимального стока.

Авторы выражают благодарность за пожелания и замечания высказанные при рецензировании рукописи доктору географических наук, профессору, заведующему кафедрой гидрологии суши Российского государственного гидрометеорологического университета А.М. Владимирову, доктору технических наук, профессору заведующему кафедрой водоснабжение и водоотведение Белорусского национального технического университета Э.И. Михневичу, а также д.г.н. Н.В. Мякишевой (РГГМУ, Санкт-Петербург), к.г.н. М.Л. Маркову (ГГИ, Санкт-Петербург), д.г.н. Д.А. Суббето (РГПУ им. А.И. Герцена), членам кафедры гидрологии суши РГГМУ Санкт-Петербург.

ГЛАВА 1

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1 Основные сведения из истории изучения минимального стока

Низкий сток как комплексное понятие в гидрологии не изучался, в той или иной степени исследовались лишь отдельные аспекты. Основное внимание обычно уделялось минимальному стоку рек [25]. В истории исследования минимального стока можно выделить несколько этапов [125]:

I. Расширение сети гидропостов и гидрометеостанций, анализ кадастровых данных, исследования генезиса формирования минимального стока – до 1960 г. (Д.И. Кочерин, Л.А. Сибирцева, А.Х. Коваль, Н.Д. Антонов, Б.В. Поляков, М.Э. Шевелев);

II. Синтез гидрологического и гидрогеологического подхода к формированию минимального стока, подготовка Справочников по водным ресурсам и издание первых нормативных документов по минимальному стоку – 1960–1970 гг. (В.А. Балков, В.А. Баранов, Н.Б. Барышников, С.Н. Боголюбов, З.П. Богомазова, А.М. Владимиров, Д.А. Данович, А.Г. Курдов, А.М. Норватов, Г.Н. Петров, Л.Н. Попов, А.А. Соколов, О.М. Сотченко, В.В. Федоров, Н.П. Чеботарев, Г.О. Чиппинг);

III. Исследования формирования и изменения минимального стока в условиях усиления антропогенной нагрузки (осушительная мелиорация, загрязнения) и изменения климата – 1970 – до настоящего времени (А.З. Амусья, А.Б. Андерсон, Н.П. Артемьева, А.Г. Булаво, В.Е. Водогрецкий, А.Г. Гриневич, В.В. Дрозд, А.Г. Каска, К.А. Ключева, К.А. Лысенко, И.М. Филиппович) [1, 2, 3, 4, 8].

Впервые районирование Европейской части СССР, в том числе и Беларуси, по низким расходам воды выполнил в 1929 г. Д.И. Кочерин [80]. Эти исследования были продолжены Л.А. Сибирцевой, которая в 1937 г. опубликовала сводку о минимальных расходах воды по 280 пунктам наблюдений на реках Европейской территории СССР и провела районирование [123].

На первом этапе исследования были основаны исключительно на материалах гидрометрических наблюдений на реках главным образом средней полосы европейской части Союза и почти не учитывали связи мини-

мального стока с гидрогеологическими условиями. Определяющим аргументом являлась норма годового стока, это при большом территориальном разнообразии условий формирования минимального стока не позволило достичь необходимой точности расчета.

Второй этап исследований минимального стока характеризуется изучением генетических особенностей формирования минимального стока, что способствовало повышению точности расчетных моделей.

Комплексный подход к проблеме изучения минимального стока содержится в работах Ф.А. Макаренко [93], А.М. Норватова и др. [47, 78, 99, 100, 101]. А.М. Норватов разработал схему районирования минимального стока малых рек на основе карты районов подземного стока, составленной М.П. Распоповым [113]. Норватов А.М. отмечал большое значение гидрогеологических условий в формировании минимального стока и установил, что внутри относительно однородных по гидрогеологическому строению районов модуль минимального стока увеличивается пропорционально глубине эрозионного вреза или площади бассейна реки как тождественной характеристики. Но он ограничился только констатацией, т.к. в то время гидрогеологическое районирование было схематично и не учитывало локальных особенностей отдельных районов.

Исследование стокообразующих факторов минимального стока рек Беларуси позволило довольно подробно рассмотреть условия формирования минимального стока и предложить методы расчета минимальных модулей стока и коэффициентов вариации и асимметрии [56].

В середине 50-х годов прошлого столетия попытку генетического анализа процесса формирования минимального стока предпринял Н.П. Чеботарев [134]. Построенная им схема, основанная на теории изохрон стока, включала площадь водной поверхности речных русел, потери на испарение и ледообразование, для количественного определения которых предложены эмпирические зависимости. Эта схема оказалась слишком громоздкой. Параллельно велись исследования влияния озерного регулирования на величину минимального стока рек [124]. Также предприняты попытки долгосрочных прогнозов минимального стока для нужд водного транспорта [10, 54, 130].

Схема Н.П. Чеботарева была использована А.Г. Курдовым [84] для определения минимальных расходов воды на реках Центрально-Черноземных областей. При этом автор, стремясь получить законченное решение, оказался перед необходимостью вернуться к построению обычной эмпириче-

ской связи типа Шевелева-Антонова, введя в нее K для учета влияния местных стокоформирующих факторов [84].

Наиболее полно проблема минимального стока была рассмотрена в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) в 1960–1966 гг. При этом задача решалась на основе синтеза гидрологического и гидрогеологического подходов к рассматриваемой проблеме.

По результатам исследований ученых ГГИ, МГУ (Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова) и ВСЕГИНГЕО (Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии) были составлены карты подземного стока в реки с учетом обширных гидрогеологических и гидрологических материалов [68, 69]. При построении карт подземного стока были учтены гидрогеологические особенности формирования подземного стока (обводненность пород, условия питания и разгрузки подземных вод, режим подземного стока). В 1966 г. В.А. Баранов и Л.Н. Попов [9, 109] разработали и построили ряд карт для минимального стока. В том же 1966 г. А.М. Владимиров в своих работах предложил схему расчета не только расхода минимального стока, но и коэффициентов вариации (C_v) и асимметрии (C_s). В основу расчета положена зависимость расхода минимального стока воды от глубины эрозионного вреза реки, но так как эту величину сложно определить, то ее можно заменить тождественной – площадью водосбора. В схеме четко различается минимальный сток холодного и теплого периодов и дается для их расчета отдельные карты и таблицы. Для расчета коэффициента вариации используется карта, а коэффициент асимметрии предлагается различать для увлажненных районов $C_s = 2 C_v$, а для засушливых – $C_s = C_v$ или $C_s = 1,5 C_v$ [22–24]. А.М. Владимиров подготовил ряд Справочников и нормативных документов по минимальному стоку.

Исследованиям роли эрозионного вреза водотоков в формировании минимального стока в которых сделан вывод, что величина подземного питания рек, находящихся в одной физико-географической зоне и одной геологической провинции, зависит от того, насколько отметка вреза русла близка к отметке регионального базиса эрозии посвящены работы С.Н. Боголюбова и З.П. Богомазова в 1956 г., в 1966 г. К.А. Лысенко и А.М. Владимирова, в 1983 г. В.М. Евстигнеева и А.В. Христофорова, а в 1999 В.М. Саковича [13, 23, 91, 121]. При этом отмечалось, что полный перехват подземного стока верхней зоны может осуществляться в условиях недостаточного увлажнения водотоками с площадью бассейна не менее

1000 км², а в зонах достаточного увлажнения водотоками – с меньшими площадями. К.А. Лысенко указанное положение с некоторыми изменениями использовал в работах для территорий Украины и Молдавии. В таблице 1.1 приведены основные модели расчета минимального стока.

Таблица 1.1 – Модели расчета минимальных расходов воды при отсутствии данных наблюдений

Автор	Год	Модель
М.Э. Шевелев [138]	1937	$q = \alpha \cdot A^n \cdot M_0^m$
Н.Д. Антонов [6]	1941	$q = M_0(\alpha \cdot A^n - b); C_v = a \cdot C_{v,200}^b$
А.М. Сотченко [26]	1947	$q = \alpha(M_0 - 0,2) \cdot d^n$
Д.А. Данович [56]	1950	$q = a + 0,51 \cdot \lg A; C_{v,l} = a - 0,131 \cdot \lg A$
А.М. Норватов [100]	1950	$q = f(A)$
Н.П. Чеботарев [134]	1954	$M = \alpha \cdot M_0^m \cdot A^r - \frac{P_1}{A^n}$
К.А. Ключева [76]	1961	$M_l = b \cdot \lg A \pm a; M_3 = b \cdot \lg A \pm a$
А.М. Владимиров [23]	1966	$Q = a \cdot (A \pm c)^n$
К.А. Лысенко [91]	1966	$q = f(H_{сп})$
А.Г. Курдов [84]	1970	$Q = A_0(A - A_{ое})^n$
Р.Г. Задорожная [66]	1975	$q = f(\Delta h_{сп})$

На современном этапе – развития науки и техники, изменения климата, обострения экологической ситуации – требуется рассмотрение вопросов минимального стока через призму современных насущных проблем [19, 20, 94, 145]. Водная проблема обострилась вследствие сильного загрязнения гидросферы. Качество воды не соответствует требованиям живущих в ней организмов, непригодна для питья, купания, полива сельскохозяйственных культур и использования в промышленности. В последнее десятилетие большое внимание уделяется разработке методики и расчету «экологического стока» (Б.В. Фащевский, Н.И. Коронкевич, Ю.Н. Емельянов, А.Г. Гриневич) [7, 49, 63, 79, 127, 128]. В Беларуси уже в 70-е годы прошлого века встал вопрос «... о минимально допустимом расходе воды в реках для охраны природы» [43, 131]. В межень (летне-осеннюю, зимнюю) водные и околосводные экосистемы наиболее уязвимы. Для того чтобы не нарушить гидроэкологическое равновесие территории необходимо в реке оставить экологический сток, так как несоблюдение этого требования приведет к экологическому кризису [31, 65]. Этот расход воды называют поразному: минимально допустимый [43, 131], природоохранный, экологиче-

ский [7, 79, 128], лимитирующий [5, 20, 49], экологически достаточный [104], минимально необходимый и т.п. При этом во всех случаях подразумевается практически одно и то же – это тот расход воды, изъятие ниже которого чревато отрицательными последствиями для природных условий, нормального функционирования речного потока, хозяйственного использования и санитарных условий ниже по течению, что влечет за собой экономические издержки и экологические последствия.

Гидрологические прогнозы являются наиболее полной формой удовлетворения гидрологией запросов практики, и умелое их использование дает существенное повышение эффективности водохозяйственных мероприятий. Ознакомление с имеющимися работами по прогнозу минимального стока рек позволяет выделить несколько направлений. В основе исследований первого направления лежит положение о том, что сток последующего периода находится в определенной зависимости от стока и метеорологической обстановки предшествующего периода (В.А. Назаров, А.М. Норватов, А.А. Махнева). Второе направление базируется на выявлении периодичности в изменении стока, аналогично цикличности солнечной активности и многих элементов климата. Многочисленными работами отечественных и зарубежных авторов отмечена связь солнечной активности и макросиноптических процессов, определяющих режим погоды (А.А. Гире). Представители третьего направления исходят из того, что метеорологические условия над какой-либо территорией, находятся в тесной зависимости от погодных процессов длительного предшествующего периода на значительной территории. Процессы, приводящие к однотипным аномалиям метеорологического режима или зависящим от атмосферных условий элементов гидрологического режима, имеют сходные типовые характеристики (А.Б. Крыжановская). Работы М.И. Гуревича [54], А.М. Норватова, Л.К. Ремизовой [118] развивают комбинированный метод прогноза минимальных расходов воды летнего периода, использующий как гидрологические, так и метеосиноптические средства. С 1931 г. в Беларуси начала действовать служба гидрологических прогнозов.

В Беларуси успешно разрабатываются научные проблемы, связанные с условиями формирования стока, особенностями его распределения по территории республики, по сезонам года. На карте модулей стока для Европейской части СССР, составленной Б.Д. Зайковым (1946), указан сток рек Беларуси. Специально для территории Беларуси И.М. Лившиц по данным наблюдений по 1953 г. детально разработал карту нормы годового

стока. В первый «Атлас БССР» (1958) вошли его карты «Годовой сток», «Сток за весенний и летний сезоны», «Сток за осенний и зимний сезоны». Ряд вопросов освещены Лившицем в работах «Внутригодовая обеспеченность расходов рек БССР» (1948), «Обеспеченность суточных расходов рек Полесья» (1955). Условия формирования нормы стока, минимального стока исследованы К.А. Ключевой, В.В. Салазновым. Изучению водного баланса рек и речных водосборов, методике расчета величины испарения с поверхности водоемов, влиянию мелиорации на речной сток посвящены труды А.Г. Булавко [15–18], В.Ф. Шебеко. Водный кадастр Белоруссии и Верхнего Поднепровья был составлен в 1966 г., куда вошли сведения о 142 реках и 26 озерах. С 1966 г. раз в пять лет выходили периодические издания в серии «Основные гидрологические характеристики». К 1970 г. был собран фактический материал о 145 реках и 174 озерах. Продолжались систематические наблюдения на 133 реках и 17 озерах, и полученные данные, вошли в справочник «Ресурсы поверхностных вод» (1971). Учеными Белорусского государственного университета изучена история развития озер в голоцене, произведена их генетическая классификация, определена взаимосвязь озер с водосборами, выяснены законы озерной седиментации. Значительным вкладом в озероведение Беларуси являются работы О.Ф. Якушко «Белорусское Поозерье» (1971), «Край озерный» (1978), «Озероведение. География озер Беларуси» (1981).

Главным научно-исследовательским учреждением в области гидрологии является ГУ «Республиканский гидрометеорологический центр» Департамента по гидрометеорологии. Крупным научным учреждением, ведущим разработку научно-технических обоснований комплексного использования водных ресурсов, является РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов». В институте разрабатываются методы составления и оптимизации водохозяйственных балансов, изучается взаимодействие вод и окружающей среды при водохозяйственном строительстве, влияние водохозяйственного фактора на размещение производительных сил. Вопросы гидрологии, водного хозяйства исследуются также в Республиканском научном дочернем унитарном предприятии «Институт мелиорации», Проектно-изыскательском республиканском унитарном предприятии «Белгипроводхоз». Специальные гидробиологические, гидрохимические, гидрогеологические исследования водных объектов проводят ряд других научных учреждений республики.

Белорусская школа также внесла весомый вклад в исследование минимального стока [70]. В работах К.А. Ключевой [75–77] и Е.Е. Петлицкого [107, 108] рассмотрены вопросы районирования территории Беларуси по однотипным условиям формирования минимального стока, влияние осушительной мелиорации на гидрогеологический режим рек Беларуси. И.М. Филиппович довольно подробно рассматривает минимальный сток рек: основные характеристики минимального стока рек, повторяемость и продолжительность низких уровней и расходов, минимально допустимые расходы [131]. Вопросы подземного питания рек, влияние мелиорации на уровни грунтовых вод, разработка методов оценки изменений подземного питания рек Беларуси рассматриваются в работах В.В. Дрозда [59–61], С.С. Белецкого [11].

Изученность механизма формирования минимального стока в условиях изменения климата, методы расчета минимального стока для малых рек Беларуси отстают от возрастающих потребностей практики. Эти трудности в изучении минимального стока возникают из-за сложности механизма формирования минимального стока; разнообразия стокообразующих факторов, которые изменяются во времени и в пространстве; недостаточной сети гидрометрических наблюдений.

1.2 Принятые понятия существующих терминов

Прежде чем приступить к анализу процессов формирования стока рек в маловодный период года и изложению методов его расчета, необходимо рассмотреть основные понятия, используемых в настоящей работе.

В годовом цикле изменения водности рек отчетливо выделяются многоводные и маловодные сезоны. На реках Беларуси наблюдаются два *маловодных сезона*: летне-осенний и зимний. Данные маловодные сезоны являются смежными и в целом образуют *маловодный период* года.

Необходимо отметить, что понятие «маловодный период» не является синонимом понятия «маловодный цикл». Последний используется при оценке многолетних колебаний речного стока и относится к группе (серии) маловодных лет, в которые величина стока значительно ниже нормы.

Речной сток, наблюдающийся в маловодные сезоны при отсутствии значительных паводков, принято называть *меженным*, а время – *меженным периодом*, понимая фазу водного режима реки, наблюдающуюся в

летне-осенний или зимний сезоны и характеризующуюся наличием относительно малых, устойчивых по величине расходов воды [25]. 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 больше чем в 3–5 раз (чем больше объем пика паводка, тем меньше должна быть величина превышения).

В межennom периоде имеется отрезок времени, когда сток является наименьшим. Период наименьшего стока продолжительностью от 1 до 30 дней называется *периодом минимального стока*. На основной части рек Беларуси можно выделить в зимний и летне-осенний сезоны 30-дневный период, когда реки питаются в основном лишь подземными водами. Такое разграничение понятий «меженный» и «минимальный сток» позволяет более надежно осуществить исследование условий их формирования и произвести соответствующие обобщения.

В гидрологической литературе, особенно в зарубежной, до сих пор не существует четкое разделение понятий «меженный» и «минимальный сток». В работах английских и американских авторов эти понятия нередко объединяются общим термином «низкий сток» (low flow или low runoff).

Минимальный сток – наименьший по величине сток, обычно наблюдающийся в межень. Периодом минимального стока называют отрезок времени от 1 до 30 суток внутри меженного периода, когда наблюдаются наименьшие расходы воды. Опорные характеристики минимального стока – минимальные среднесуточные расходы воды и минимальные 30-дневные расходы. Последние представляют собой средний расход за 30 суток внутри летне-осенней или зимней межени (рассматриваются отдельно) с наиболее низким стоком. Введение в практику гидрологических и водохозяйственных расчетов минимального 30-дневного расхода вместо минимального среднемесячного вызвано необходимостью исключить влияние календарных месяцев, завывшавших оценки низкого стока в условиях прерывистой межени. В зависимости от целей водохозяйственных расчетов применяются также величины 7 и 10-дневных минимальных расходов воды. Большое значение имеет определение этих характеристик при назначении минимально допустимых расходов воды, оставляемых в реках при осуществлении водозабора и устройства водохранилищ, расчета предельных величин сбросных расхо-

дов воды. Основное применение в практике водохозяйственного и строительного проектирования находят величины минимального стока большой обеспеченности в диапазоне 75–97%, характеризующие годы с маловодной меженью сравнительно редкой повторяемости. При оценке наихудших условий для формирования качества воды обычно используется минимальный сток 95%-ной обеспеченности (средняя повторяемость 1 раз в 20 лет), что является достаточно произвольным условием, требующим дифференциации в зависимости от тяжести негативных экологических и санитарно-технических последствий [98, 133].

Различают характеристики минимального стока:

- **суточные минимальные расходы воды** с разделением их на летние и зимние за каждый год;
- **среднемесячные минимальные расходы воды** с разделением их на летние и зимние за каждый год;
- средние многолетние значения (**нормы**) суточных минимальных расходов воды;
- средние многолетние значения (**нормы**) среднемесячных минимальных расходов воды;
- **минимумы** различной обеспеченности;
- **абсолютные минимумы** – наименьший расход воды за весь многолетний период наблюдений.

Для определения расчетного минимального расхода используют данные наблюдений по стоку за зимний и летне-осенний периоды. Расчет ведут

- по среднемесячным расходам,
- по средним расходам за 30 суток с наименьшим стоком,
- по среднесуточным расходам.

Среднемесячные расходы рекомендуется использовать для расчета в том случае, когда межень период продолжительный и устойчивый (длится не менее двух месяцев и в течение этого времени на реке нет паводков).

Минимальные расходы, *средние за 30 суток*, с наименьшим стоком используются при короткой и прерывистой межени. Короткой считают межень продолжительностью меньше двух месяцев; прерывистой – если она прерывается паводками.

Минимальный *30-суточный некалендарный* сток определяется путем построения гидрографов стока исследуемой реки по годам за весь период наблюдений, на которых выделяется участок продолжительностью 30 суток с наименьшими расходами воды, и по таблице ежедневных расходов воды

производят подсчет среднего расхода воды за выбранный период (рисунок 1.1). Минимальные 30-суточные расходы воды всегда меньше или равны среднемесячным календарным расходам воды.

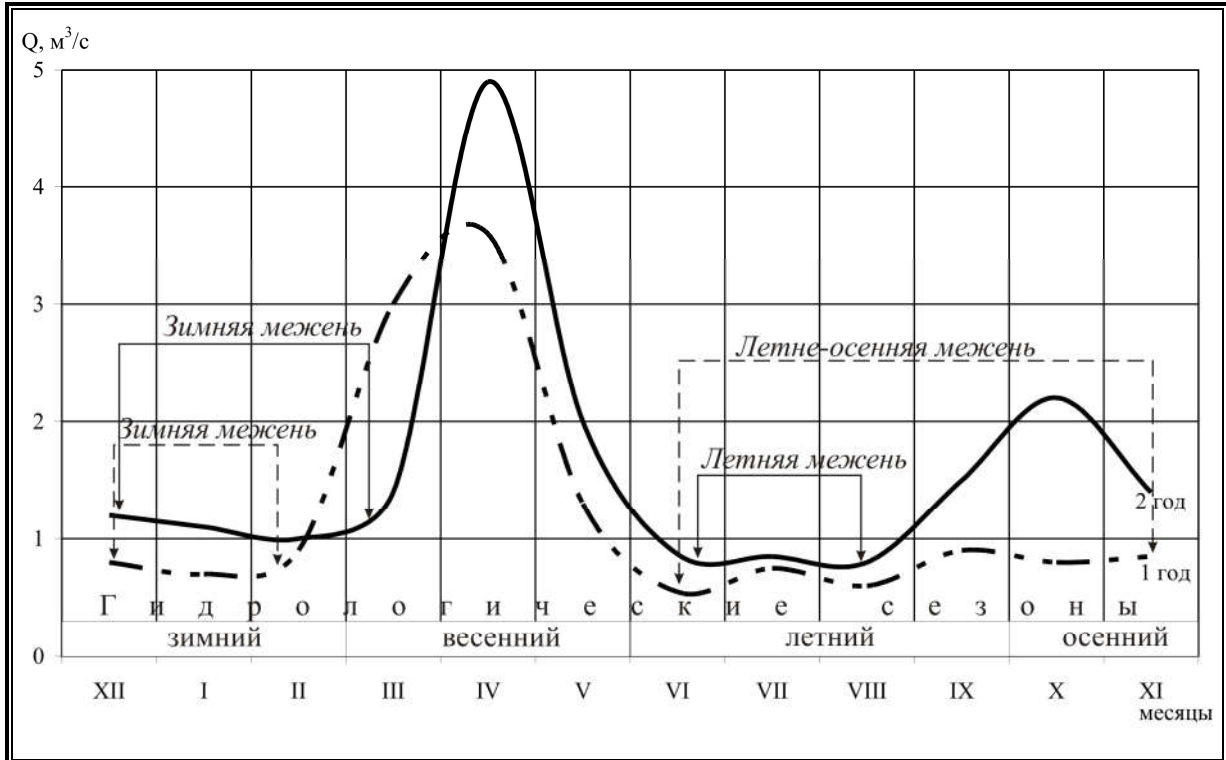


Рисунок 1.1 – Типовой гидрограф и гидрологические сезоны на реках Беларуси [32]

При использовании водных ресурсов в маловодный период большое значение имеет оценка критического, или так называемого *лимитирующего стока*, т. е. расходов воды за маловодный сезон (или сезоны), в который водное хозяйство испытывает наибольшую нужду в воде или наибольшие трудности с водоснабжением. Это понятие имеет смысл при сопоставлении естественных водных ресурсов с потребностями в них народного хозяйства. Те периоды времени, в течение которых возможны длительные перебои в обеспечении водой хозяйственных мероприятий, относятся к категории лимитирующих [24, 25].

1.3 Периоды малой водности на реках Беларуси за период летописных изданий и инструментальных исследований

Гидрологические сезоны тесно связаны с климатическими сезонами. Их сроки и продолжительность находятся в непосредственной зависимости от хода основных метеорологических элементов, начала и окончания климатических сезонов. Например, зимний период на реках наступает с появлением устойчивых отрицательных температур воздуха, которые ведут к образованию льда на реках и прекращению поверхностного стока. Летний сезон обычно совпадает с окончанием весеннего половодья и началом меженного периода.

В отдельные годы начало и конец гидрологических сезонов могут не совпасть с соответствующими характеристиками климатических сезонов. Например, летне-осенний меженный период может начаться в мае, а закончиться в ноябре–декабре, т.к. его начало определяется характером водного режима водотока. Поэтому, например, весеннее половодье, закончившись в первой декаде мая, обусловит начало летней межени в это же время, хотя по климатическим условиям это будет еще весенний период для данной территории. Следует отметить, что назначение дат климатических сезонов является в известной мере условным, поскольку на самом деле процесс смены сезонов занимает некоторый промежуток времени, в течение которого совершаются существенные изменения в климатических процессах и водном режиме территорий.

Оценка гидрометеорологических условий рассматривается за гидрологический год, началом которого принимается 1 октября предыдущего года, а конец – 30 сентября текущего года. Сроки начала и окончания сезона приняты постоянными. Весь год условно разделен на гидрологические сезоны [21, 25, 133, 142]:

- осенний (октябрь (X) – ноябрь (XI))
- зимний (декабрь (XII) – февраль (II))
- весенний (март (III) – май (V))
- летний (июнь (VI) – сентябрь (IX))

Летне-осенняя межень в Беларуси обычно наступает в конце мая – середине июня и заканчивается в конце ноября – середине декабря, когда появляются ледовые образования на реках. В некоторые годы при дружном прохождении весеннего половодья межень на реках начинается в конце апреля – начале мая, а в годы затяжного половодья или когда на его спаде

идут дожди – в конце июня – начале июля. Средняя продолжительность летне-осенней межени на малых и средних реках до 140–165 суток, на крупных от 67 (р. Днепр – г. Речица) до 96 (р. Западная Двина – г. Витебск) [119]. Обычно продолжительность меженного периода в средний по водности год изменяется 80–120 *дней*. Практически каждый год межень прерывается дождевыми паводками и складывается из 2, а в отдельные годы из 3–4 периодов. Такая прерывистая межень характерна для рек Минской, Оршанской и Витебской возвышенностей. Сравнительно устойчивая межень наблюдается в бассейне р. Западная Двина и р. Ви́лия. В многоводные годы межень становится короткой – 30–40 *дней*, а в маловодные годы она продолжительная, устойчивая и может длиться до 120–140 *дней*. Сток летне-осенней межени на малых и средних реках составляет 5–20%, на крупных – 7–12% годового. Наибольшая величина слоя стока (25–50 *мм*) наблюдается на возвышенностях, наименьшая (около 3–15 *мм*) на Полесье. Наиболее маловодный период наблюдается преимущественно в июле–августе, хотя в некоторые годы может наблюдаться в июне или сентябре. Средняя продолжительность маловодного периода на малых и средних реках 5–30 *суток* (экстремумы 1–130 *дней*), для крупных рек 15–50 *дней* (2–85 *дней*). Особенно низкие уровни наблюдаются в период засухи [32, 119].

Зимняя межень обычно начинается в конце ноября – середине декабря, а на реках южной части республики – в конце декабря. Наиболее ранние даты наступления межени могут попадать на конец октября – начало ноября, наиболее поздние – на январь, заканчивается зимняя межень обычно в марте, крайние сроки межени – февраль–апрель. Продолжительность зимней межени на малых и средних реках изменяется от 49 до 136 *дней*, в среднем 50–80 *дней*. В отдельные годы межень прерывается зимними паводками из-за оттепелей и складывается из 2–4 периодов. Наиболее прерывистая зимняя межень на реках западной и юго-западной части республики. Наиболее устойчивая зимняя межень наблюдается на реках северной и восточной частей республики. Водность зимней межени выше летне-осенней в 1,5–2 раза, хотя сток зимней межени составляет 5–15% годового стока. В маловодные годы при отсутствии осенних паводков зимняя межень начинается сразу же за осенней, и если не наблюдаются зимние паводки, сток зимней межени может быть меньше стока летне-осенней межени, т.к. запас подземных вод осенью не пополнился и их истощение достигает максимума зимой. Питание рек в зимнюю

межень осуществляется в основном подземными водами, а в теплые и многоводные годы при участии поверхностных вод. Наиболее маловодный период зимней межени наблюдается преимущественно в феврале и марте. Продолжительность его на малых и средних реках до 60 суток, на крупных – до 70 суток.

В наиболее маловодные периоды на отдельных малых реках возможно отсутствие стока как летом (пересыхание рек), так и зимой (перемерзание рек) [32, 142].

Рассмотрим метеорологические условия наиболее маловодных лет, когда возникает дефицит воды для использования в промышленности, сельском хозяйстве и коммунальном хозяйстве. Низкие уровни воды, уменьшение глубин в реках усложняют речное судоходство. В таблице 1.2 приводятся сводные данные о наиболее низких уровнях на судоходных реках за период инструментальных исследований.

Таблица 1.2 – Низкие уровни воды на судоходных реках (Ежегодники, 1964–2008)

Река – пост	Количество лет наблюдений	Количество лет с низким уровнем	Опасный низкий уровень, см
Западная Двина – г. Витебск	123	89	81
Западная Двина – г. Полоцк	63	41	160
Неман – г. Гродно	77	28	100
Днепр – г. Могилев	122	9	
Днепр – г. Речица	103	44	65
Днепр – г. Лоев	124	17	29
Березина – г. Борисов	41	14	75
Березина – г. Светлогорск	73	22	395
Сож – г. Гомель	101	29	105
Припять – с. Чернич	14	1	125
Припять – г. Мозырь	118	1	15

Рассмотрим наиболее маловодные годы и условия их формирования.

Представляют интерес данные о погодных условиях формирования минимальных уровней и расходов на р. Припять в конце XIX столетия, приведенные Е.В. Оппоковым, Г.И. Швецем [105, 136].

1882 г. Зима в этот год была почти бесснежной (в декабре 1881 г. выпало 5 мм вместо 31 мм (среднее многолетнее)), в январе 5 мм вместо 21 мм, в феврале 14 мм вместо 23 мм. Река замерзла 28 ноября, и затем шло непрерывное «понижение льда» и истощение осенних запасов вод бассейна реки вплоть до 4 февраля 1882 г., уровень реки стоял на 0,15 м выше нуля (1 сажень = 2,1336 м). Февраль и март были теплым, и испарение составило 24 и 48 мм, вместо 12 и 29 мм, что почти в 2 раза превышало норму и обусловило раннее вскрытие реки и слабый весенний разлив. В весенние и летние месяцы осадков выпало меньше нормы [105]. При таких метеоусловиях 1882 г. ознаменовался большим мелководьем на рр. Припять и Днепр. С 29 июня по 4 июля уровень реки стоял на 0,64 м ниже нуля. С 16 по 23 сентября уровень достиг 0,83 м ниже 0. Уровень воды в 1882 г. все время, исключая март, оставался значительно ниже среднего.

1885 г. Метеорологические условия и изменения уровня воды в р. Припять у г. Мозырь схожи с первой половиной 1882 г. В июне месяце выпало осадков 39 мм (78 мм), а испарение составило 98 мм вместо 65 мм, и уровень воды резко начал снижаться, достигнув минимума 13–17 июля (0,77 м ниже нуля, что на 0,35–0,33 ниже нормы). Во второй половине июля метеоусловия изменились, и уровень пошел на подъем. Таким образом, на Полесье в этот год не наблюдался сентябрьский минимум, хотя на Волге и в Западной Европе этот год был исключительно мелководным.

1892 г. Зимний минимум 1892 г наблюдался с 12.02 по 01.03 и уровень воды составил 0,013 м выше нуля, что значительно ниже нормы. В таблице 1.3 приведены данные на летне-осенний период.

Таблица 1.3 – Метеорологические данные за летне-осенний период (числитель – данные наблюдений, знаменатель – норма), мм

Метеоэлементы	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь
Осадки	127/78	66/105	33/70	29/51	44/57
Испарение	58/65	57/66	–	40/42	–

В июне месяце выпало осадков больше нормы в 1,6 раза, что замедлило спад уровня воды до июля месяца. Во все последующие месяцы осадков выпадало меньше нормы, а испарение было выше нормы, что привело к сильным понижениям уровня, который продолжался с 10 по 26 сентября и составлял на 0,85 м ниже нуля (на 0,49 м ниже сентябрьского минимума). В октябре и ноябре также осадков было меньше нормы, но и испарение

было меньше, что обусловило поднятие уровня реки до 0,15 м ниже нуля, хотя он и оставался ниже нормы (на 0,70 м).

1939 г. Сумма осадков за июнь–сентябрь составила в 2–3 раза меньше нормы. Испарение составляло от 140 до 180 мм для разных частей территории. На рр. Западная Двина и Припять модульный коэффициент минимального расхода составил 0,40.

1964 г. Этот год ознаменован низкими уровнями воды в реках бассейна р. Западная Двина, как в зимний, так и в летне-осенний период. В связи с тем, что наблюдались очень низкие температуры, в целом за зимний сезон на 0,3–2,0°C ниже нормы, питание рек было исключительно грунтовым. Толщина льда на р. Западная Двина превысила норму на 15–20 см. Небольшое количество осадков и интенсивное ледообразование обусловили низкий сток. Лето характеризуется сухой и жаркой погодой. Температура была выше нормы на 0,2–0,9°C, а количество осадков ниже среднемноголетней величины на 25 мм. Наблюдались исключительно низкие и устойчивые уровни воды, которые были ниже средних многолетних величин.

1972 г. Зимний сток был около нормы, а на левобережных притоках р. Припять наблюдался даже повышенный сток (за счет таяния снежного покрова и высокой водности осенью). В летний сезон температура воздуха на 1,0–1,9°C выше нормы. В среднем течении р. Днепр сумма осадков составила около 70–80% от нормы, что обусловило низкие уровни воды.

1992 г. В зимний период из-за необычайно теплой погоды снежный покров был неустойчивым. В январе наблюдалась продолжительная оттепель и на территории бассейна р. Припять сформировался зимний паводок, который перешел в весеннее половодье. Летний сезон был необычно жарким и наиболее засушливым. Максимальные температуры достигали 34–37°C и были перекрыты абсолютные максимумы августа. Наиболее засушливым был июль, сумма осадков, в большей части территории, составляла 10–40% от нормы, на ряде станций был перекрыт абсолютный минимум многолетних месячных сумм осадков. Дефицит осадков и преобладание жаркой погоды обусловили раннюю, продолжительную летнюю межень. На некоторых постах наблюдались самые низкие уровни воды за период наблюдений.

1994 г. Зима была теплая, и большое количество осадков привело в январе к зимнему паводку. Летний сезон на реках начался с дождевого паводка. Очень засушливым был июль, в среднем по республике выпало всего лишь 13% от нормы. Особенностью лета 1994 г. было очень малое количество осадков (от 69% в Верхне-Днепровском до 93% от нормы в Ви-

лейском), такое лето наблюдалось в 1951 и 1992 гг. Такая сухая погода в июле была отмечена впервые за весь многолетний период наблюдений. С июля месяца и до конца сезона наблюдалось снижение стока. Низкая водность началась в июле на рр. Днепр и Неман, а в начале августа на рр. Березина, Западная Двина, Сож, Припять и продолжалась до середины сентября. В это время создались крайне неблагоприятные условия для судоходства и работы водозаборных сооружений. В Гомеле «Водоканал» обеспечивал необходимое водоснабжение за счет подключения дополнительных артезианских скважин. Продолжительность низкой межени составляла 24–65 дней.

1995 г. Лето было жарким. Температуры воздуха за сезон были выше нормы на 0,7–1,1 °С, а самым теплым месяцем был июнь. Наиболее сухими выдались июль (60% от нормы) и август (77%), а сентябрь оказался очень влажным в 1,5 раза больше нормы, а на отдельных станциях в 2–2,5 раза. Неравномерность распределения осадков в летний сезон обусловила в конце августа – начале сентября наименьшие расходы воды, в связи с чем на отдельных участках рр. Западная Двина, Неман, Днепр, Березина и Припять уровни воды опустились ниже проектных горизонтов. Продолжительность стояния низких уровней составила 31–64 дня.

1996 г. Зимний сезон выдался холоднее обычного (средняя температура на 3,0 °С ниже нормы), средняя месячная температура во все месяцы была ниже средних многолетних. Осадков за сезон выпало меньше нормы, но из-за отсутствия оттепелей был постоянный снежный покров. К концу сезона почва промерзла до 45–95 см, а в Припятском районе – до 1,0–1,5 м. Холодная зима без затяжных оттепелей, низкая водность предыдущего сезона обусловили низкую водность зимнего сезона. Лето было холоднее обычного на 0,5–0,8 °С, среднемесячные температуры июня и июля на 0,8–1,2 °С ниже, а август был теплее обычного (1,5–2,0 °С). На большей части территории отмечен недобор осадков от 73% (Неманский район) до 91% в Западно-Двинском, а в Вилейском – в норме. Снижение водности рек, начавшееся еще весной, продолжалось и летом. Нехватка осадков сказалась на водном режиме рек. Минимальные расходы за летний период наблюдались в конце августа, в сентябре. Средние месячные расходы воды убывали на реках Западно-Двинского, Неманского, Вилейского районов до конца сезона, а на реках Верхне-Днепровского, Центрально-Березинского районов и на реках запада Припятского района – до сентября.

1997 г. Лето было теплее обычного всего на $0,5^{\circ}\text{C}$ на севере и северо-западе республики, на остальной территории – в пределах нормы. Осадки распределились неравномерно как по времени, так и по территории. В июле на большей части территории выпало осадков больше обычного, а август выдался необычайно сухим. Нежелательные хозяйственные последствия наблюдались в конце июля – августе на рр. Западная Двина, Неман, Днепр, Березина, Сож, Пина и продолжались до конца октября.

1999 г. Высокая влажность осеннего сезона, метеоусловия и осадки зимнего сезона способствовали формированию высокой водности сезона. На отдельных участках р. Припять в январе в результате оттепели вода вышла на пойму и глубина затопления пойменных земель составила 20–115 см. Лето было сухим и жарким, особенно жарким выдался июнь. Средняя температура воздуха за сезон была на $2,6^{\circ}\text{C}$ выше нормы. Такое жаркое лето в послевоенный период было зарегистрировано впервые. Осадков выпало меньше нормы от 65% в Вилейском районе до 91% в Припятском. В летний период происходило снижение водности на реках, а в августе и сентябре были отмечены минимальные годовые расходы.

2000 г. Из-за необычно теплой зимы (на $3,2\text{--}3,9^{\circ}\text{C}$ выше нормы) и увлажнения в пределах нормы на реках в феврале сформировался паводок, который плавно перешел в весеннее половодье. Летне-осенняя межень была прерывистой, так в июле месяце выпало 185% нормы осадков, что способствовало формированию дождевых паводков. Водность осеннего сезона в большей части территории республики была ниже средней многолетней, что произошло за счет октября, когда сумма осадков составила 1–14% нормы.

2002 г. Водность начала зимнего периода определялась низкой водностью предшествующего осеннего периода. В декабре сток на реках был низким и составлял 67–74% от средних многолетних значений, но к концу сезона – в феврале он был очень высоким и составил 2–5 норм. Самым холодным и сухим месяцем зимы был декабрь, и он же был одним из самых холодных за послевоенный период – на $4,0\text{--}4,5^{\circ}\text{C}$ ниже нормы. А январь и февраль оказались очень теплыми – в январе температура воздуха была на $3,6^{\circ}\text{C}$, в феврале на $4,4^{\circ}\text{C}$ выше нормы и влажными – в феврале (1,5–2 нормы). Во все летние месяцы отмечен недобор осадков, а самым засушливым был август, когда выпало 35% нормы. Жаркая и сухая погода в летний период отразилась на формировании стока рек. Сток во все летние месяцы оказался ниже средних многолетних значений. Наименьшие расходы

воды за сезон и год отмечены в сентябре. Минимальные уровни воды приближались к самым низким значениям за период наблюдений, а в бассейне р. Западная Двина и Неман были самыми низкими.

Анализ метеорологических условий формирования наиболее маловодных периодов на реках Беларуси за период инструментальных наблюдений показал наличие тесной связи маловодий с климатическими факторами. Самое существенное влияние на высоту уровня воды в реках в меженные периоды имеют атмосферные осадки. Высокая зимняя межень определяется: повышенной водностью предшествующего осеннего периода (происходит пополнение запасов грунтовых вод, почва насыщается влагой); большим количеством осадков и частыми оттепелями в зимний сезон; образованием снежного покрова в начале зимы на насыщенной почве. Низкий уровень в зимний период обусловлен низкой водностью предшествующего осеннего периода и низкими температурами в зимний период. Высокий уровень воды в летне-осеннюю межень формируется при затяжном половодье (до мая); большим количеством осадков в летний сезон и температурой воздуха в пределах нормы. Низкая летне-осенняя межень определяется: дружным половодьем; жарким и засушливым летне-осенним сезоном.

Таким образом, в формировании летне-осеннего минимального стока на реках Беларуси ведущую роль играет количество атмосферных осадков, а зимнего – водность предыдущего сезона и запас грунтовых вод. За период инструментальных наблюдений в зимний сезон не наблюдалось критических уровней и расходов, за исключением 1996 г., когда сток был низким. В летне-осенний сезон практически каждый год наблюдаются низкие воды и расходы, но приводящие к нежелательным хозяйственным последствиям с большими материальными ущербами формируются реже. Изученность механизма формирования минимального стока в условиях изменения климата, методы расчета минимального стока для малых рек Беларуси отстают от возрастающих потребностей практики. Это вызвано: сложностью механизма формирования минимального стока; разнообразием стокообразующих факторов, которые изменяются во времени и в пространстве; недостаточностью пунктов гидрометрических наблюдений.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

2.1 Источники исходной информации

К настоящему времени учреждениями гидрометеорологической службы Беларуси накоплен довольно большой фактический материал по речному стоку, который требует своевременного анализа. Закрывание многих гидрометрических постов и соответственно прекращение наблюдений за водным режимом рек и озер усложняет и затрудняет исследования. К началу XXI в. на территории Беларуси действует 123 гидрологических поста (рисунок 2.1).

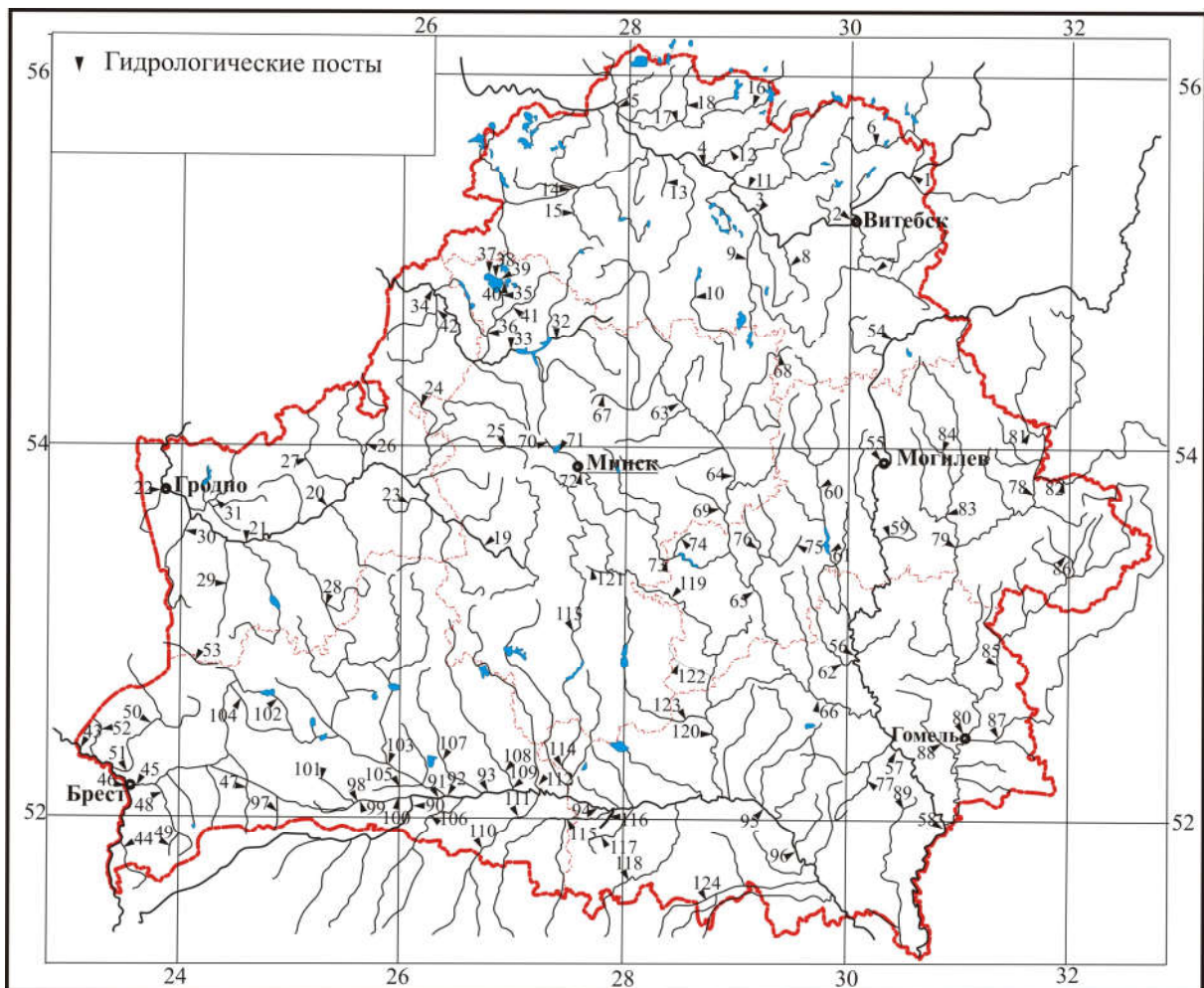


Рисунок 2.1 – Схема расположения гидрологических постов на 01.01.2002 г.

К числу официальных документов по гидрологии, опубликованных Гидрометеорологической службой СССР, БССР и Республики Беларусь, относятся издания.

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

- «Гидрологическая изученность» – серия, содержащая 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» – серия, содержащая проверенные материалы наблюдений за режимом рек, озер и водохранилищ на станциях Госкомгидромета и ряде других ведомств за период с начала наблюдений на станциях.

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

2. Гидрологические ежегодники т. 23, вып. 3; т. 2, вып. 2–4; т. 2, вып. 2, 3; т. 1, вып. 4–6; т. 1, вып. 5, 6; Государственный водный кадастр. Поверхностные воды. Ежегодные данные, т. 3 [48].

В дополнение к гидрологическим характеристикам при расчетах нередко используют метеорологические данные об атмосферных осадках, испарении, температуре и влажности воздуха, которые публикуются в метеорологических ежемесячниках и ежегодниках, климатических справочниках и других материалах Республиканского Гидрометеорологического центра.

Для выполнения исследований использованы следующие данные:

- 30-дневный летне-осенний и зимний минимальный расход воды по 164 створам за период инструментальных исследований;
- даты наименьшего расхода за период открытого русла;
- даты наименьшего расхода за зимний период;
- среднемесячные атмосферные осадки, среднегодовые атмосферные осадки;
- среднемесячные температуры воздуха;

- морфометрические характеристики бассейнов рек (площадь бассейна, средняя высота водосбора, лесистость, озерность, заболоченность);
- обзор режима рек с 1959 по 2008 гг.

2.2 Выбор репрезентативного периода

Применение непосредственно рядов наблюдений за минимальным стоком для водно-балансовых исследований требует выбора расчетного периода, для которого должны выполняться следующие условия:

- средние величины рядов наблюдений соответствуют норме;
- прослеживается законченный период колебаний водности;
- длина ряда достаточна для оценки требуемой эмпирической обеспеченности водности.

Из-за ограниченности наблюдаемых данных вместо генеральной совокупности приходится пользоваться некоторой ограниченной выборкой, поэтому практически имеем дело со статистическими зависимостями вместо стохастических, подобно тому, как эмпирическая частота принимается оценкой вероятности и тем более точной, чем больше число членов ряда.

В настоящей работе предлагается прием оценки репрезентативного периода, основанный на использовании «динамических» оценок гидрологических параметров.

Основные статистические характеристики временных рядов минимального стока определялись по формулам (2.1–2.5) [119]:

- норма минимального стока (\bar{Q})

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \quad (2.1)$$

- коэффициенты вариации (C_v)

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

- коэффициент асимметрии (C_s)

$$C_s = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{C_v^3 \cdot (n-1) \cdot (n-2)} \quad (2.3)$$

- ошибка определения нормы минимального стока ($\sigma_{\bar{Q}}$)

$$\sigma_{\bar{Q}} = \pm \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100, \% \quad (2.4)$$

- ошибка определения коэффициента вариации (σ_{C_v})

$$\sigma_{C_v} = \pm \sqrt{\frac{3}{2n \cdot (3 + C_v^2)}} \cdot 100, \% \quad (2.5)$$

где n – число членов ряда наблюдений, $k = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$ – модульный коэффициент.

Для установления репрезентативного периода из всего ряда наблюдений формировались более короткие периоды длиной $n = 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$ лет. Во избежание больших случайных ошибок нецелесообразно рассматривать слишком короткие периоды, поэтому минимальную их длину принимали $n_{\min}=10$. С другой стороны, в рамках рассматриваемой задачи нет необходимости анализировать короткие ряды по реке-аналогу, выходящие за пределы имеющегося ряда по изучаемой реке. В связи с этим фиксируется момент начала (t_1), периодов ($n=10, 15, 20, 25, 30, 35$) и (t_2) момент завершения коротких периодов.

При шаге квантования, равном одному году, длина выделенных периодов и будет заключаться в интервале $n_{\min} \leq n \leq (t_2 - t_1 + 1)$, а число периодов при заданном n будет равно $m = t_2 - t_1 - n + 2$. В случае анализа всего ряда с числом членов N длина периодов находится в пределах $n_{\min} \leq n \leq (N - 1)$, а их число составляет $m = N - n + 1$. Периоды выделялись со сдвижкой на 1 год, т.е. для 10-летних это: 1881–1890, 1882–1891 ... 1990–1999 гг.

Задаваясь точностью δ , выбираем такие короткие периоды в пределах стокового ряда по реке-аналогу, для которых $|\Delta Q| = \left| \frac{\bar{Q}_j}{\bar{Q}} - 1 \right| \leq \varepsilon$. Для отобранных таким образом периодов определяем «динамические» оценки гид-

рологических параметров по коротким рядам. Затем находим отношения рассчитанных параметров n -летних периодов к параметрам всего ряда. Рассчитанные ошибки для других рек-створов позволили сделать вывод о том, что не всегда удается выявить короткий отрезок ряда, соответствующий многолетнему периоду по исследуемым параметрам. В качестве примера в таблице 2.1 приведены значения статистических параметров и их отношений для р. Припять – г. Мозырь с фиксированным начальным годом 1947.

Полученные отношения среднего минимального стока за период к норме летне-осеннего минимального стока; коэффициентов вариации за период к коэффициентам вариации всего ряда, а также их ошибки представлены в виде графических зависимостей на рисунке 2.2, 2.3.

Таблица 2.1 – Статистические параметры выделенных n -летних периодов минимального стока р. Припять – г. Мозырь и их отношение к статистическим параметрам всего ряда (1877–2000 гг.) с фиксированным 1947 г.

Период	n , лет	\bar{Q}_n , $\text{м}^3/\text{с}$	$\delta_{\bar{Q}}$, %	\bar{Q}_n / \bar{Q}	C_{vn}	C_{vn}/C_v	C_{sn}	δ_{C_v} , %
1947–1956	10	74,2	21,5	0,5	0,68	1,30	1,40	20,8
1947–1961	15	96,4	13,8	0,65	0,53	0,92	0,97	17,5
1947–1966	20	114,4	16,4	0,78	0,73	1,35	2,62	14,6
1947–1971	25	122,1	13,3	0,84	0,66	1,20	2,24	13,2
1947–1976	30	126,2	11,5	0,87	0,63	1,11	1,99	12,1
1947–1981	35	134,3	11,6	0,94	0,65	1,77	1,98	11,2
1947–1986	40	133,8	9,8	0,94	0,62	1,09	2,08	10,5
1947–1991	45	135,0	8,9	0,96	0,60	1,03	1,99	9,9
1947–1996	50	135,9	8,2	0,97	0,58	0,96	1,98	9,5

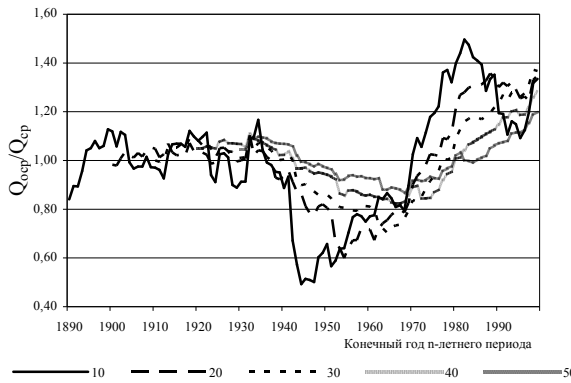
Анализ построенных графиков позволил выявить периодические закономерности в ходе отношений средних минимальных расходов, особенно явно проявляющихся для 50 летних периодов.

Ошибки отношения среднего значения n -летнего периода к норме минимального стока рассчитывалась с помощью «генеральной ошибки» как

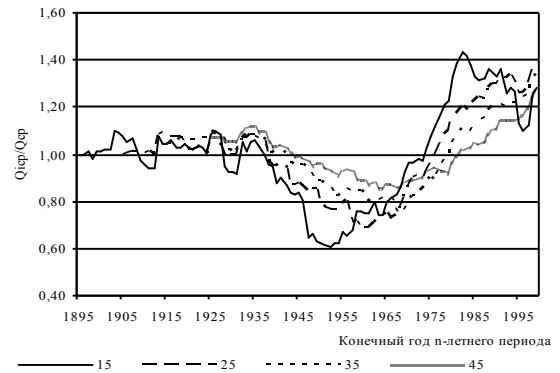
$$\sigma_{\bar{Q}_2} = \sqrt{\sigma_{\bar{Q}_n}^2 + \sigma_{\bar{Q}}^2}, \quad (2.6)$$

где $\sigma_{\bar{Q}_n}$ и $\sigma_{\bar{Q}}$ – соответственно ошибки средних n -летних периодов и нормы минимального стока всего ряда, %.

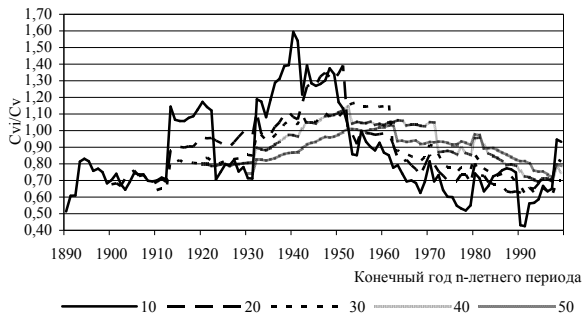
а



б



в



г

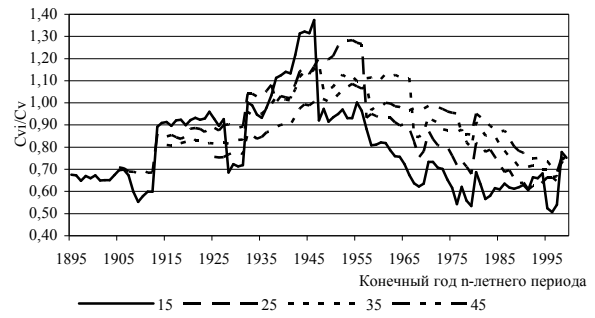


Рисунок 2.2 – Графики отношений средних значений минимальных расходов n -летнего периода к нормам всего ряда (а, б) и коэффициентов вариации n -летнего периода к коэффициентам вариации всего ряда (в, г), в зависимости от конечного года n -летнего периода p . Припять – г. Мозырь

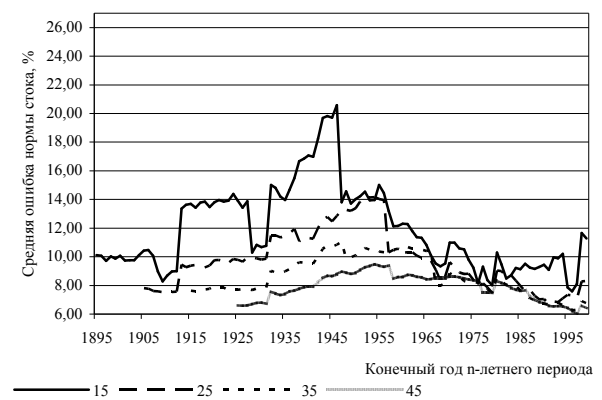
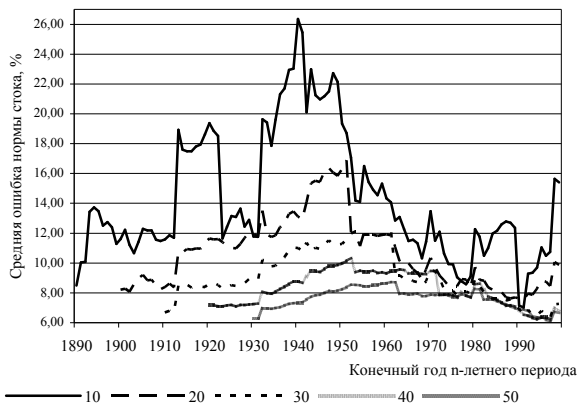


Рисунок 2.3 – Графики зависимости средних ошибок нормы минимального стока в зависимости от конечного года n -летнего периода p . Припять

«Генеральные ошибки» для р. Припять – г. Мозырь представлены графическими зависимостями на рисунке 2.4.

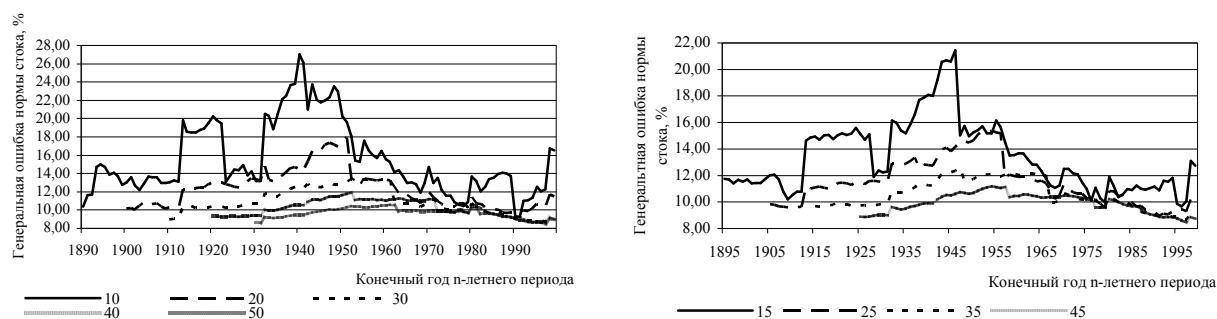


Рисунок 2.4 – Графики зависимости отношений «генеральных ошибок» в зависимости от конечного года n -летнего периода р. Припять

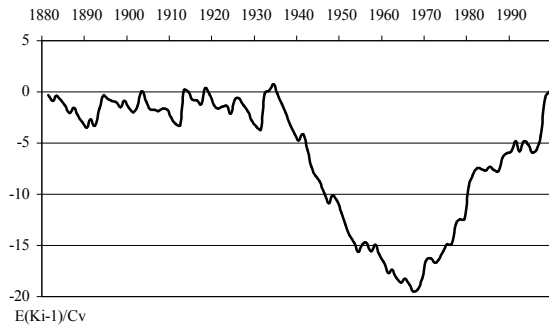
Анализ рисунка 2.4 показал небольшое увеличение «генеральной ошибки» по сравнению с простой ошибкой. При этом явно видно, что только для 50-летних периодов ошибка нормы минимального стока не превышает 10% и поэтому такие ряды являются «гидрологически» достаточными и репрезентативными.

Для проверки выполнения второго условия репрезентативности расчетного периода использовались нормированные разностные интегральные кривые. С этой целью сопоставлялись разностные интегральные кривые, построенные для ряда речных створов с вековым периодом наблюдений (рисунок 2.5).

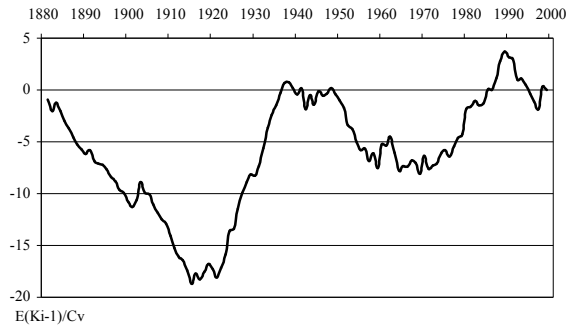
Из рисунка 2.5 видно, что смена многоводных и маловодных фаз на разных реках происходит в разные периоды, так на р. Припять – г. Мозырь полный цикл составляет 65 лет, на р. Неман – г. Гродно – 50 лет, на р. Западная Двина – г. Витебск – 30 лет, на р. Березина – г. Бобруйск – 60 лет; на р. Днепр – г. Орша – 120 лет; на р. Днепр – г. Речица – 90 лет.

Таким образом, для обеспечения необходимой точности расчета минимального стока рек Беларуси, необходимо использовать не менее чем 50-летние ряды наблюдений без учета его цикличности. В отдельных случаях можно использовать более короткие ряды, но при строгом учете цикличности [33, 110].

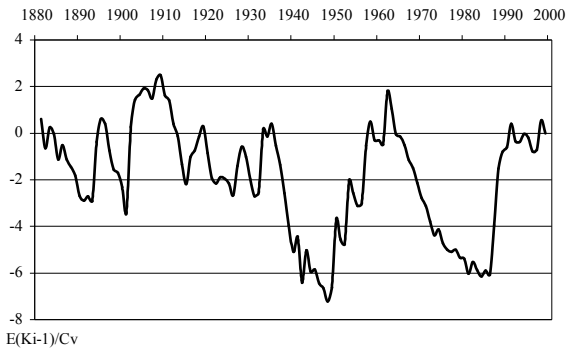
а



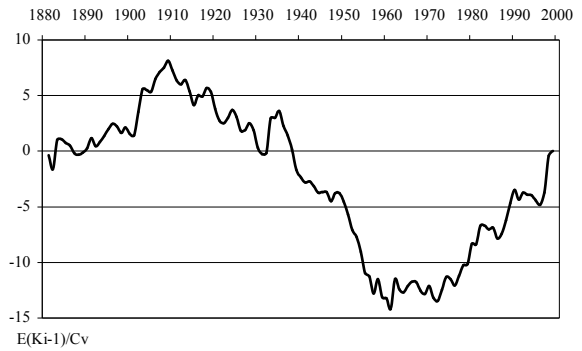
б



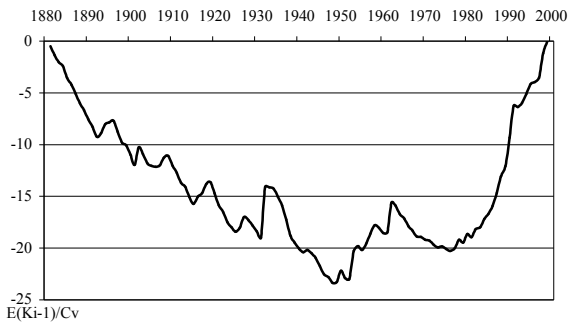
в



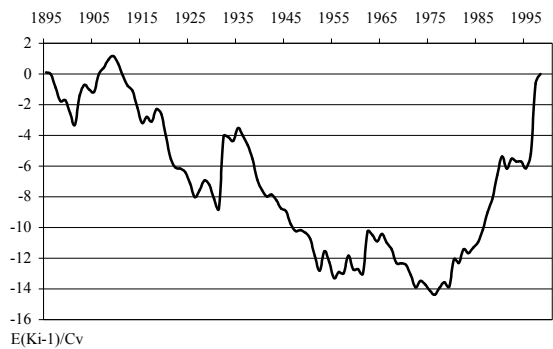
г



д



е



а – р. Припять – г. Мозырь; б – р. Неман – г. Гродно; в – р. Западная Двина – г. Витебск;
г – р. Березина – г. Бобруйск; д – р. Днепр – г. Орша; е – р. Днепр – г. Речица

Рисунок 2.5 – Разностные интегральные кривые минимального стока

2.3 Анализ однородности рядов гидрологических величин

Для дальнейшей статистической обработки гидрологических рядов летне-осенних и зимних минимальных расходов необходимо провести анализ однородности исходных данных. В гидрологии существует ряд методов анализа однородности временных рядов [2, 14, 57, 96, 120]:

- методы, основанные на анализе интегральных эмпирических функций распределения вероятностей, или кривых обеспеченностей (Гнедеко-Королук, кривая однородности Колмогорова – Смирнова, кривая однородности Стьюдента (t), критерий однородности Фишера (F));

- непараметрические критерии (критерий однородности Вилькоксона);
- критерий знаков.

Анализ однородности гидрологических рядов включает ряд этапов [57]:

- *первичный анализ* исходной информации, который предусматривает графический анализ исходных данных и выявление причин нарушения однородности ряда. Если первичный анализ говорит о нарушении однородности временного ряда, то переходят к следующему статистическому анализу;

- *статистический анализ* состоит из формулировки нулевой и альтернативной гипотез; определения уровня значимости; выбора критической области; браковки или признания нулевой гипотезы. Если при графическом анализе было установлено нарушение однородности, а нулевая гипотеза не может быть отвергнута, то переходят к генетическому анализу;

- *генетический анализ* используется как дополнительный этап.

Первичный анализ однородности гидрологических рядов рекомендуется проводить графическими методами, которые предусматривают построение суммарных (интегральных) кривых связей от времени (2.7):

$$\sum X = f(t) \quad (2.7)$$

где $\sum X$ – нарастающее значение гидрологической характеристики исследуемой реки во времени.

На рисунке 2.6, где показаны суммарные кривые для летне-осеннего и зимнего минимального стока, видно, что данные временные ряды однородны. Первичный анализ (графический анализ) временных рядов минимального летне-осеннего и зимнего стока показал, что из 157 временных

рядов летне-осеннего минимального стока и 179 зимнего **однородными** являются 89 и 108 соответственно (рисунок 2.6, Приложение А).

Резкое изменение угла наклона таких кривых характеризует начало изменения водного режима. Результаты графического анализа подтверждаются информацией об изменении условий формирования водного режима на водосборе и в русле.

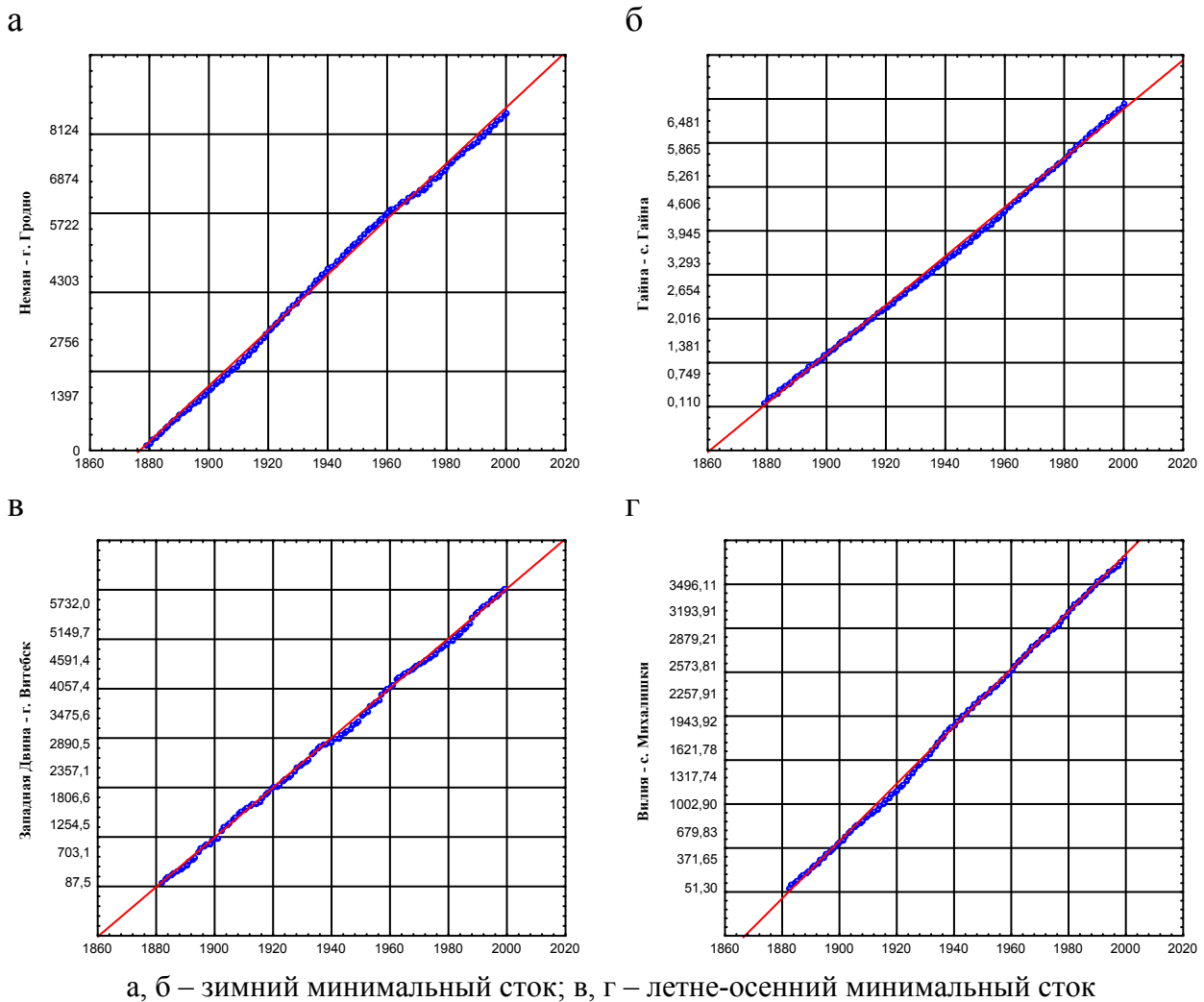


Рисунок 2.6 – Изменение нарастающей суммы расходов воды во времени

Для количественной оценки однородности исходных данных наблюдений, применялись статистические критерии однородности средних значений и дисперсий с учетом внутрирядных и межрядных корреляционных связей.

Оценка однородности выборочных средних выполняется по t -критерию Стьюдента; t -критерий Стьюдента рассчитывается по формуле (2.8)

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{n_x \hat{\sigma}_x^2 + n_y \hat{\sigma}_y^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_x \cdot n_y \cdot (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}, \quad (2.8)$$

где \bar{x} и \bar{y} – выборочные средние, $\hat{\sigma}_x$ и $\hat{\sigma}_y$ – выборочные дисперсии, n_x и n_y – объемы выборок.

При этом исследуемые ряды разбивались в месте начала наиболее вероятного вмешательства в процесс формирования речного стока. Оценка однородности выборочных средних из асимметрично распределенных совокупностей выполнялась следующим образом. Полученное значение критерия Стьюдента (t) сравнивалось с его критическим значением [110] при заданном уровне значимости $\alpha = 5\%$. Если $t < t_\alpha$, принималась гипотеза однородности двух выборочных средних.

Критерий однородности Фишера (F) служит для оценки однородности средних квадратических отклонений двух выборок (или двух частей одной выборки). Гипотеза однородности выборочных дисперсий отвергается, если имеет место неравенство $F > F_\alpha$, где F_α – критическое значение критерия однородности Фишера; или принимается, если знак неравенства меняется на противоположный, т.е. $F \leq F_\alpha$. В последнем случае считается, что данные наблюдений не противоречат выдвигаемой гипотезе. Критерий однородности Фишера (F) рассчитывается по формуле (2.9)

$$F = \frac{\hat{\sigma}_x^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \quad (2.9)$$

где $\hat{\sigma}_x^2$ и $\hat{\sigma}_y^2$ – выборочные дисперсии; в числителе берется большая из дисперсий.

Значения (F_α) определялись по [172] в зависимости от объема выборок $n_x = n_y$, принятого уровня значимости ($\alpha = 5\%$), внутрирядной ($r(I)$) и межрядной (R) корреляции.

Так как наиболее вероятным переломом в формировании водного режима рек Беларуси можно считать 1966 год (начало ширококомасштабной мелиорации), то ряды минимального стока разбивались на две час-

ти: первая – 1932–1965 гг., вторая – 1966–2000 гг. Далее был произведен расчет всех параметров для нахождения критерия Фишера и Стьюдента для каждого исходного ряда минимального речного стока.

Анализ данных показывает, что для 16% (25 рек) рек летне-осеннего минимального стока и 5% (9 рек) зимнего получены значения критериев Стьюдента и Фишера значительно выше критических значений при 5%-ном уровне значимости, что отвергает гипотезу об однородности данных в рядах минимального стока. Анализ причин неоднородности рядов по этим рекам-створам привел к гипотезе об интенсивной хозяйственной деятельности на водосборах этих рек, начиная с 1966 года, что подтвердилось материалами проектного института «Полесьегипровод-Пинск».

Частично ненарушенный режим рек (гипотеза однородности принимается по критерию Стьюдента, отвергается по критерию Фишера, или, наоборот) наблюдается для летне-осеннего минимального стока на 32 (21%) исследуемых реках, а для зимнего – на 55 (31%), что можно объяснить естественными колебаниями водности или сопоставимыми с ним незначительными антропогенными воздействиями на водный режим рек.

Полностью однородные ряды для 63% (99 рек) летне-осеннего минимального стока и 64% (113 рек) зимнего из проверенных рек свидетельствуют о ненарушенном водном режиме или синхронности антропогенных воздействий и колебании водного режима. Синхронность заключается в том, что одновременно увеличивается водность рек и интенсивность мелиоративных мероприятий, или одновременном спаде этих двух процессов, поэтому водность реки практически не изменилась, и ряд остался однородным.

Из всех проанализированных рек-створов минимальным нарушением однородности выделяются реки бассейнов Западной Двины и Немана. Значения критериев Стьюдента и Фишера для этих рек значительно меньше критических, а реки бассейнов рек Днепр, Припять, Западный Буг имеют в основном неоднородные ряды, что является следствием более существенных воздействий на водосборы рек бассейна Припяти. Это значит, что начиная с 1966 года естественный режим средних и малых рек юга Беларуси изменился под влиянием антропогенной нагрузки, в частности мелиоративных воздействий.

2.4 Восстановление пропусков в наблюдениях

Приведение коротких гидрологических рядов минимального летне-осеннего и зимнего стока к длительному периоду для m -аналогов осуществлялось статистическим методом по уравнению линейной регрессии (2.10) [41, 110, 114]:

$$Q = k_0 + \sum_{j=1}^m k_j \cdot Q_{aj}, \quad (2.10)$$

Среднее квадратическое отклонение данных наблюдений от вычисленных ($\sigma_{\bar{Q}}$) может быть определено по зависимости (2.11):

$$\sigma_{\bar{Q}} = \sigma \cdot \sqrt{1 - R^2}, \quad (2.11)$$

в которой множественный коэффициент корреляции (R), определяется по формуле (2.12):

$$R = \sqrt{1 - \frac{D}{D_{00}}}. \quad (2.12)$$

При использовании уравнений регрессии соблюдались следующие условия:

- число совместных лет наблюдений в пункте приведения и пунктах-аналогах должно быть не менее 10 ($n \geq 10$);
- коэффициент корреляции между стоком в приводимом пункте и пунктах-аналогах должен быть равным или более 0,7 ($r \geq 0,7; R \geq 0,7$);
- отношение каждого из коэффициентов регрессии к его среднему квадратическому отклонению должно быть не меньше 2 ($\frac{k_j}{\sigma_{k_j}} \geq 2$).

Выбор числа и состава эффективных аналогов является наиболее сложной задачей. При выборе аналогов проверялись условия:

- аналоги должны располагаться в сходных с приводимым пунктом физико-географических и климатических условиях;
- аналоги должны располагаться вокруг приводимого пункта; число аналогов должно быть не менее 2–4;

- коэффициенты корреляции между приводимым рядом и рядами аналогов должны быть выше коэффициентов корреляции между рядами аналогов.

Выбор уравнений осуществлялся по одному из вариантов: 1) выбирался пункт с менее продолжительными наблюдениями, но с более тесной связью между величинами стока рассматриваемых рядов; 2) выбиралось уравнение для пункта наблюдений, имеющее более продолжительный период, но меньший коэффициент корреляции со стоком приводимого ряда.

Если оба варианта удовлетворяли условиям, то сначала выбирались ряды с наибольшими коэффициентами корреляции, а затем они дополнялись рядами с меньшими коэффициентами корреляции, но с большим периодом наблюдений.

При невозможности подбора реки-аналога, исходя из условия выполнения требований, в качестве аналогов использовалась другая информация, определяющая рассматриваемую гидрологическую характеристику (атмосферные осадки, температуры воздуха и пр.). Использование подобной информации в случае приведения речного стока к многолетнему периоду может оказаться полезным лишь в том случае, если по этой гидрометеорологической характеристике имеются наблюдения за больший период времени, чем за изучаемой гидрологической характеристикой.

Восстановление стока происходило при коэффициентах корреляции $R \geq 0,70-0,75$. Подбор аналогов производился согласно СНиПу [110], а подбор наиболее эффективных аналогов производился в программе «Гидролог», составленной А.А. Волчком. Особое внимание в подборе аналогов уделялось гидрологическим и гидрогеологическим условиям территории. Для сопоставимости полученных результатов все исследуемые ряды были приведены к единому периоду наблюдений, равному 120 годам (1881–2000 годы). Продолжительность репрезентативного периода установлена по разностным интегральным кривым с учетом многолетних колебаний исследуемой величины.

Анализ показал, что, в среднем, норма стока для продленных рядов летне-осеннего минимального стока изменилась на 5% при максимальном увеличении на 30% (р. Улла – Лепельская ГЭС) и максимальном уменьшении на 38% (р. Свиновод – с. Симоничи); а для зимнего минимального стока норма стока изменилась на 4% при максимальном увеличении на 30% (р. Улла – Лепельская ГЭС) и максимальном уменьшении на 50% (р. Верхняя Брагинка – с. Рудня Журавлева), что можно объяснить не-

большим по продолжительности периодом инструментальных наблюдений. Для 73% рек-створов летне-осеннего минимального стока и 76% зимнего сильных изменений нормы стока не наблюдается. Что касается коэффициентов вариации (C_v) и асимметрии (C_s), то их среднее увеличение для рядов летне-осеннего минимального стока составило 3% и 17% соответственно, а для зимнего – 13% и 3%. Максимальные изменения коэффициента автокорреляции ($r(l)$) отмечены для рр. Случь, Бобр, Ведрич.

Таким образом, ряды, приведенные к непрерывному периоду наблюдений с 1881 по 2000 гг., могут быть использованы для решения поставленных задач, в частности для изучения цикличности стока с целью составления его прогноза.

2.5 Особенности картографирования водных ресурсов

Особенностью картографирования характеристик речного стока является то обстоятельство, что изображаемые на карте их значения относятся не к точке измерения (как при картировании климатических характеристик), а к целому водосбору, так как расход воды, измеренный в гидрометрическом створе, представляет собой осредненный сток со всего речного бассейна. Это создает условность картографирования характеристик речного стока, ибо их значения относят к условным точкам – *центрам тяжести водосборов*, отражающих в какой-то степени средние условия их формирования. Погрешность определения характеристик речного стока по карте тем больше, чем больше градиент изменения их по территории и чем больше площадь водосбора. Поэтому большие бассейны рек, имеющие разные значения характеристик в отдельных частях бассейна, при построении карты не рассматриваются, а служат лишь для контроля надежности построения [67].

Карты водных ресурсов делят на две группы: гидрографические карты и карты режима вод. Для построения карт в работе использован наиболее распространенный в практической гидрологии площадной метод картографирования в модулях стока. Площадной метод картографирования выполнялся двумя способами: 1) изолинии; 2) районирование территории по количественным показателям.

Способ изолиний наиболее универсален и он использовался для построения следующих видов карт: «Эрозионный врез рек Беларуси», «Модуль летне-осеннего и зимнего минимального стока рек Беларуси», «Изме-

нения минимального стока рек Беларуси», «Даты наступления наименьшего расхода воды в современных условиях».

Второй способ (районирование территории) имеет ограниченное применение: при нехватке исходных данных или если картографируемое явление особенно связано с местными природными условиями. Этот вид картографирования использовался при построении следующих карт: «Районирование территории по синхронности колебаний», «Районирование территории по цикличности колебаний», «Карта районов с однотипной связью $q = f(\Delta H_i)$ », «Карты районов с однотипной связью $Cv = f(q)$ ».

Картографическая основа карт настоящей работы была построена в равнопромежуточной прямоугольной цилиндрической проекции. Такой выбор проекции был обусловлен двумя причинами:

- нет искажений по параллели сечения (54° с.ш.) и по всем меридианам; искажения севернее и южнее параллели сечения небольшие;
- географическая сетка параллелей и меридианов хорошо согласуется с сеткой программы *Surfer 3.0*.

Из особенностей построения карт вытекает и способ определения характеристик по ним. Для того чтобы определить значение характеристики речного стока сначала на карте оконтуривают рассматриваемый водосбор до замыкающего створа (проводят водораздельную линию), затем находят центр его тяжести, который наносят на карту. В тех случаях, когда 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.

Оценка репрезентативности временных рядов минимального стока производилась по разностным интегральным кривым речного стока. В качестве «эталонов» были реки с наиболее длительными рядами инструментальных наблюдений. Определена продолжительность репрезентативного периода, которая должна быть не менее 50 лет. В отдельных случаях можно использовать более короткие ряды, но при учете цикличности.

Выполнены расчеты по однородности гидрологических рядов минимальных расходов воды. Однородными являются 99 рядов из 164 летне-осеннего минимального стока и 113 из 164 зимнего. Полностью однородные ряды минимального стока проверенных рек свидетельствуют о ненарушенном водном режиме или синхронности антропогенных воздей-

ствий и колебаниях водного режима, т.е. при одновременном увеличении водности рек и интенсивных мелиоративных мероприятиях и одновременном спаде этих двух процессов водность реки практически не изменилась, и ряд остался однородным. Из всех проанализированных рек-створов минимальным нарушением однородности (около 25%) выделяются бассейны р. Западная Двина и Неман.

Частично ненарушенный режим рек (гипотеза однородности принимается по критерию Стьюдента, отвергается по критерию Фишера, или наоборот) наблюдается для 21% летне-осеннего минимального стока и 31% зимнего исследуемых рек-створов, что можно объяснить естественными колебаниями водности или сопоставимыми с ним незначительными антропогенными воздействиями на водный режим рек. Значения критериев Стьюдента и Фишера для этих рек значительно больше критических.

Реки бассейнов Днепра, Припяти и Западного Буга имеют в основном неоднородные ряды, что является следствием более существенных антропогенных воздействий на водосборы рек. Так, начиная с 1966 года, естественный режим средних и малых рек юга Беларуси изменился под влиянием антропогенной нагрузки, в частности мелиоративных воздействий.

Восстановлены временные ряды минимального стока. Временные ряды 152 летне-осеннего и 147 зимнего минимального стока были приведены к многолетнему периоду с 1881 по 2000 гг. Норма стока для 75% продленных рядов летне-осеннего и зимнего минимального стока изменилась в пределах ошибки. Коэффициенты вариации (C_v) и асимметрии (C_s) изменились больше, их среднее увеличение для рядов летне-осеннего минимального стока составило 3% и 17% соответственно, а для зимнего – 13% и 3%.

ГЛАВА 3 ФОРМИРОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ

3.1 Физико-географические факторы, формирующие минимальный сток рек

Важнейшими факторами, влияющими на процесс формирования минимального стока, являются атмосферные осадки и подземные воды. Кроме того, на величину и режим минимального стока влияют испарение, температура воздуха и почвы, дефицит влажности воздуха, гидрогеологическое строение водосбора (инфильтрационная и водоудерживающая способность почво-грунтов, мощность и количество водоносных горизонтов, характер гидравлической связи с рекой, литологический состав водовмещающих пород), рельеф водосбора, озерность, заболоченность, лесистость. Можно выделить еще одну группу факторов, которые не принимают непосредственного участия в формировании минимального стока, но отражают влияние первых двух групп. К третьей группе относятся: площадь водосбора (бассейна) (A), средняя высота водосбора (H_{cp}), уклон водосбора (i), эрозионный врез русла (ΔH), густота речной сети, коэффициент естественной зарегулированности [1, 25, 45, 46, 55, 83, 103, 107].

3.1.1 Геология, гидрогеология и рельеф

В связи с тем, что минимальный сток формируется в меженные периоды, когда реки переходят на грунтовое питание необходимо рассмотреть гидрогеологические условия Беларуси [68, 69, 81, 135]. Общие ресурсы подземного стока в реки Беларуси по С.С. Белецкому [11] равны $15,9 \text{ км}^3/\text{год}$, а долевое участие артезианских бассейнов представлено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Долевое участие артезианских бассейнов в подземном питании рек

Артезианские бассейны	Доля артезианских бассейнов, км ³ /год
Оршанский	6
Припятский	3,4
Брестский	1,8
Прибалтийский	4,7
Всего	15,9

Наибольшими ресурсами подземного стока обладает бассейн р. Днепр с р. Припять (7,8 км³/год), а наименьшими – бассейн р. Западный Буг (0,5 км³/год). В подземном питании рек наибольшее участие (65%) принимают воды четвертичных отложений.

Приповерхностные и водоносные горизонты заключены в основном в водно-ледниковых и аллювиальных отложениях, представленных песками разного гранулометрического состава. Количество этих горизонтов определяется наличием морен, разделяющих отложения. Формирование подземных вод связано с постоянным и интенсивным водообменом с поверхностными водами. Основным источником питания являются атмосферные осадки. Уровненный режим подземных вод характеризуется резкими сезонными колебаниями в пределах 0,4–3,5 м.

В северных и центральных районах республики в четвертичных отложениях нередко прослеживаются три напорных водоносных горизонта, а к востоку от реки Днепр и в южных районах – один, реже два. Подавляющее большинство грунтовых вод относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу. Глубина залегания зависит от состава и происхождения покровных водопроницаемых пород. В местах конечных морен она составляет 40–100 м, в водно-ледниковых отложениях – 5–10, в лёссовидных породах – 2–6 м. В речных поймах грунтовые воды располагаются совсем близко у дневной поверхности.

Грунтовые воды на территории республики в основном приурочены к отложениям четвертичного периода. Толща отложений четвертичного периода по геологическому строению, а также и по гидрогеологическим условиям северной части республики и южной резко различны, что дает возможность, рассматриваемую территорию разделить на два района: северный, находящийся в пределах последнего поозерского (валдайского) оле-

денения, и южный, расположенный за его пределами. Граница между указанными районами проходит по Оршанской и Минской возвышенностям.

В пределах **северного района** грунтовые воды приурочены к следующим генетическим комплексам пород: 1) грунтовые воды болотных, озерно-болотных, современных аллювиальных, древнеаллювиальных, озерно-ледниковых и флювиогляциальных отложений; 2) грунтовые воды конечно-моренных отложений поозерского оледенения; 3) грунтовые воды донно-моренных отложений поозерского оледенения.

Грунтовые воды в *болотных и озерно-болотных* отложениях развиты главным образом в бассейнах Западной Двины и Березины. Водосодержащими породами являются торф, реже заторфованные пески. Мощность водовмещающих пород колеблется от 0,5 до 6–10 м, уровень залегания от поверхности земли от 0,3 до 1,5 м. Питание происходит за счет атмосферных осадков. Воды слабо минерализованы, содержат большое количество органических веществ.

Грунтовые воды в *современных аллювиальных* отложениях пойм и русел рек приурочены к пескам и гравийно-песчаным отложениям. Для Западной Двины и Верхнего Днепра мощность их не превышает 10–12 м. Водоупором являются валунные суглинки донной морены. Уровень этих вод находится в полной зависимости от метеорологических условий. Источником питания являются атмосферные осадки и речные воды. Ввиду того, что воды современных аллювиальных отложений не имеют водоупорного перекрытия и близко залегают от поверхности земли, они легко загрязняются.

Грунтовые воды в *древнеаллювиальных* отложениях надпойменных террас встречаются в долинах крупных рр. Западная Двина, Днепр, Березина, Друть, Виляя и их притоков. Водовмещающими породами служат пески различного механического состава, среди которых встречаются прослойки глин, суглинков и погребенных торфяников. Мощность этих пород в пределах первых надпойменных террас изменяется от 5–7 до 10–18 м, на вторых – от 2–3 до 14,5 м. Водоупором служат валунные суглинки донных морен и реже прослойки древнеаллювиальных глин.

В пределах первых надпойменных террас, где воды древнеаллювиальных отложений тесно связаны с поверхностными, положение уровня этих вод определяется высотой террас над урезом реки. Обычно глубина залегания их не превышает 5 м. В верхнем течении рр. Западная Двина, Днепр, Березина, Друть статический уровень находится на глубине от 5 до 8 м.

Аллювиальные воды вторых надпойменных террас, благодаря тому, что имеют водоупорное ложе, залегающее значительно выше поверхности поймы, являются более обособленными и не связанными с уровнями рек. Уровни этих вод изменяются от 3 до 5 м.

Грунтовые воды в *озерно-ледниковых* отложениях развиты в районе г. Полоцка и прилегающих к нему территорий. Водовмещающими породами являются пески тонко- и мелкозернистые, реже крупнозернистые и линзы песка в толще ленточных глин. Максимальная мощность их около 30 м. Глубина залегания водоносного горизонта изменяется от 0,3 до 5 м, реже достигает 30 м. Дебит отдельных колодцев составляет 0,55–4,4 л/с при понижении уровня на 0,35–0,20 м.

Грунтовые воды в отложениях конечных и донных морен сплошного распространения не имеют, они заключены в отдельных, изолированных друг от друга линзах.

Кроме грунтовых вод, важнейшими водоносными подкомплексами четвертичных отложений, содержащими напорные воды являются межморенные сожско-поозерский, днепровско-сожский и березинско-днепровский (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Характеристика водоносных подкомплексов четвертичных отложений

Характеристики подкомплекса	Сожско-поозерский	Днепровско-сожский	Березинско-днепровский
Глубина залегания кровли, м	2–90	2–40 в долинах рек до 100 м и более на водоразделах	1–170
Мощность водовмещающих отложений, м	3–50 (среднее 10–20)	2–74 (среднее 15–30)	от 2–10 до 100–170 м и более в древних погребенных долинах
Пьезометрические уровни, м	1–55 м (в долинах рек иногда до 1,5 м выше поверхности земли)	1–6 м в долинах рек и до 30–53 м на водоразделах	1–78 м (в долинах рек иногда до 2,5 м выше поверхности земли)
Величина напора над кровлей, м	80	1–90	1–134
Коэффициенты фильтрации, м/сут	3–10	0,2–50 (средняя 5–15)	0,2–26
Удельные дебиты скважин, л/с	0,02–3,5	0,01–9,5	0,01–4,3

В отложениях дочетвертичного периода на отдельных площадях встречаются напорные водоносные горизонты в верхнемеловых, верхнедевонских, среднедевонских, нижнекембрийских отложениях и докембрийских образованиях.

В формировании мощного горизонта грунтовых вод в **южной части** республики имеет значение большая площадь водосбора р. Припять и ее многочисленных притоков, берущих начало с окружающих Полесье возвышенностей. В результате грунтовые воды располагаются близко к поверхности, вызывая заболачивание огромных массивов. В бассейне р. Припять в четвертичных отложениях насчитывается несколько водоносных горизонтов.

Наиболее тесно связанными с поверхностными водами являются водоносные горизонты современных *аллювиальных* отложений. Грунтовые воды в них содержатся в песках и песчаных, песчано-гравийных и супесчаных наносах, слагающих пойменные террасы и русла рек. Мощность современных аллювиальных отложений колеблется в значительных пределах. В долине р. Припять она составляет 10–15 м, р. Днепр – 20–30 м. На пойменных террасах грунтовые воды залегают близко к поверхности. Глубина зеркала воды изменяется от 0 до 3 м (бассейн р. Припять) и от 0 до 5 м (бассейны рр. Днепр и Западный Буг). Водоупором аллювиальных вод служат отложения морены днепровского оледенения. Там, где морена отсутствует, воды аллювия сливаются с водами нижележащих четвертичных и коренных пород, образуя единый гидравлически связанный водоносный горизонт. Дебит скважин, питающихся водами аллювиальных отложений, составляет от 0,1 до 2,5 л/с. Эти воды широко используются для хозяйственного и питьевого водоснабжения во многих населенных пунктах. Минерализация вод низкая (100–150 мг/л), на отдельных участках, где отмечается подток воды из коренных отложений, минерализация воды обычно возрастает до 500–700 мг/л.

В пределах надпойменных террас Днепра, Припяти, Березины, Сожа и их притоков развиты грунтовые воды в *древнеаллювиальных* отложениях. Они содержатся в разнозернистых песках и песчано-глинистых отложениях. Глубина залегания зеркала воды колеблется от 0–3 м (бассейн Припяти) до 10 м (бассейны левобережных притоков Днепра). Воды слабо минерализованы и относятся к гидрокарбонатно-кальциево-магниевому типу.

Области разгрузки подземных вод приурочены к долинам рек, а питание их происходит за счет атмосферных осадков и подтока вод дочетвертичных отложений.

Реки Западная Двина, Неман и их притоки дренируют преимущественно воды четвертичных отложений, тогда как реки Верхнего Днепра получают питание также из девонских и меловых водоносных горизонтов.

Подземное питание рек Полесья, несмотря на мощные водоносные горизонты и близкое залегание к поверхности уровней грунтовых вод, крайне слабое вследствие исключительно малых уклонов поверхности грунтовых вод и неглубокого эрозионного вреза речных русел.

В геологическом отношении территория Республики Беларусь относится к Восточно-Европейской платформе. Северная часть республики до Минска представляет собой район распространения девонских отложений представленных преимущественно известняками и песчаниками. Девонские отложения выходят на дневную поверхность только в долинах рек, где четвертичные отложения размыты. Такие выходы девонских известняков известны на р. Днепр у г. Орши, р. Западная Двина и некоторых ее притоках. Центральная и южная часть республики характеризуется распространением меловых отложений в виде мела, мергеля и песков. На большей части меловые отложения перекрыты четвертичными, хотя в бассейне р. Неман и нижней части бассейна р. Сож мел выступает на дневную поверхность, где подвергается размыву и растворению атмосферными осадками, а глубже – почвенно-грунтовыми водами. Четвертичные отложения на территории Беларуси распространены повсеместно сплошным чехлом. На долю ледниковых образований приходится 88% объема всех четвертичных отложений. Неоднократные оледенения оставили мощные отложения, толщина которых на повышенных участках рельефа 150–250 м, на равнине достигает 50–100 м, уменьшаясь в Полесье и на левобережье Днепра до 20–30 м [44].

С особенностями геологического строения связано развитие процессов карстообразования. Закарстованность водовмещающих пород сказывается на стоке рек. Так, сток отдельных рек Оршанско-Могилевской равнины довольно резко отличается (при прочих близких условиях) от стока соседних рек. Например, среднегодовой сток р. Ресты у с. Сухари за 1955–1959 гг. почти вдвое меньше стока соседних рек, что можно объяснить поглощением речных вод нижележащим водоносным горизонтом [59]. На это же указывает и незначительная доля в годовом стоке подземного питания,

составляющая около 5%. Карст, связанный с действием подземных вод на известняково-доломитовые породы, известен в долинах рр. Западная Двина, Днепр и Сож. Наиболее благоприятные условия для развития карстовых процессов имеются на левобережье Днепра и в пределах Оршанско-Могилевской равнины. Территория Беларуси разделяется на три региона с разными типами карста: в северной части карст связан с карбонатными отложениями девонского возраста (*известняки, доломиты*); в центральной части развитие карста происходит в отложениях мелового возраста (*мергель, пясчий мел*), на юге выделяется меловой и соляной карст.

Реки, протекающие среди возвышенностей, характеризуются глубоко врезанными долинами, что обуславливает более высокие модули минимального стока. При выходе рек на равнинные пространства их врезы становятся меньше, долины расширяются, и модули минимального стока уменьшаются. С юго-запада на северо-восток республики простирается Белорусская гряда с высотами до 350 м над уровнем моря, это наиболее расчлененная часть республики. На крайнем северо-западе проходят отроги Балтийской гряды, отделенные от Белорусской гряды заболоченными низинами (Неманская, Нарочано-Вилейская, Полоцкая). К юго-востоку от Белорусской гряды располагаются равнины – Центрально-Березинская и Оршанско-Могилевская. К югу эти равнины переходят в плоскую, сильно заболоченную обширную низину Белорусского Полесья. Преобладающие высоты Полесья 100–150 м с некоторым повышением к окраинам, особенно к северу и югу [95].

3.1.2 Климат

Географическое положение Беларуси на западной окраине Восточно-Европейской равнины определяет своеобразие умеренно-континентального климата, формирующегося в процессе взаимодействия морского и континентального влияния.

Атмосферные осадки являются одним из главных факторов формирования речного стока в целом и минимального в частности. Еще в начале XX столетия Е.В. Оппоков говорил о существенном влиянии атмосферных осадков на уровень минимального стока воды. Чем больше осадков и меньше испаряемость, тем больше сток. Величина стока зависит от формы осадков и распределения их во времени. Дожди жаркого летнего периода дадут меньший сток, чем прохладного осеннего. Зимние осадки в виде сне-

га не дают поверхностного стока в холодные месяцы, они формируют весеннее половодье. От равномерности выпадения осадков зависит просачивание их в грунт, которое больше при затяжных дождях и меньше при ливневых.

Территория республики отличается достаточным увлажнением. В среднем за год выпадает 600–700 мм осадков. Годовое количество осадков колеблется от 520–550 мм в бассейне р. Западный Буг до 720–790 мм на северо-востоке, центральная часть получает 650–700 мм [74, 141]. В течение года осадки распределяются неравномерно. Большая часть их, 70–75% годовой суммы, выпадает в теплый период года с апреля по октябрь, тогда и происходит пополнение запасов подземных вод. В холодный период, с ноября по март, осадков выпадает от 125 мм в Брестском Полесье и местами до 250 мм на севере в Полоцкой низменности [74, 141].

Несмотря на достаточное увлажнение территории, в отдельные периоды могут наблюдаться засухи. Засухи чаще всего не охватывают большую территорию, но один раз в 7–12 лет распространяются на 50% площади республики. Наиболее засушливые периоды, охватившие около 60–70% территории Беларуси, наблюдались: в мае 1947, в сентябре 1949, в октябре–ноябре 1951 г., в октябре 1953 г., в августе 1955 г., в апреле 1957 г., в июне 1964 и 1979 гг. и августе 1971 и 1973 гг., 1981, 1984, 1986.

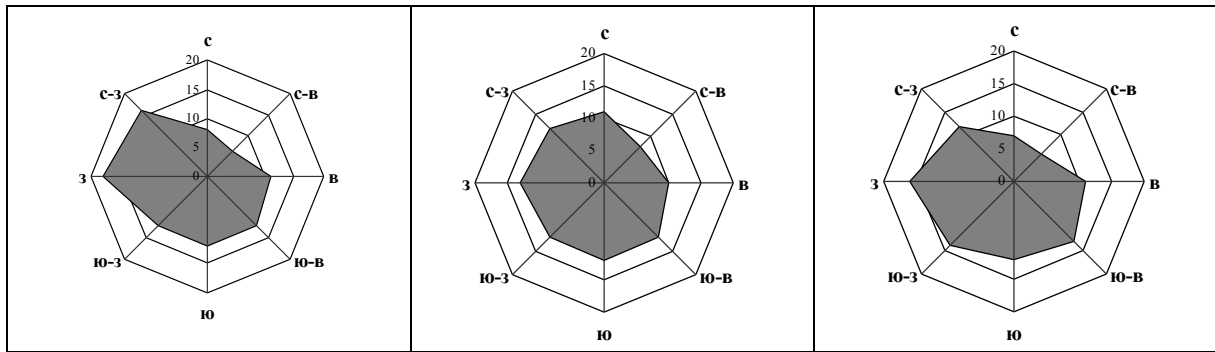
Снежный покров влияет на формирование зимнего минимального стока косвенно. В зависимости от того, когда, при каких температурных условиях и увлажненности территории образовался снежный покров, зависит величина зимнего минимального стока воды. Снежный покров предохраняет от сильного промерзания почвенный покров и способствует хорошему грунтовому питанию рек. Снежный покров в пределах республики характеризуется неустойчивостью, в среднем залегает от 75 на юго-западе до 125 дней на северо-востоке, что так же обуславливает высокий минимальный сток. Устойчивый снежный покров образуется в течение декабря, в начале месяца на северо-востоке и к концу его – на юго-западе. Средняя из максимальных за зиму высот колеблется от 7–10 см в бассейнах рек Западного Буга и Припяти до 25–30 см в верховьях рек Днепра и Западной Двины [74, 141].

Главный фактор испарения – дефицит влажности, который зависит от температуры и влажности воздуха, скорости ветра, характера подстилающей поверхности.

Температура воздуха оказывает влияние на формирование летне-осеннего минимального стока через скорость испарения, а зимнего – через интенсивность льдообразования. Средняя годовая температура на рассматриваемой территории изменяется от $3,5^{\circ}$ на северо-востоке до $7-7,5^{\circ}$ на юго-западе и юге. Самый холодный месяц – *январь*; его средняя температура $-6,7^{\circ}\text{C}$. Самые низкие абсолютные минимумы приходятся на январь и февраль и достигают в бассейне р. Западной Двины -41°C , а на всей остальной территории $-35, -39^{\circ}\text{C}$. Самый теплый месяц – *июль*, средняя температура которого $17,8^{\circ}\text{C}$. Абсолютный максимум температуры достигает $36-38^{\circ}$.

Дефицит влажности воздуха достигает минимальной величины в зимние месяцы (ноябрь–март) и колеблется от $0,5$ до $0,8$ *мб*, максимальной – в июне ($6,5-8,0$ *мб*). Самые малые величины дефицита влажности на протяжении всего года наблюдаются на северо-востоке, наибольшие – на юге, в бассейне р. Припять. **Влажность воздуха** сравнительно велика. За год число влажных дней (т.е. относительная влажность 80% и выше) колеблется от $114-134$ – на юге до $134-143$ *дней* – на остальной территории республики. В районах возвышенностей влажных дней больше (Новогрудская возвышенность – 160 влажных *дней*). Число сухих дней с влажностью в дневные часы менее 30% насчитывается от $6-9$ на возвышенностях, на севере и северо-востоке республики до $18-20$ *дней* за год на юге (Гомельская область). Наибольшей сухостью отличается весенний период. В мае средняя относительная влажность в дневной срок наблюдений по всей территории колеблется в пределах $50-55\%$. Наибольшая влажность наблюдается зимой (в декабре в дневные часы достигает $85-88\%$).

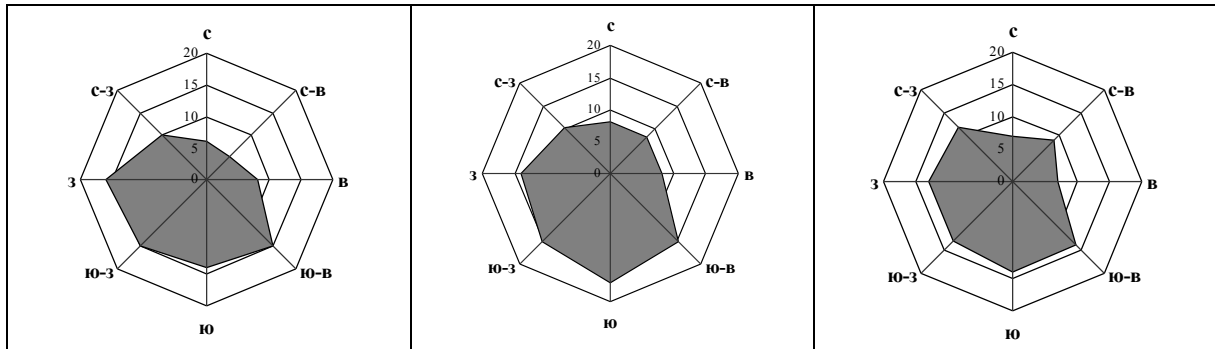
Среднегодовая скорость **ветра** составляет $3,5-4,0$ *м/с* на равнинах и возвышенностях и $3,0-3,5$ *м/с* на низменностях и по долинам рек. Максимальные скорости ветра характерны для осенне-зимнего периода и составляют $4-5$ *м/с*, минимальные – наблюдаются в июле–августе ($2,5-3$ *м/с*). Направление ветра также может сказываться на испарении. Так ветры западных направлений обладают высокой влажностью, что способствует выпадению осадков и снижению дефицита влажности. Восточные и южные ветры наоборот могут вызывать увеличение дефицита влажности. В зимние месяцы преобладают ветры юго-западного и западного направления. Весной направление ветра неустойчивое; ветры юго-западных направлений сменяются северо-западными и юго-восточными. Летом преобладают северо-западные, осенью – южные направления ветров (рисунок 3.1).



Барановичи

Бобруйск

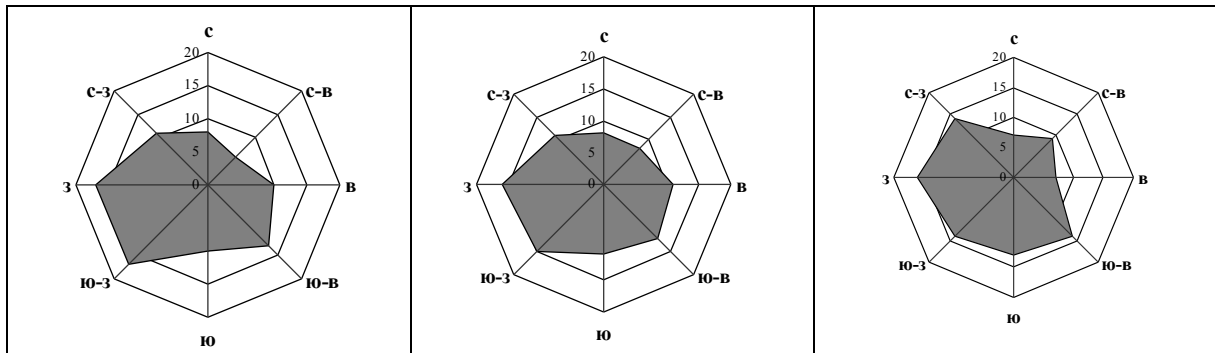
Брест



Василевичи

Витебск

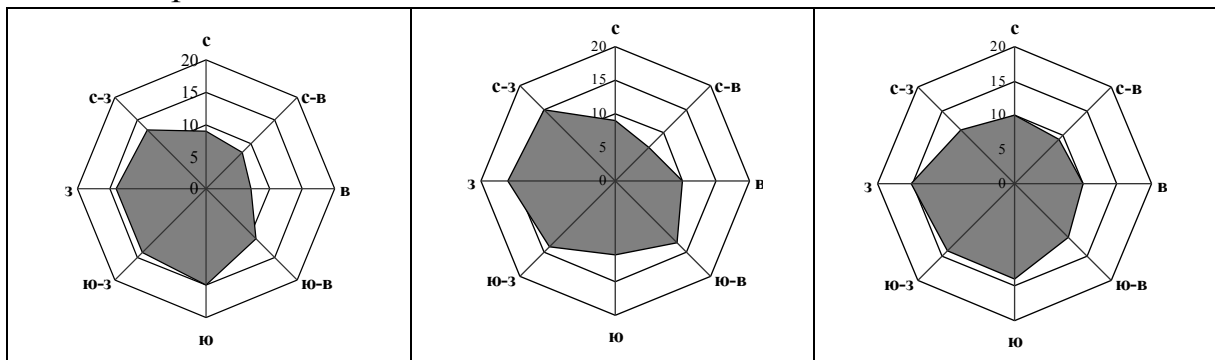
Гомель



Гродно

Лида

Минск



Могилев

Пинск

Полоцк

Рисунок 3.1 – Розы ветров (средний многолетний)

3.1.3 Почвенный и растительный покров

Почвенный покров играет большую роль в формировании минимальных расходов воды, через водно-физические свойства (водопроницаемость и водоемкость), которые определяют интенсивность испарения и способность впитывать и пополнять запасы грунтовых вод. По данным [119] в бассейнах с песчаными и супесчаными водопроницаемыми почвами вследствие значительной инфильтрации атмосферных осадков и предохранения их от испарения возникают благоприятные условия для аккумуляции подземных вод, а в последствии питания в меженный период. Механический состав почвообразующих пород достаточно разнородный, однако среди пахотных угодий преобладают породы супесчаного состава – 42,5%, суглинистые и глинистые составляют 37,6%, песчаные – 13,6% и торфяные – 6,3%. По степени увлажнения 45,3% общей площади пахотных угодий занимают автоморфные (нормально увлажненные) почвы; 40,3% – полугидроморфные (длительно избыточно увлажненные) и 14,4% – гидроморфные (постоянно избыточно увлажненные).

В бассейне р. Западная Двина и верхней части бассейна р. Сож, преобладают дерново-подзолистые почвы глинистые и суглинистые. В нижней части бассейна р. Сож развиты почвы на песках и супесях. Бассейн р. Березина и Поднепровье отличаются развитием преимущественно дерново-подзолистых почв на супесях и песках, реже на суглинках, значительные площади занимают торфяно-болотные почвы. В бассейне р. Неман почвы представлены в основном суглинками и супесями. Суглинки преобладают в юго-западной части бассейна, а Лидская равнина и правобережье р. Виляя покрыто супесями и песками. В бассейне р. Припять преобладают дерново-подзолистые почвы на песках.

Влияние леса на формирование минимального стока выражается через его водоохранную и водорегулирующую (способствуют переводу склонового и руслового стоков в почвенный) функции. Лес повышает влажность воздуха, способствует перераспределению выпадающих атмосферных осадков, увеличению запасов воды и проникновению ее в почву, замедляет поверхностный сток (переводит его в грунтовый) (рисунок 3.2). Существенна роль леса в снижении максимальных расходов, некотором увеличении минимальных и более выровненное внутригодовое распределение стока. В.Е. Водогретский, В.В. Рахманов, И.Д. Юркевич [28, 29, 115, 116, 143] обосновал положение, согласно которому леса являются водоохранными

факторами, поддерживающими высокую водность рек и способствующими пополнению запасов грунтовых вод. Лесистость Беларуси составляет 35,5%. На территории Беларуси преобладают смешанные леса с хорошо развитым травяным покровом. На песках надпойменных террас и водоразделах распространены сосновые боры.

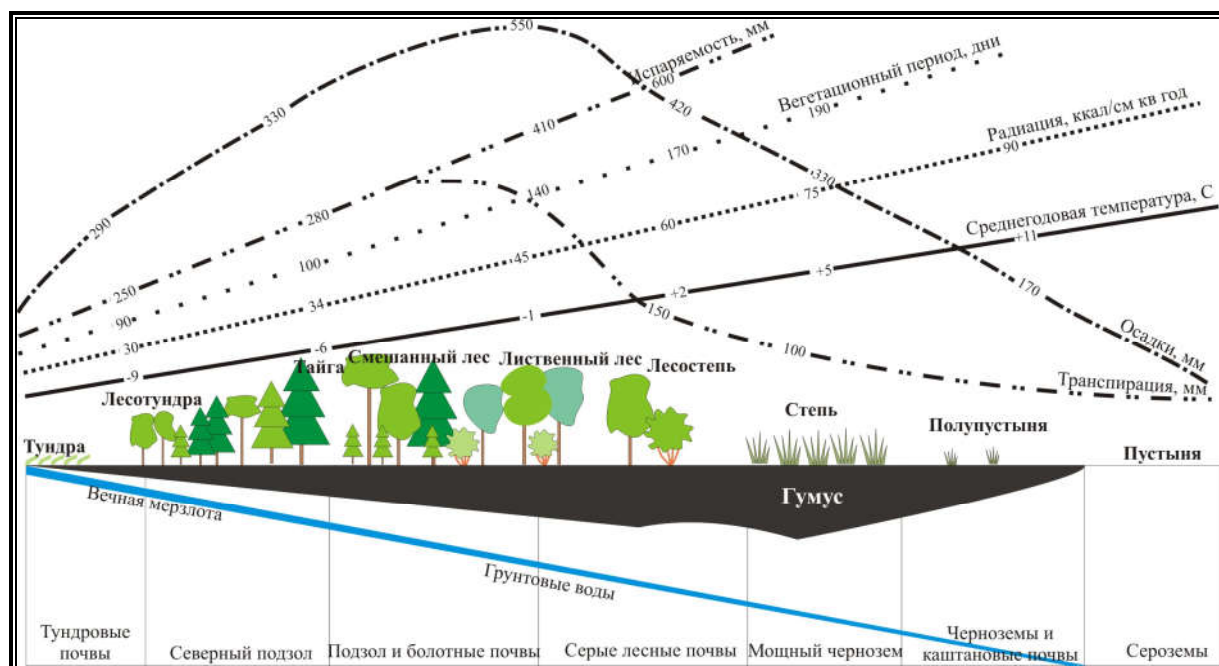


Рисунок 3.2 – Связь водопотребления растений с почвенно-климатическими факторами (по В.Н. Сукачеву и В. Лархену)

3.1.4 Болота и озера

В Беларуси насчитывается около 9212 болот площадью 2,5 млн. га с запасами торфа-сырца 31,3 млрд. м³. До осушения их общая площадь достигала 2,939 млн. га, после мелиорации осталось в естественном состоянии больше половины белорусских болот. Растительность болот занимает 11,5% всего земельного фонда страны [12]. Самые древние болота Беларуси – полесские, их возраст – около 11 тысяч лет, а толщина слоя торфа чаще всего не превышает полутора метров. В Витебской области болота моложе – им «всего» 5–6 тысяч лет, но они глубже – до 9 метров. Размещаются болота на территории Беларуси неравномерно. В местах с бедным атмосферным питанием развиваются верховые болота (Полоцкая низина,

Друть-Березинское междуречье), при преобладании грунтового питания болотные массивы становятся почти полностью низинными (в Гродненской и большей части Брестской обл.). В других районах соотношение распределения низинных и верховых болот различно. Самые большие болота находятся в Брестской области – Великий лес, Выгонощанское болото, Поддубичи, Обровское болото, Хольча.

В середине XIX в. сложилось представление о том, что гидрологическая роль естественных болот заключается в аккумуляции влаги и регулировании речного стока аналогично ледникам и глетчерам, накапливающим влагу зимой и отдающим ее в маловодное летнее время на питание рек. Спустя три четверти века ученые опровергли это представление. По данным [16, 17, 18, 58, 117] заболоченность территории отрицательно сказывается на минимальном стоке рек. Естественное торфяное болото имеет большую влагоемкость, способно аккумулировать и удерживать большое количество воды, а водоотдача торфа мала. В результате в торфянике вода не используется на питание рек, а теряется на испарение, особенно в теплый сезон. С верхового болота в периоды низкого стояния уровня грунтовых вод (зима и лето) сток в реки прекращается, а с низинного болота в меженные периоды сток несколько выше, что обеспечивает более устойчивое питание в летний период.

В пределах Беларуси насчитывается более 10 тыс. озер общей площадью почти 2000 км² и общим объемом воды 6–7 км³. В основном они небольшие по площади и только некоторые занимают десятки квадратных километров. Многие озера расположены близко друг к другу или соединены водотоками и образуют группы (Нарочаскую, Браславскую, Ушачскую и др.). Местами (Браславский, Ушацкий районы) озера занимают 8–10% территории. В северной части республики – Белорусском Поозерье, в бассейнах рр. Западная Двина и Неман расположены не только многочисленные, но и наиболее глубокие озера (Долгое $h = 53,7$ м). В Белорусском Полесье, в бассейнах рр. Днепр и Западный Буг, наоборот, преобладают мелкие старичные озера. Озера юга Беларуси носят черты деградации, часто имеют низкие заболоченные берега, зарастающую поверхность, плоские и неглубокие котловины (Чырвонае, Выгонощанское, Черное). В центральной части страны озер мало, так как после таяния ледника они были спущены по глубоковрезанным рекам, а котловины их заполнились торфом.

Озера, так же как и болота аккумулируют воду, но это большая часть талых и дождевых вод. В меженные периоды происходит сработка озера, и минимальный сток повышается. Регулирующая способность озер зависит от места расположения их на водосборе и от водности года. Наибольшее водорегулирующее значение они приобретают при расположении в нижнем течении реки. После ряда засушливых лет, когда озера не наполнены, аккумулирующая способность значительно больше, что может привести к снижению стока в реки [45, 46, 124, 144].

3.2 Оценка влияния природно-климатических факторов на формирование минимального стока

Для изучения влияния основных факторов на минимальный сток рек Беларуси нами использовался метод множественной линейной корреляции в виде:

$$q_{\min}^{n-0,3} = q_0 + a_1 \cdot \varphi + a_2 \cdot \lambda + a_3 \cdot A + a_4 \cdot H_{cp} + a_5 \cdot \Delta H + a_6 \cdot X_{год} + a_7 \cdot f_б + a_8 \cdot f_{оз} + a_9 \cdot f_{л} \quad (3.1)$$

где φ – широта створа; λ – долгота створа; A – площадь водосбора, км²; H_{cp} – средняя высота водосбора, м; ΔH – эрозионный врез русла реки, м; $X_{год}$ – годовое количество осадков, мм; $f_б$ – заболоченность водосбора, %; $f_{оз}$ – озерность водосбора, %; $f_{л}$ – лесистость водосбора, %.

В таблицах 3.3, 3.4 представлены результаты расчетов парных коэффициентов корреляции модуля минимального стока с определяющими его факторами. Выделенные коэффициенты корреляции статистически значимы, т.е. подтверждена реальная связь между модулем минимального стока и физико-географическими факторами. Как видно из таблиц 3.3 и 3.4 широта места и годовое количество осадков оказывает существенное влияние на формирование минимального стока как летне-осеннего, так и зимнего. Эти два показателя характеризуют общую увлажненность территории, поэтому для них характерны высокие парные коэффициенты корреляции для летне-осеннего $r(\varphi) = 0,52 \pm 0,08$; $r(X_{год}) = 0,49 \pm 0,08$; для зимнего – $r(\varphi) = 0,49 \pm 0,08$; $r(X_{год}) = 0,36 \pm 0,09$.

Таблица 3.3 – Корреляционная матрица модуля летне-осеннего минимального стока и природно-климатических факторов

Стокоформирующие факторы	$q_{\min}^{л-о}$	λ	φ	A	H_{cp}	ΔH	$X_{год}$	$f_{оз}$	$f_{б}$	$f_{л}$
Модуль летне-осеннего минимального стока, ($q_{\min}^{л-о}$)	1,00	0,04	0,52	0,12	0,40	0,34	0,49	0,16	-0,20	0,24
Долгота створа, (λ)		1,00	0,37	0,06	0,09	0,00	0,13	-0,02	-0,58	0,17
Широта створа, (φ)			1,00	-0,14	0,17	0,12	0,42	0,53	-0,50	0,08
Площадь водосбора, (A)				1,00	0,17	0,50	-0,00	-0,02	-0,04	-0,00
Средняя высота водосбора, (H_{cp})					1,00	0,53	0,40	-0,17	-0,25	-0,05
Эрозионный врез русла реки, (ΔH)						1,00	0,18	0,03	-0,26	-0,02
Годовое количество осадков, ($X_{год}$)							1,00	0,12	-0,28	0,03
Озерность водосбора, ($f_{оз}$)								1,00	-0,14	-0,01
Заболоченность водосбора, ($f_{б}$)									1,00	-0,19
Лесистость водосбора, ($f_{л}$)										1,00

Примечание – Выделенные коэффициенты статистически значимы при $p = 0,05$

Таблица 3.4 – Корреляционная матрица модуля зимнего минимального стока и природно-климатических факторов

Стокоформирующие факторы	$q_{\min}^з$	λ	φ	A	H_{cp}	ΔH	$X_{год}$	$f_{оз}$	$f_{б}$	$f_{л}$
Модуль зимнего минимального стока, ($q_{\min}^з$)	1,00	-0,06	0,49	-0,03	0,23	0,19	0,36	0,29	-0,09	0,31
Долгота створа, (λ)		1,00	0,37	0,06	0,09	0,00	0,13	-0,02	-0,58	0,17
Широта створа, (φ)			1,00	-0,14	0,17	0,12	0,42	0,53	-0,50	0,08
Площадь водосбора, (A)				1,00	0,17	0,50	-0,00	-0,02	-0,04	-0,00
Средняя высота водосбора, (H_{cp})					1,00	0,53	0,40	-0,17	-0,25	-0,05
Эрозионный врез русла реки, (ΔH)						1,00	0,18	0,03	-0,26	-0,02
Годовое количество осадков, ($X_{год}$)							1,00	0,12	-0,28	0,03
Озерность водосбора, ($f_{оз}$)								1,00	-0,14	-0,01
Заболоченность водосбора, ($f_{б}$)									1,00	-0,19
Лесистость водосбора, ($f_{л}$)										1,00

Примечание – Выделенные коэффициенты статистически значимы при $p = 0,05$

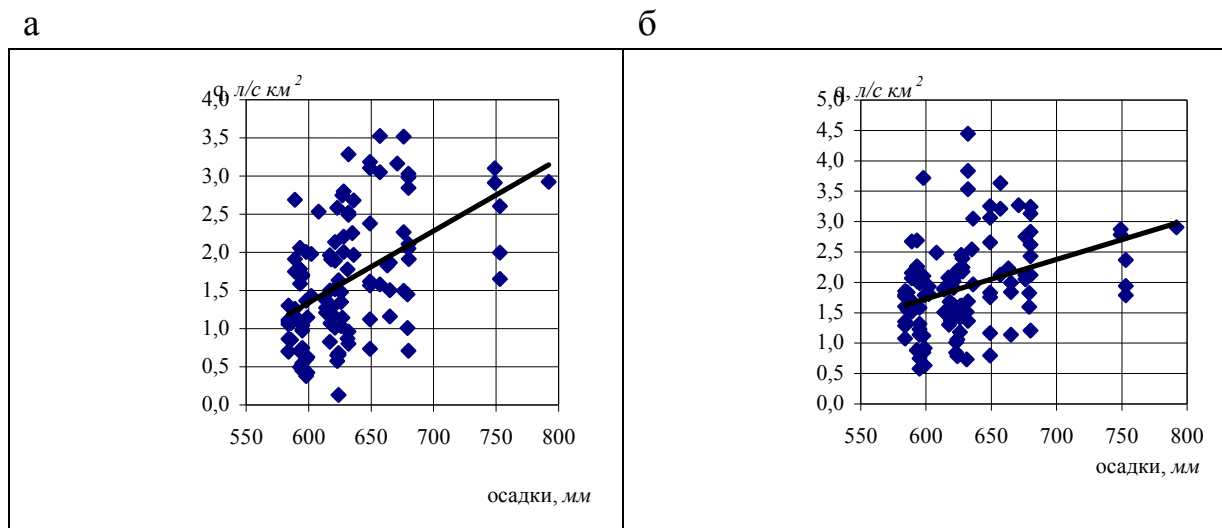
Из таблицы 3.5 следует, что исключение величин (одной или нескольких сразу), таких как долгота створа, площадь, озерность, заболоченность, средняя высота водосбора, незначительно влияет на величину коэффициента множественной корреляции, а исключение таких величин, как годовое количество осадков, лесистость водосбора и др. значительно его меняет.

Таблица 3.5 – Влияние исключения переменных (одной или нескольких) на коэффициент множественной регрессии

Условия	Коэффициент корреляции	
	летне-осенний	зимний
Использованы все переменные	0,74	0,69
Исключены:		
Широта створа	0,63	0,60
Долгота створа	0,72	0,67
Площадь водосбора	0,73	0,69
Средняя высота водосбора	0,73	0,68
Озерность водосбора	0,73	0,69
Заболоченность водосбора	0,73	0,67
Лесистость водосбора	0,69	0,60
Эрозионный врез русла реки	0,73	0,69
Годовое количество осадков	0,71	0,68
Озерность, заболоченность, лесистость	0,68	0,59
Долгота створа, площадь водосбора	0,72	0,67

Следует отметить влияние годового количества осадков на формирование минимального стока. Из таблиц 3.3 и 3.4 видно, что коэффициенты корреляции статистически значимы и исключение этого фактора приводит к изменению коэффициента множественной корреляции.

В целях выяснения роли годовых осадков в генезисе минимального стока рек Беларуси построены зависимости минимального стока от количества атмосферных осадков: на рисунке 3.3 представлена взаимосвязь между среднемноголетними модулями летне-осеннего и зимнего минимального стока и среднемноголетним количеством атмосферных осадков, выпадающими на поверхность водосбора; на рисунке 3.4 показана зависимость между ежегодными величинами летне-осеннего и зимнего минимального расхода воды и ежегодным (осредненными для водосбора) среднегодовым количеством атмосферных осадков. Из рисунка видно, что при увеличении количества годовых осадков возрастает величина минимального стока рек, а градиент увеличения для летне-осеннего сезона больше чем для зимнего и составляет $\alpha_{л-о} = 0,0094$; $\alpha_з = 0,0065$ (л/с км²).



а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 3.3 – Зависимость модуля минимального стока от годовой суммы осадков

Учет только количества выпавших осадков не может дать полной картины, так как необходимо учитывать испарившиеся осадки, осадки идущие на пополнение запасов грунтовых вод, поэтому как видно из рисунка 3.2 а более тесная связь наблюдается между летне-осенним минимальным стоком и годовыми осадками, хотя коэффициент корреляции составляет лишь 0,5. Почти хаотическое расположение точек на рисунке 3.2 б объясняется тем, что в зимний сезон осадки, выпавшие в виде снега, не принимают непосредственного участия в формировании речного стока, только зимы с частыми оттепелями способствуют увеличению зимнего минимального стока и пополнению запасов грунтовых вод. Так, например, в 1975 г. годовое количество осадков в бассейне Немана составило 552 мм, что ниже среднего, а зимний минимальный сток составил $147 \text{ м}^3/\text{с}$, превышая средние многолетние значения более чем в 2 раза. Эта зима была теплой, температура воздуха января на $5\text{--}6^\circ\text{C}$ выше нормы и снежный покров был неустойчивым.

Для рек Беларуси выявлена прямая зависимость между модулем минимального стока, средней высотой водосбора и эрозионным врезом русла реки (рисунок 3.5; таблица 3.3, 3.4). Гидрогеологические условия водосбора частично находят отражение в этих показателях: чем больше глубина вреза, тем больше водоотдача в русла рек. Полученные результаты (летне-осенний $r(H) = 0,40 \pm 0,088$; $r(\Delta H) = 0,34 \pm 0,090$; для зимнего – $r(H) = 0,23 \pm 0,094$; $r(\Delta H) = 0,19 \pm 0,094$) позволяют судить о том, что

характер расчлененности рельефа речных бассейнов имеет существенное значение в формировании летне-осеннего и зимнего минимальных стоков, и эти показатели необходимо учитывать при расчете минимального стока.

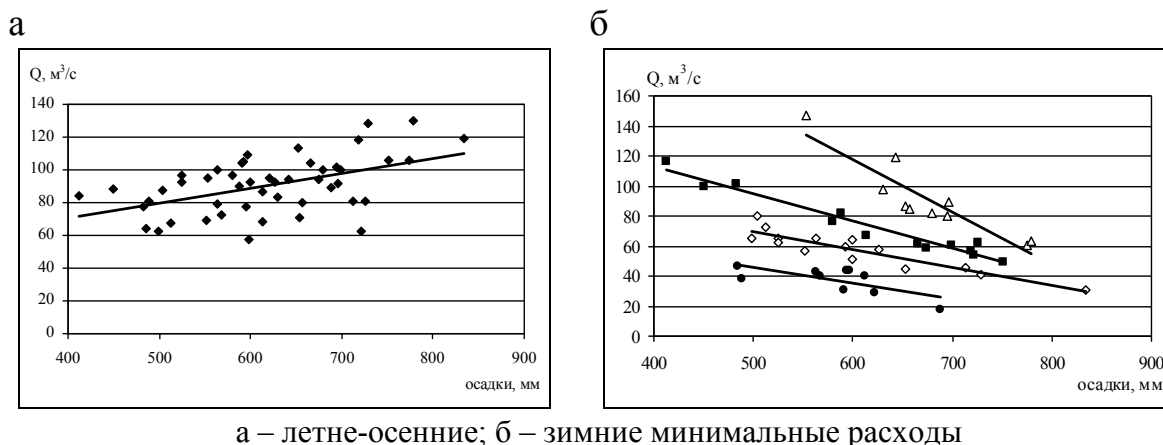


Рисунок 3.4 – Зависимость минимальных расходов от годового количества осадков р. Неман – г. Гродно

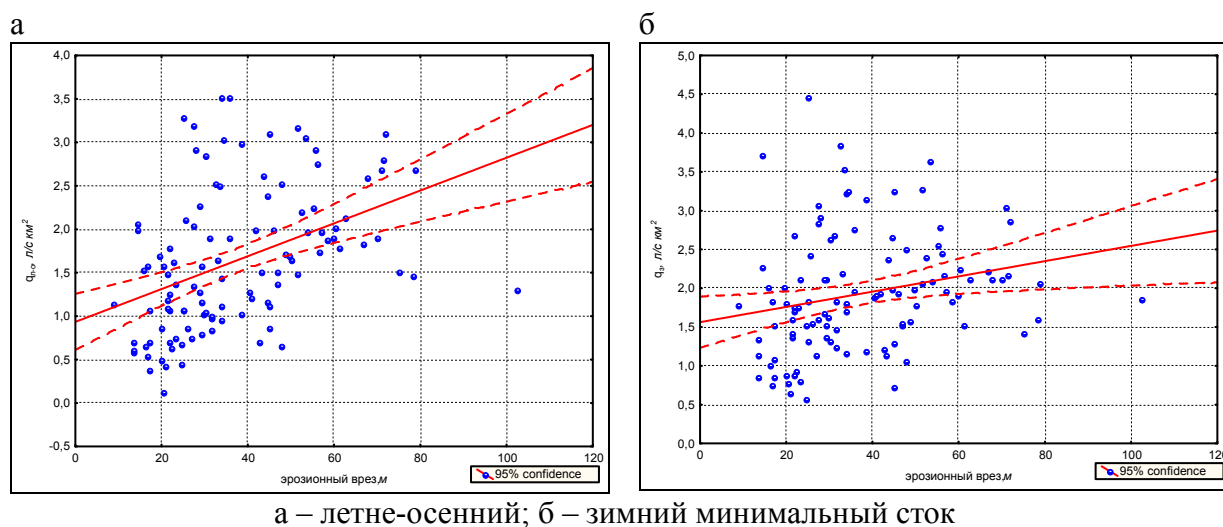
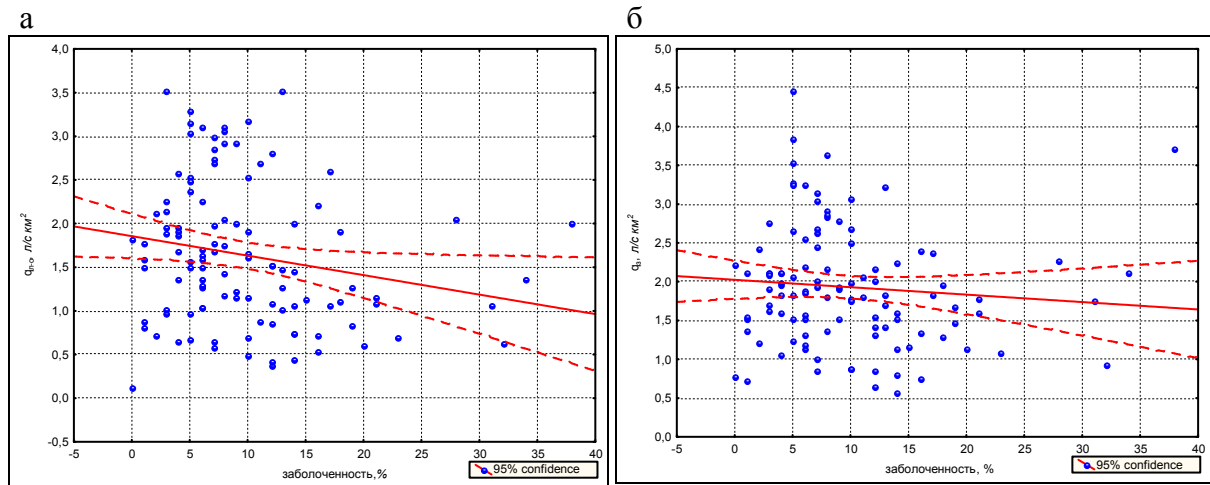


Рисунок 3.5 – Зависимость модуля минимального стока воды от глубины эрозионного вреза русла реки

Характерной чертой территории Беларуси является довольно высокая заболоченность водосборов до 38%. Наибольшее распространение получили низинные, в бассейне Припяти они составляют 90% площади всех болот. Значительно заболочен также бассейн р. Березины (20–30%). Верховые болота наиболее распространены на севере Беларуси, а переходные – в центральной части республики. Коэффициент корреляции минимального стока с заболоченностью водосбора для летне-осеннего составляет $-0,20 \pm 0,09$, а для зимнего – $-0,09 \pm 0,10$. Как показывают расчеты (рисунок 3.6,

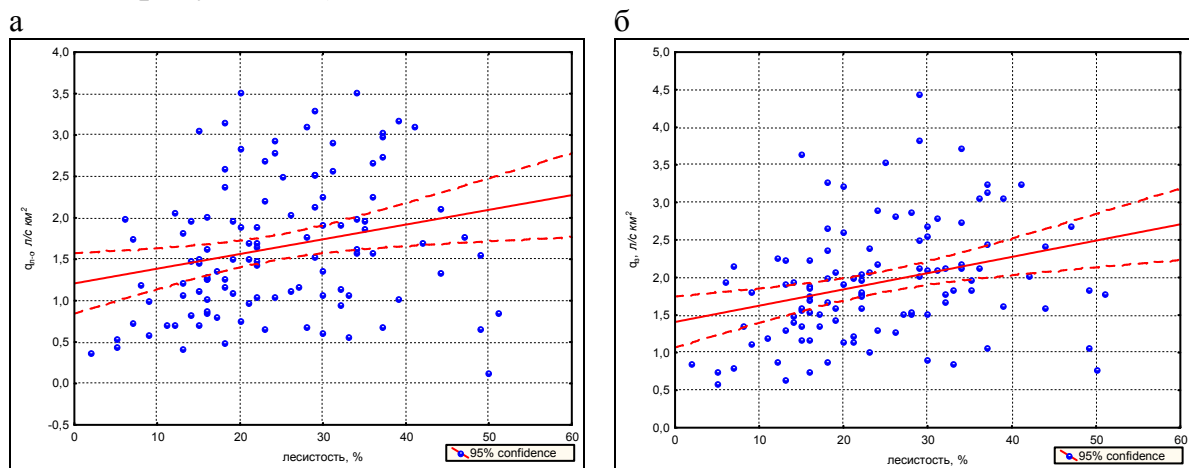
таблица 3.2) болота имеют регулирующее значение в летне-осенний период.



а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 3.6 – Зависимость модуля минимального стока воды от заболоченности водосбора

По мнению В.Р. Вильямса, для предотвращения усиленной эрозии почв оптимальные площади водосбора, занятые под лесными массивами, должны составлять 20–25%. Лесистость водосборов Беларуси варьирует от 2 до 50%, средняя – 24%. Коэффициент корреляции модуля зимнего минимального стока выше ($0,31 \pm 0,09$), чем летне-осеннего ($0,24 \pm 0,09$), а при исключении этого фактора коэффициент множественной корреляции снижается (рисунок 3.7).



а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 3.7 – Зависимость модуля минимального стока воды от лесистости водосбора

Следует отметить, что между модулем минимального стока рек и озерностью водосборов существует положительная связь равная для летне-

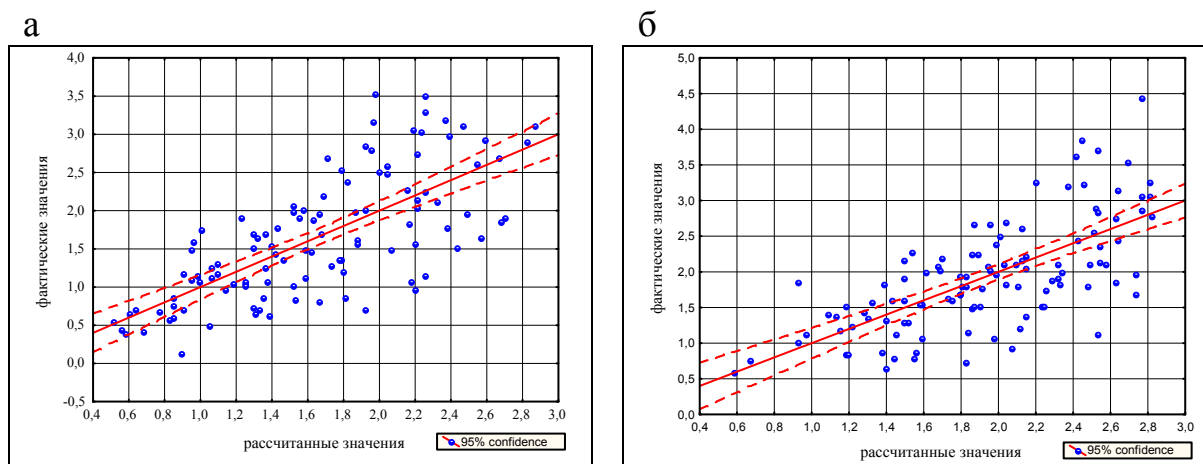
осеннего минимального стока $0,16 \pm 0,10$, а для зимнего – $0,29 \pm 0,09$. Коэффициенты озерности некоторых бассейнов достигают 10%. Озера также как и болота могут аккумулировать воду и иметь водорегулирующее значение [45, 46, 124].

Таким образом, при построении расчетного уравнения необходимо оставить те факторы, коэффициенты корреляции которых наиболее весомы. Из таблиц 3.3, 3.4, 3.5 видно, что на формирование летне-осеннего минимального стока наибольшее влияние оказывают: широта створа, годовое количество осадков, средняя высота водосбора, эрозионный врез русла реки, заболоченность и лесистость водосбора. Зимний минимальный сток формируется за счет следующих природно-климатических факторов: широты и долготы места, средней высоты и лесистости водосбора [52]. С учетом вышесказанного, уравнения регрессии принимают вид (3.2; 3.3):

$$q_{\min}^{l-o} = 0,307 \cdot \varphi + 0,007 \cdot H_{cp} + 0,008 \cdot \Delta H + 0,005 \cdot X_{zoo} + 0,028 \cdot f_b + 0,019 \cdot f_l - 19,96 \quad (3.2)$$

$$q_{\min}^z = 0,399 \cdot \varphi - 0,076 \cdot \lambda + 0,006 \cdot H_{cp} + 0,025 \cdot f_l - 17,378 \quad (3.3)$$

Все коэффициенты уравнения значимы на 5% уровне ($p < 0,05$). Уравнение для летне-осеннего минимального стока объясняет 51,5% ($R^2 = 0,515$) вариации зависимой переменной, а для зимнего 47,3%. Проверка уравнений показала хорошую сходимость вычисленных и наблюдаемых данных (рисунок 3.8).



а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 3.8 – Сопоставление рассчитанных и фактических значений модуля минимального стока

Глава 4

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА РЕК БЕЛАРУСИ

4.1 Временная структура минимального стока

В настоящее время в гидрологии широко пользуются *геофизические, географические, математические* [14] и другие методы исследований в зависимости от характера и вида решаемых ею задач.

Спектрально-временной анализ (СВАН-анализ)

Для обнаружения характерной цикличности, анализа их устойчивости или, наоборот, изменчивости во времени используется классическая процедура спектрально-временного анализа, а также родственная ей процедура анализа параметра хаотизации.

Спектрально-временной анализ представляет собой спектральный анализ в скользящем временном окне. В результате получается диаграмма спектрально-временного анализа. На горизонтальной оси откладывается календарное время. Значения на оси абсцисс СВАН-диаграмм 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. Более сильная «зачерненность» на диаграммах соответствует большей амплитуде спектра. Длина окна задается исходя из требуемой детальности и спектрального состава. Длина окна выбирается исходя из требований получить данные о гармониках в наиболее широком частотном диапазоне, из требуемой детальности и фактического частотного состава процесса. Если взять слишком малое окно, мы теряем информацию о низких частотах. Если окно слишком велико, СВАН-диаграмма становится чересчур зарегулированной. Обычно величина окна выбирается равной 0,25–0,33 части от продолжительности ряда, которая в нашем случае составляет 30 лет. Если требуется получить сведения об эволюции высокочастотных составляющих, величину окна уменьшают.

Повторяемость доминирующих ритмов выражается в виде более или менее продолжительных зачерненных полос. Этот признак показывает продолжительность существования ритмических изменений. Об интенсивности процессов можно судить по прилагаемым справа от СВАН-диаграммы легендам. При необходимости СВАН-диаграммы некоторых

рядов даются в разных вариантах – для того, чтобы нужный интервал частот мог быть хорошо и подробно рассмотрен. Для длинных рядов, если оказывалось нужным просмотреть динамику высокочастотных составляющих, применялось предварительное разбиение ряда на несколько частей.

Определение параметра хаотизации также представляет собой вид спектрально-временного анализа. На оси абсцисс откладывается календарное время, а на оси ординат – степень «заполненности» спектра. Монохроматическому процессу соответствует нулевой уровень, а белому шуму – единица [89].

Спектральные функции в работе используются для определения основных частот и продолжительности циклов в ходе колебаний минимального стока рек. Анализ диаграмм показал следующие закономерности (рисунок 4.1, приложение Б). Минимальные амплитуды колебаний наблюдаются на р. Дисна и Щара, максимальные – на рр. Припять, Днепр и Сож. Амплитуды зимнего минимального стока больше амплитуд летних на рр. Припять, Днепр (Речица), Виляя (Михалишки), Днепр (Орша), Березина (Бобруйск), на остальных реках картина обратная (амплитуды летне-осеннего минимального стока больше зимних). Анализируя СВАН-диаграммы *летне-осеннего минимального стока*, можно отметить следующее:

33-летние циклы на рр. Западная Двина (Витебск), Неман (Гродно), Днепр (Орша, Речица), Мухавец (Брест), Щара (Слоним), Виляя (Михалишки), Дисна (Шарковщина);

25-летние циклы на рр. Западная Двина (Полоцк), Припять (Мозырь), Щара (Слоним);

20-летние циклы на р. Припять;

17-летние циклы на рр. Виляя (Михалишки), Березина (Бобруйск), Днепр (Речица), Сож (Гомель);

11-летние циклы на рр. Западная Двина (Витебск), Западная Двина (Полоцк), Виляя (Михалишки), Сож (Гомель);

10-летние циклы на рр. Днепр (Орша), Сож (Гомель);

9-летние циклы на рр. Западная Двина (Полоцк), Припять (Мозырь), Березина (Бобруйск);

8-летние циклы на рр. Западная Двина (Витебск), Дисна (Шарковщина);

7-летние циклы на рр. Днепр (Орша), Птичь (Лучицы);

6-летние циклы на рр. Дисна (Шарковщина);

5-летние циклы на рр. Западная Двина (Витебск, Полоцк), Припять (Мозырь), Днепр (Речица, Орша), Птичь (Лучицы), Щара (Слоним), Вилия (Михалишки), Березина (Бобруйск), Сож (Гомель);

4-летние циклы на рр. Западная Двина (Полоцк, Витебск), Днепр (Речица, Орша), Мухавец (Брест), Щара (Слоним), Березина (Бобруйск);

3-летние циклы на рр. Припять (Мозырь), Днепр (Речица, Орша), Птичь (Лучицы), Мухавец (Брест), Щара (Слоним), Вилия (Михалишки), Дисна (Шарковщина), Березина (Бобруйск);

2-летние циклы на рр. Припять (Мозырь), Птичь (Лучицы), Сож (Гомель);

Продолжительность циклов во времени сильно варьирует от 4 до 50 лет, абсолютное большинство составляет от 10 до 35 лет. Наиболее длительные 2-летние и 3-летние циклы отмечены на р. Припять и р. Дисна по 50 лет. Наиболее «мощные» (зачерненные) циклы: 3, 5, и 33-летние [38, 90].

Анализ СВАН-диаграмм *зимних минимальных расходов* показал наличие следующих циклов:

33-летние циклы на рр. Западная Двина (Витебск), Неман (Гродно), Днепр (Орша), Мухавец (Брест), Щара (Слоним), Вилия (Михалишки), Сож (Гомель);

25-летние циклы на р. Припять (Мозырь);

20-летние циклы на р. Западная Двина (Полоцк);

17-летние циклы на рр. Днепр (Речица), Птичь (Лучицы), Березина (Бобруйск);

13-летние циклы на р. Сож (Гомель);

11-летние циклы на рр. Птичь (Лучицы), Дисна (Шарковщина), Сож (Гомель);

10-летние циклы на рр. Западная Двина (Полоцк), Птичь (Лучицы), Дисна (Шарковщина);

8-летние циклы на рр. Днепр (Орша), Дисна (Шарковщина), Сож (Гомель);

6-летние циклы на рр. Днепр (Орша, Речица), Вилия (Михалишки), Березина (Бобруйск), Сож (Гомель);

5-летние циклы на рр. Западная Двина (Витебск, Полоцк), Припять (Мозырь), Днепр (Орша, Речица), Птичь (Лучицы), Мухавец (Брест), Щара (Слоним), Дисна (Шарковщина);

Летне-осенний минимальный сток

Зимний минимальный сток

Западная Двина – г. Витебск

Неман – г. Гродно

Днепр – г. Речица

Припять – г. Мозырь

Рисунок 4.1 – СВАН-диаграммы летне-осенних и зимних минимальных расходов воды рек Беларуси

4-летние циклы на рр. Западная Двина (Полоцк), Припять (Мозырь), Неман (Гродно), Днепр (Орша), Виляя (Михалишки), Сож (Гомель);

3-летние циклы на рр. Западная Двина (Витебск, Полоцк), Неман (Гродно), Днепр (Речица), Птичь (Лучицы), Мухавец (Брест), Щара (Слоним), Виляя (Михалишки), Дисна (Шарковщина), Березина (Бобруйск);

2-летние циклы на рр. Западная Двина (Витебск, Полоцк), Припять (Мозырь), Днепр (Речица), Березина (Бобруйск).

Продолжительность циклов во времени изменяется от 4 до 70 лет, абсолютное большинство составляет от 10 до 35 лет. Наиболее длительные 33-летние циклы отмечены на р. Мухавец и р. Щара по 70 лет. Наиболее устойчивые циклы: 4 и 33-летние.

На рисунке 4.2, таблице 4.1, приложении Б представлено изменение параметра хаотизации, при анализе отмечено следующее:

для *летне-осеннего* минимального стока наибольшие амплитуды (0,8) наблюдаются на рр. Днепр (Орша), Дисна (Шарковщина), Березина (Бобруйск), наименьшие (0,6) – на р. Припять (Мозырь);

р. Западная Двина – г. Витебск до начала XX в. амплитуда колебаний параметра хаотизации составляла 0,4; скачок (до 0,85) наблюдался в 1904 г., затем до конца 50-х гг. параметр и амплитуды колебаний уменьшались и опустились до 0,3; в 60-х гг. опять резкий скачок вверх (0,22–0,85), и с этого же года идет тренд к увеличению параметра хаотизации и увеличению амплитуды колебаний;

р. Западная Двина – г. Полоцк в начале XX в. амплитуда колебаний параметра хаотизации составляла 0,2; «всплеск» до 0,84 наблюдался в 1904 г., затем до начала 40-х гг. параметр снижался и амплитуды колебаний также уменьшались, в 1948–1950 гг. резкий скачок вверх и вниз (0,28–0,82–0,18), а с конца 50-х гг. наблюдается тенденция к увеличению и параметра хаотизации и амплитуды колебаний;

р. Дисна – пгт Шарковщина на графике распределение параметра хаотизации можно заметить небольшую тенденцию к увеличению на протяжении всего периода, среднее значение составляет 0,5; амплитуда колебаний максимальна в начале 50-х гг. и составляет 0,65;

р. Неман – г. Гродно наблюдается снижение параметра хаотизации и увеличение размаха колебаний вплоть до 1978 г., наименьшее значение в 1977 г. (0,25) и затем постепенно увеличивается до 0,60, а наибольшее значение наблюдалось в 1896 (0,85);

р. Щара – г. Слоним с начала наблюдений до 1930 г. виден явный тренд к уменьшению параметра хаотизации, амплитуда колебаний составляет 0,4; в начале 30-х гг. отмечено наименьшее значение 0,17; с 1930 по 2000 гг. происходит стабилизация параметра и его среднее значение составляет 0,56–0,60;

р. Виляя – с. Михалишки выделяется три периода с различной длительностью и различными характеристиками: 1881–1910 гг. положительный тренд, амплитуда колебаний 0,4; 1911–1937 гг. параметр хаотизации снизился от 0,94 до 0,17, среднее значение 0,60; 1938–2000 гг. тенденция к увеличению, в конце 70-х гг. резкий скачок от 0,92 до 0,17;

р. Мухавец – г. Брест с начала наблюдений до 1930 г. виден тренд к уменьшению параметра хаотизации, амплитуда колебаний составляет 0,38; в начале 30-х гг. отмечено наименьшее значение 0,17; с 1930 по 2000 гг. происходит стабилизация параметра и даже небольшое увеличение, среднее значение составляет 0,56–0,60; период 1930–1960 гг. характеризуется большими амплитудами до 0,63;

р. Днепр – г. Орша до начала 30-х гг. наблюдается чередование пиков и спадов от 0,37 до 0,84, затем происходит спад до 0,16, далее снова подъем до 1939 г., и с 1941 г. начинает проявляться тенденция к возрастанию параметра хаотизации; наименьшее значение этого параметра было зафиксировано в конце 70-х гг. (0,12), а с начала 80-х увеличивается амплитуда колебаний до 0,6 и приходит увеличение значений параметра;

р. Днепр – г. Речица параметр хаотизации с начала наблюдений до середины 70-х гг. увеличивался от 0,5 до 0,6; амплитуды колебаний иногда составляют до 0,6; из графика видно, что значения параметра с 1975 г. уменьшаются, а амплитуда увеличивается;

р. Сож – г. Гомель весь период можно разделить на три отрезка: 1882–1930 гг. – смена максимумов и минимумов (0,23–0,70); 1931–1981 гг. – тенденция к увеличению значения параметра хаотизации и уменьшению амплитуды колебаний, в этом периоде регистрируется максимальной значение 0,83; 1982–2000 уменьшение значения параметра и увеличение амплитуды, в этот период наблюдается минимальное значение 0,18;

р. Березина – г. Бобруйск характерен наибольший пик в 1977 г. (0,8) и наименьшее значение наблюдалось в 1925 г. (0,1), размах колебаний составил в период 1881–1921 гг. от 0,36 до 0,7, в период 1929–1971 гг. – от 0,25 до 0,6;

Летне-осенний минимальный сток

Зимний минимальный сток

Западная Двина – г. Витебск

Неман – г. Гродно

Днепр – г. Речица

Припять – г. Мозырь

**Рисунок 4.2 – Распределение параметра хаотизации временных рядов
минимального расхода воды основных рек Беларуси**

Таблица 4.1 – Характеристики параметра хаотизации

Река – створ	Летне-осенний минимальный сток		Зимний минимальный сток	
	размах колебаний	амплитуда	размах колебаний	амплитуда
Западная Двина – г. Витебск	0,22–0,85	0,65	0,15–0,80	0,63
Западная Двина – г. Полоцк	0,18–0,84	0,68	0,14–0,82	0,66
Дисна – пгт Шарковщина	0,05–0,85	0,64	0,21–0,85	0,80
Неман – г. Гродно	0,20–0,90	0,72	0,17–0,89	0,70
Щара – г. Слоним	0,16–0,90	0,75	0,15–0,90	0,74
Вилия – с. Михалишки	0,17–0,94	0,61	0,16–0,77	0,77
Мухавец – г. Брест	0,17–0,82	0,80	0,12–0,92	0,65
Днепр – г. Орша	0,10–0,90	0,64	0,22–0,86	0,80
Днепр – г. Речица	0,22–0,87	0,68	0,16–0,84	0,65
Березина – г. Бобруйск	0,06–0,86	0,82	0,12–0,94	0,80
Сож – г. Гомель	0,18–0,83	0,77	0,15–0,92	0,65
Припять – г. Мозырь	0,20–0,80	0,79	0,08–0,87	0,60
Птичь – с. Лучицы	0,18–0,80	0,64	0,15–0,79	0,62

р. Птичь – с. Лучицы весь исследуемый период можно разделить на три временных отрезка 1882–1908, 1912–1954, 1970–1992 гг., на которых наблюдается тренд увеличения параметра хаотизации. В первый и третий период амплитуды колебаний небольшие, но по абсолютным значениям высокие 0,54–0,8; во второй период размах колебаний высокий (0,2–0,8); 1908–1912 резкий скачок вниз (0,78–0,1); 1955–1969 скачок вниз плавный (0,74–0,22);

р. Припять – г. Мозырь с начала наблюдений и до 1920 г. параметр снизился до 0,34; затем до 1970 г. происходит рост самого параметра от 0,4 до 0,75 и размаха колебаний. В последние 30 лет наблюдается снижение этого параметра.

Для зимнего минимального стока наибольшие амплитуды (0,82) наблюдаются на р. Березина – г. Бобруйск, наименьшие (0,61) – на р. Вилия – с. Михалишки;

р. Западная Двина на двух постах (г. Витебск и г. Полоцк) можно выделить три практически одинаковых по продолжительности (40 лет) периода: 1881–1922 гг., 1923–1962 гг., 1963–2000 гг. Первый и третий периоды характеризуются тенденцией к увеличению параметра хаотизации, однако в первый период наблюдаются большие значения параметра, а амплитуды больше в третий период. Для второго периода характерно снижение

параметра и в этот период регистрируются максимальные (0,80) и минимальные (0,15) значения;

р. Дисна – пгт Шарковщина на графике на протяжении всего периода, среднее значение параметра хаотизации составляет 0,5–0,55, а в распределении можно заметить небольшую тенденцию к увеличению; амплитуда колебаний изменялась следующим образом: 1881–1914 гг. – 0,47; 1915–1948 гг. – 0,25; 1949–2000 гг. – 0,62;

р. Неман – г. Гродно из графика видно снижение параметра хаотизации с 1881 по 1930 г. и увеличение размаха колебаний; второй период 1931–1971 гг. характеризуется чередованием максимумов (0,88 – 1960 г.) и минимумов (0,18 – 1971 г.); в третий период 1972–2000 гг. идет уменьшение значения параметра (0,84–0,28) и увеличение амплитуды колебаний (0,44);

р. Щара – г. Слоним с начала наблюдений до 1970 г. виден явный тренд к уменьшению параметра хаотизации и уменьшению амплитуды колебаний; с 1970 по 1990 гг. происходит стабилизация параметра и его среднее значение составляет 0,58–0,60; в середине 90-х гг. наблюдается резкое уменьшения значения параметра до 0,36 и видна тенденция к увеличению;

р. Вилия – с. Михалишки выделяется два периода с различной длительностью и различными характеристиками: 1881–1930 гг. уменьшение параметра хаотизации, амплитуда колебаний возрастает; 1931–2000 гг. параметр хаотизации увеличивается от 0,40 до 0,60; амплитуда колебаний возрастает и составляет 0,40;

р. Мухавец – г. Брест первый период (1881–1930 гг.) характеризуется большой амплитудой до 0,45 и тенденцией к уменьшению параметра хаотизации; с 1930 по 2000 гг. происходит увеличение значения параметра, среднее значение составляет 0,56–0,60; с начала 80-х гг. увеличивается амплитуда колебаний до 0,80;

р. Днепр – г. Орша на протяжении всего периода наблюдений идет снижение значения параметра хаотизации от 0,58 до 0,34; амплитуды колебаний с начала 40-х гг. увеличиваются;

р. Днепр – г. Речица из графика четко можно выделить два периода: 1881–1960 гг. и 1971–2000 гг. Первый период характеризуется увеличением значения параметра хаотизации (от 0,43 до 0,61), амплитуды колебаний составляют в среднем 0,25–0,30. В 1961–1968 гг. наблюдаются минимальные значения параметра (0,22), в 1970 г. резкий скачок вверх до максимальной величины 0,86, а затем постепенное уменьшение до 0,4;

р. Березина – г. Бобруйск из графика видно два периода: 1881–1970 гг. и 1971–2000 гг. наибольшая амплитуда 0,80 отмечена в начале периода наблюдений. Первый отрезок времени характеризуется уменьшением параметра хаотизации и амплитуды колебаний. Во втором периоде наблюдается обратная картина;

р. Сож – г. Гомель до начала 70-х гг. каких-либо закономерностей в распределении параметра хаотизации не выявлено идет простое чередование минимумов и максимумов. С 1971 по 2000 гг. значение параметра уменьшается от 0,60 до 0,4;

р. Припять – г. Мозырь и р. Птичь – с. Лучицы ярко выражена тенденция к увеличению значения параметра хаотизации и увеличение амплитуды колебаний.

Совместный анализ СВАН-диаграмм и временных распределений параметров хаотизации показал наличие циклов от 2-х до 33-х лет. В подавляющем большинстве доминирующими циклами являются 2–3, 4–6 и 11–13-летние; реже отмечаются 8, 14-летние циклы, а наиболее устойчивые из них 3, 4, 5 и 33-летние. Однако наблюдается изменение длительности циклов, особенно резкие изменения характерны для р. Припять. Спектрально-временной анализ позволил выделить устойчивые циклы, что дает возможность построения прогностических оценок.

4.2 Пространственная структура минимального стока рек Беларуси

4.2.1 Анализ однородности полей гидрологических величин минимального стока

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 раздельного 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 [122].

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. В силу того, что данные функции однозначно связаны между собой и равно пригодны для описания статистической структуры, в настоящей работе 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 (4.1):

$$M_i = M(x_i; y_i; h_i; t_i) \quad (4.1)$$

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 (4.2):

$$r(0; j) = f(x_0; y_0; h_0; t_0; x_j; y_j; h_j; t_j) \quad (4.2)$$

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 ее малой величины, можно пренебречь. Полученную пространственную корреляционную функцию (ПКФ) стационарного поля можно представить следующим образом (4.3):

$$r = f(x_0; y_0; X; Y; \tau) \quad (4.3)$$

Введя полярные координаты $\rho = \sqrt{X^2 + Y^2}$ и $\alpha = \text{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right)$, получим (4.4):

$$r = f(x_0; y_0; \rho; \alpha; \tau) \quad (4.4)$$

Для однородных стационарных полей ПКФ не зависит от координат полюса и не меняется при параллельных его перемещениях (4.5), т. е.

$$r = f(\rho; \alpha; \tau) \quad (4.5)$$

Для однородных изотропных полей ПКФ зависит только от расстояния между точками (4.6), т. е.

$$r = f(\rho; \tau) \quad (4.6)$$

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 τ и получив ПКФ как функцию $r = f(\rho)$, в поле координат (r, ρ) строится зависимость парных коэффициентов корреляции минимальных расходов воды от расстояний между центрами тяжести водосборов. Полученная линия регрессии $r = f(\rho)$ принимается за истинную зависимость, отвечающую природе пространственной корреляционной связности речного стока. Принималось, что отклонения эмпирических точек от линии регрессии обусловлены случайными флуктуациями выборочных данных. Проверка нуль-гипотезы H_0 об однородности ПКФ осуществлялась с помощью преобразования Фишера (4.7):

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r} + \frac{r}{2(n-1)}, \quad (4.7)$$

где r – парный коэффициент корреляции; n – количество 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 (4.8) [120]:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}. \quad (4.8)$$

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.

Нуль-гипотеза не опровергается и ПКФ считается однородной, если эмпирические и теоретические вероятности оказываются близкими. В противном случае, когда имеет место существенное расхождение с эмпирическими и теоретическими вероятностями, нулевая гипотеза опровергается и признается альтернативная гипотеза о неоднородности эмпирической ПКФ. В этом случае исходное поле стока уменьшается.

Оценку пространственного распределения минимального речного стока возможно производить с помощью однородных и изотропных полей. *Однородными являются поля с одинаковыми законами распределения вероятностей расходов воды речного стока в каждом пункте наблюдений (одинаковые параметры и типы распределения).* Если пространственная корреляционная функция поля зависит только от расстояния между рассматриваемыми пунктами и не зависит от направления между ними, такие поля речного стока считаются *изотропными*.

Поля речного стока, как правило, не удовлетворяют требованиям однородности и изотропности. Для устранения неоднородности нами использовались нормировки вида (4.9)

$$k_{ij} = \frac{Q_{ij}}{Q_j}, \quad (4.9)$$

где k – модульный коэффициент, Q – расход воды, i – индекс года, j – индекс пункта.

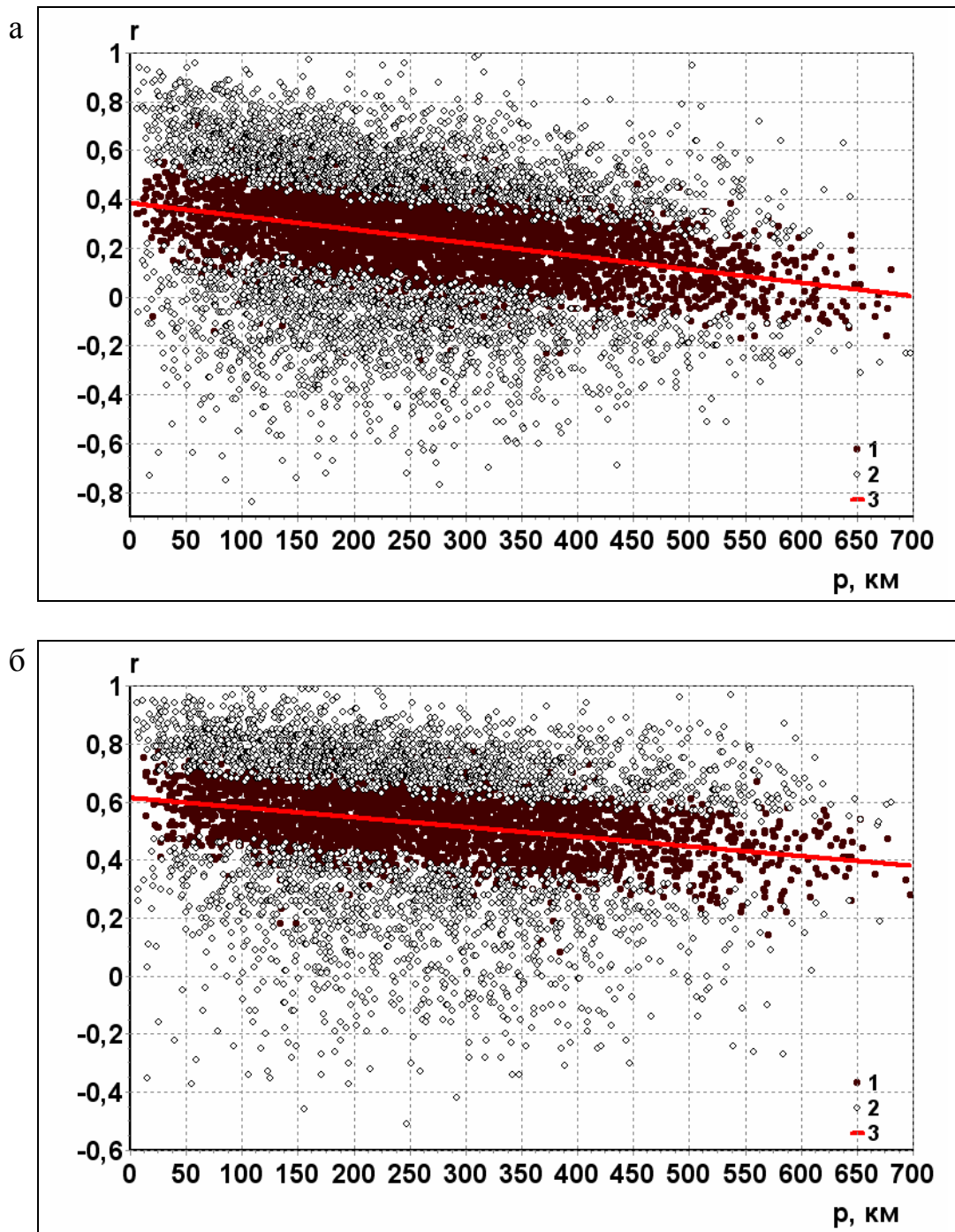


Рисунок 4.3 – Пространственно-корреляционная функция (ПКФ) минимального стока рек Беларуси

Более сложно обеспечить условие *изотропности поля*. Кроме равенства дисперсий рядов наблюдений следует доказать зависимость корреля-

ций только от расстояний. На территории Беларуси это условие проверялось путем сравнения пространственных корреляционных функций, построенных по данным наблюдений на гидрометрических постах, имеющих различное взаимное расположение.

Пространственно-корреляционная функция (ПКФ) построена по парным коэффициентам корреляции, полученным по 125 грациям наблюдений за летне-осенним и 113 грациям наблюдений за зимним минимальным стоком. Среднее число совместных лет наблюдений при расчете парных коэффициентов корреляции составляло не менее 20 лет. Оценка однородности ПКФ минимального стока рек Беларуси показала, что нуль-гипотеза не опровергается и рассматриваемая функция **однородна**, как это показано на рисунке 4.3.

4.2.2 Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний минимального стока

Изучение многолетней синхронности колебаний минимального стока проводилось с помощью пространственного корреляционного анализа (построение матрицы парных коэффициентов корреляции) с последующим выделением районов синхронных колебаний стока, разработанного на кафедре гидрологии суши МГУ. Вычисления и анализ включает несколько этапов [64]:

1. Вычисление матрицы парных корреляций (r_{ij}).
2. Выделение групп рек, имеющих скоррелированность не менее заданного уровня $r_{кр}$, с помощью алгоритма, условно названного «анализ-матрицы».

При районировании больших территорий в качестве показателя синхронности используется величина коэффициента корреляции 0,5, которая и принята в работе за $r_{кр}$. Более высокий уровень $r_{кр}$ определяет образование групп бассейнов, имеющих большую внутреннюю связность, но дискретных в пространстве; низкий уровень $r_{кр}$ характеризует менее связанные пересекающиеся (по элементам и в пространстве) группы.

В результате анализа корреляционной матрицы определяют группы рек, имеющих связность не ниже заданного уровня $r_{кр}$ при этом делается перебор всех без исключения вариантов объединения.

3. Образование ядер районов синхронного стока. Эти «ядра» являются непересекающимися между собой группами элементов, имеющими скоррелированность не ниже заданного уровня $r_{кр}$; при этом любой из элементов имеет максимальную связность с группой элементов, заключенной в ядро, а не с какой-либо другой группой. Таким требованиям полностью отвечают замкнутые группы, не пересекающиеся с другими.

4. Распределение оставшихся вне ядер элементов списка рек по районам синхронного стока, проводимое по принципу максимальной связности (скоррелированности) каждого конкретного элемента с ядром района. Для распределения единичных элементов по группам массив исходной информации упорядочивают сначала по группам, а в конце (как группы, состоящие из одного элемента) исследуют оставшиеся ряды. Указанные элементы включают в ту группу (район, ядро), с которой они имеют максимальную скоррелированность.

5. Проверка правильности отнесения рек к соответствующим районам при условии, что средний коэффициент корреляции данной реки со всеми реками района, в который она входит, должен быть выше, чем средний коэффициент корреляции со всеми реками любого другого района.

6. Вычисление среднего коэффициента корреляции между реками, входящими в один и тот же район (внутрирайонные коэффициенты корреляции, характеризующие внутрирайонную связь), а также между реками разных районов (межрайонная связность). По существу формирование матрицы скоррелированности по районам, в которой по главной диагонали находятся элементы, характеризующие внутрирайонную связность, а прочие элементы – средние коэффициенты корреляции между реками разных районов.

Рассматриваемый прием анализа корреляционной матрицы, предназначенный для изучения синхронности колебаний стока, приводит к строго контролируемым результатам, хотя остается сравнительно трудоемким. Расчет 26 тыс. коэффициентов корреляции между различными реками Беларуси дал возможность разделить территорию республики по характеру синхронности минимального стока в летне-осеннюю и зимнюю межень с учетом географических особенностей на несколько районов.

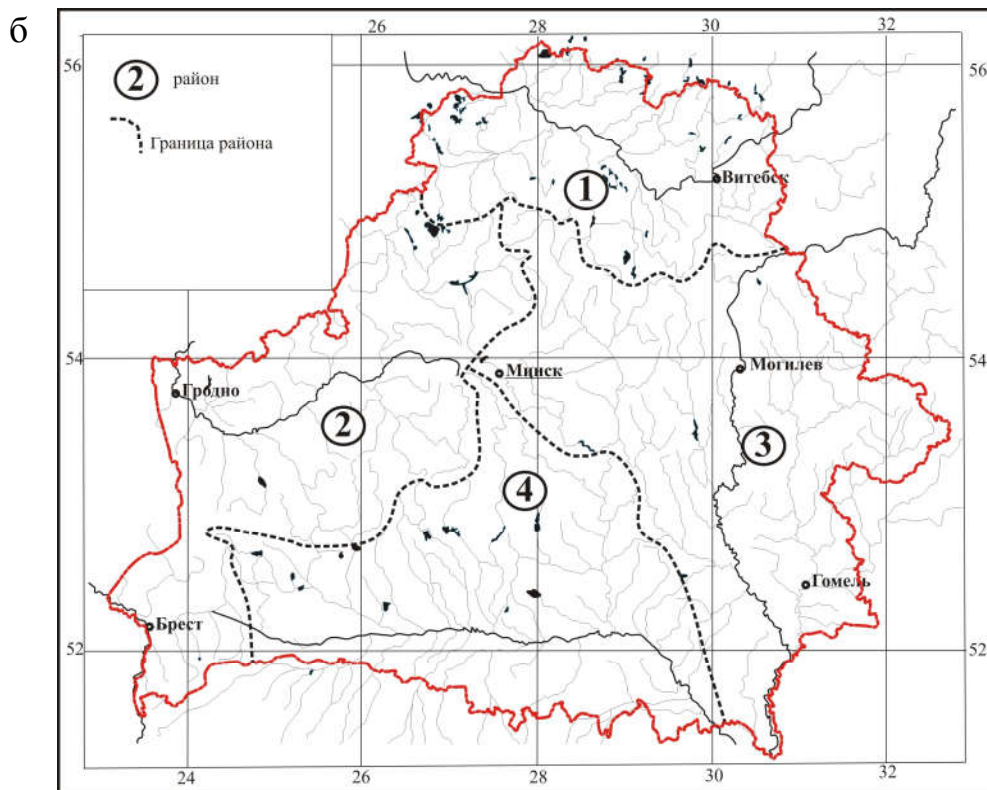
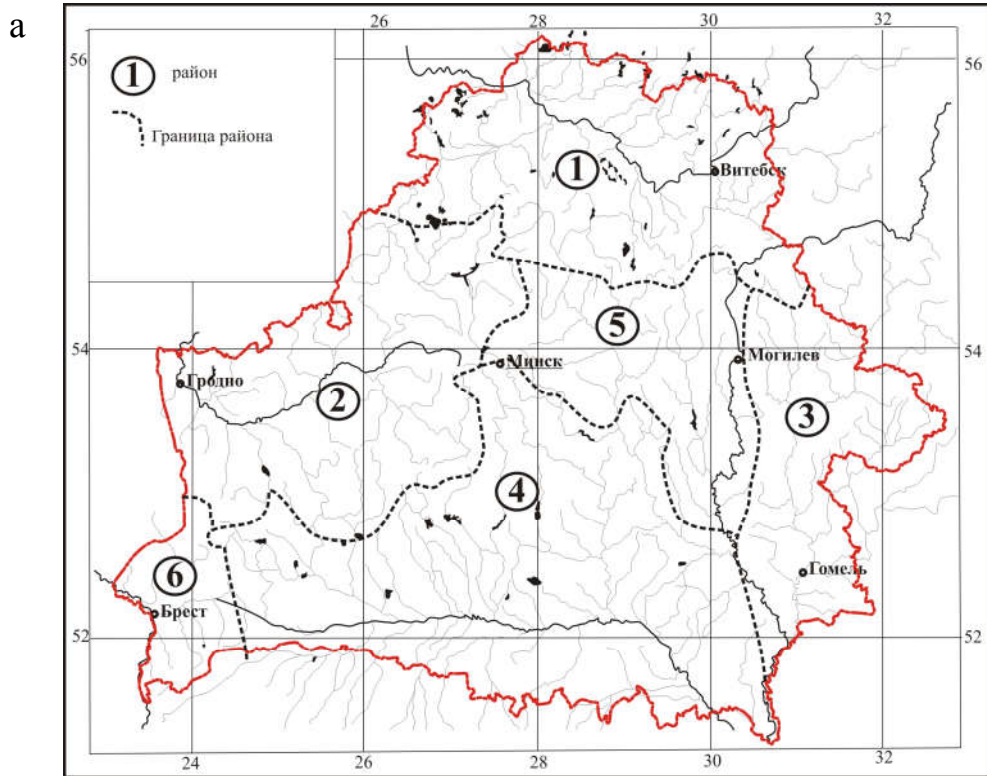
Существует два способа районирования: гидрологическое и статистическое. Различий между принятым гидрологическим районированием, основанным на физическом анализе процессов речного стока, и статистическим районированием не имеется. И тот, и другой способы должны отра-

жать одни и те же физические закономерности в распределении характеристик гидрологического режима, как во времени, так и в пространстве. В связи с этим можно лишь отметить, что районирование по статистическим признакам позволяет охарактеризовать рассматриваемые закономерности не только качественно, но и количественно оценить их внутри однородных в гидрологическом отношении районов.

Расчет 26 тыс. коэффициентов парной корреляции между средними многолетними значениями расходов воды за летне-осенний и зимний периоды позволил разделить территорию Беларуси по характеру синхронности колебаний стока и с учетом географических особенностей на ряд районов (рисунок 4.4) [53].

Границы районов несут в себе некоторую условность, которая связана с характером пространственных изменений в колебаниях стока. Следует иметь в виду, что возможна ситуация, когда многолетние колебания стока с двух водосборов, расположенных в разных районах, но близко друг от друга, будут отличаться большей синхронностью, чем сток с двух водосборов из одного района, но находящихся на разных его концах, далеко друг от друга. В то же время метеорологические условия отдельных лет в различных частях территории могут существенно отличаться, что в сочетании с подстилающей поверхностью создает сложную картину пространственной изменчивости многолетних колебаний и возможность выделения большого числа районов, отличающихся повышенной синхронностью колебаний стока. Следует отметить, что границы районов могут несколько изменяться от года к году, но для средних многолетних условий районы выделяются достаточно четко. Границы проводились с учетом границ водосборов главных рек.

Летне-осенний минимальный сток. Всего на исследуемой территории выделено 6 районов синхронных колебаний летне-осеннего минимального стока (рисунок 4.4 а). Представленные в таблице 4.3 внутрирайонные значения коэффициентов корреляции, изменяющиеся от 0,54 до 0,63, указывают на синхронность колебаний минимального стока на реках каждого из выделенных районов.



а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 4.4 – Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний минимального стока

Район 1 (*Двинский*), занимающий северную часть Беларуси, практически полностью совпадает с бассейном р. Западная Двина и имеет отчетливо выраженное географическое обособление от соседних районов: занимает Полоцкую низменность, с юга ограничен южными склонами Свенцянской гряды, северной оконечностью Минской возвышенности, северными склонами Оршанской и Смоленской возвышенностей. Этот район имеет синхронность в колебаниях с районами 2 и 6: межрайонные коэффициенты корреляции равны 0,38 (таблица 4.3), а район-антипод (межрайонный коэффициент корреляции -0,84) – 4.

Район 2 (*Неманский*) располагается на западе республики. Занимает Неманскую и Нарачано-Вилейскую низменности, южная граница проходит по южным склонам Волковысской, Новогрудской возвышенностей и Копыльской гряде, юго-западному склону Минской возвышенности. Район имеет максимальную синхронность с 3 районом: межрайонный коэффициент корреляции равен 0,38, а асинхронность с 4, 5 и 6 (таблица 4.3).

Район 3 (*левые притоки Днепра*), занимающий восточную часть Беларуси четко выраженных географических границ не имеет. Он занимает Оршанско-Могилескую равнину и часть Приднепровской низменности. Внутрирайонный коэффициент корреляции равен 0,54 (таблица 4.2).

Район 4 (*Припятский*) распространяется на юге Беларуси и занимает Полесскую и Приднепровскую низменности, Центральнорезинскую равнину. Внутрирайонный коэффициент корреляции принимает значение 0,55, а межрайонные коэффициенты изменяются от -0,84 (*Двинский*) до 0,38 (левые притоки р. Днепр).

Район 5 (*правые притоки Днепра*) расположен в центральной части республики, также как и район 3 четких границ не имеет. Внутрирайонный коэффициент корреляции равен 0,59 (таблица 4.2).

Район 6 (*Бугский*) самый малый по площади и занимает крайний юго-запад республики. Располагается на территории Брестского Полесья и Прибугской равнине. Внутрирайонный коэффициент корреляции достигает 0,60.

Таблица 4.2 – Средние внутрирайонные коэффициенты корреляции летне-осенних и зимних минимальных расходов воды

Минимальный сток	Район 1	Район 2	Район 3	Район 4	Район 5	Район 6
Летне-осенний сток	0,63	0,58	0,54	0,55	0,59	0,60
Зимний сток	0,84	0,59	0,67	0,83		

Таблица 4.3 – Межрайонные коэффициенты корреляции летне-осеннего минимального стока

Район	Район 1	Район 2	Район 3	Район 4	Район 5	Район 6
Район 1	1,00	0,38	-0,46	-0,84	-0,46	0,38
Район 2		1,00	0,38	-0,46	-0,84	-0,46
Район 3			1,00	0,38	-0,46	-0,84
Район 4				1,00	0,38	-0,46
Район 5					1,00	0,38
Район 6						1,00

Четко выделились границы 1, 2, 4, 6 районов (рр. Западная Двина, Неман, Припять, Западный Буг), сложнее было выделить границы 3 и 5 районов (р. Днепр – большая река и протекает в субмеридиональном направлении, в пределах ее бассейна происходит многократное изменение физико-географических условий). Хорошо согласуется с границами районов глубина залегания грунтовых вод, и изолинии в 180 м могут служить приблизительными границами районов.

Зимний минимальный сток. На территории Беларуси по синхронности колебаний зимнего минимального стока было выделено 4 района. Средние внутрирайонные коэффициенты корреляции выше, чем для летне-осеннего стока и составляют 0,59–0,84. Меньшее количество районов и высокие коэффициенты корреляции указывают на более однородные условия формирования зимнего минимального стока. Межрайонные коэффициенты корреляции представлены в таблице 4.4.

Район 1 (*Двинский*), занимающий северную часть Беларуси, полностью совпадает с районом 1 летне-осеннего минимального стока. Район практически совпадает с геоморфологической областью Белорусского Поозерья. Внутрирайонный коэффициент корреляции самый высокий и составляет 0,84 (таблица 4.2).

Район 2 (*Неманско-Бугский*) располагается на западе республики, охватывает бассейны рр. Виляя, Неман, Западный Буг. Внутрирайонный коэффициент корреляции самый низкий и равен 0,59 (таблица 4.2). Максимальные корреляционные связи имеет с районом 4 ($r = 0,33$).

Район 3 (*Днепровский*), занимающий восточную часть Беларуси (бассейн р. Днепр) имеет довольно высокий внутрирайонный коэффициент корреляции, который равен 0,67 (таблица 4.2). Эта территория характеризуется синхронными колебаниями минимального стока с районом 1.

Район 4 (*Припятский*) распространяется на юге Беларуси, внутрирайонный коэффициент корреляции равен 0,55 (таблица 4.2). Между этим районом и 1, 2 существует асинхронность в колебаниях минимального стока.

Таблица 4.4 – Межрайонные коэффициенты корреляции зимнего минимального стока

Район	Район 1	Район 2	Район 3	Район 4
Район 1	1,00	-0,66	0,33	-0,66
Район 2		1,00	-0,66	0,33
Район 3			1,00	-0,66
Район 4				1,00

Значения внутрирайонных коэффициентов корреляции выше, чем межрайонные. Анализ межрайонных коэффициентов показал, что между районами существует как синхронность, так и асинхронность в колебаниях минимального стока рек Беларуси.

4.2.3 Выделение гидрологически однородных районов минимального стока

Расчет спектральной плотности проводится по формуле (4.10):

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^m \lambda(\tau) r(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau \quad (4.10)$$

где $\omega = 2\pi T$ – круговая частота;

T – период;

$r(\tau)$ – автокорреляционная функция;

m – максимальный сдвиг при оценке ординат автокорреляционной функции ($m = \tau_{max}$);

$\lambda(\tau)$ – корреляционное окно (сглаживающее окно).

В качестве $\lambda(\tau)$ использовалось корреляционное окно Наттола (4.11):

$$\lambda(\tau) = \sum_0^3 a_k \cos[(\pi\tau k) / m] \quad (4.11)$$

где a_k – весовые коэффициенты.

Функция Наттола была выбрана в связи с тем, что она дает сглаженный спектр и снижает до минимума уровень второстепенных шумов. Таким образом, упрощается задача по выделению типового районного спектра.

При анализе формы спектра учитывались значимые пики на периодах, составляющих не более 1/3 от длины рядов. Уровень значимости назначался исходя из нулевой гипотезы H_0 : гидрологический ряд представляет собой «белый шум». В соответствии с [71] в этом случае доверительный интервал выборочного спектра будет определяться выражением (4.12):

$$\frac{\chi_{1-\alpha}^2}{\nu 2\pi} \leq S \leq \frac{\chi_{\alpha}^2}{\nu 2\pi} \quad (4.12)$$

где α – уровень значимости ($\alpha = 5\%$);

χ – ордината распределения хи-квадрат Пирсона;

ν – число степеней свободы.

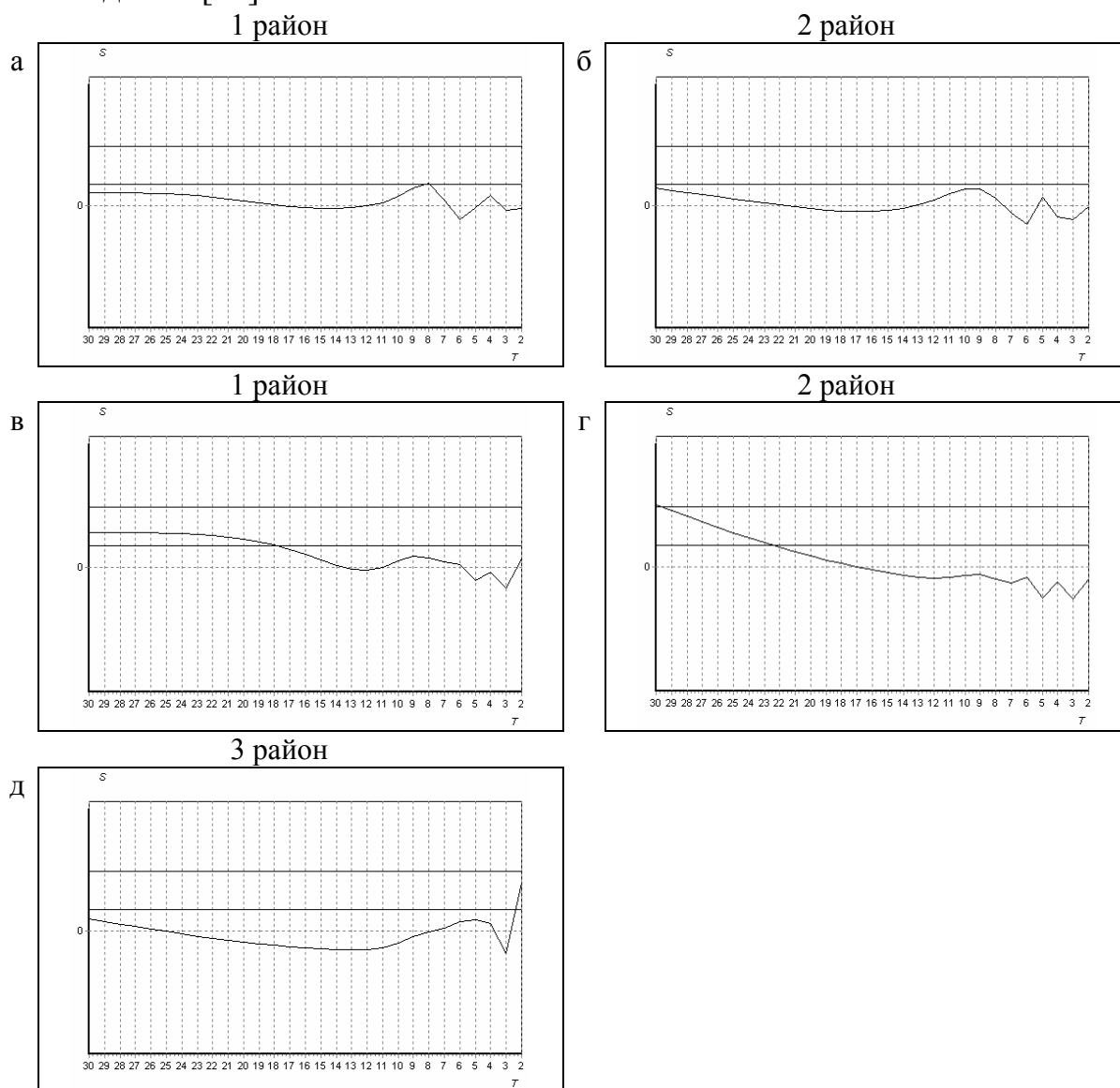
Число степеней свободы для окна Наттола длине ряда n определяется по формуле (4.13):

$$\nu = \frac{2n}{\alpha_0 m} = \frac{5,5n}{m} \quad (4.13)$$

С помощью вышеизложенной методики, разработанной на кафедре гидрологии суши РГГМУ [62], произведено выделение гидрологически однородных районов минимального стока.

Для выделения гидрологически однородных районов минимального стока были отобраны наиболее длинные (40–120 лет) гидрологические ряды 46 летне-осеннего и 47 зимнего минимального стока и построены графики-спектры (рисунок 4.5). Районы выделялись на основе сходства очертаний выборочных спектров, что позволило территорию Беларуси разбить на ряд гидрологически однородных районов (рисунок 4.6). При проведении границ районов учитывалось положение водоразделов, гидрографические особенности речных систем и др. В некоторых случаях проведение границ районов вызывало сложности, поэтому для уточнения границ были дополнительно построены и проанализированы спектры еще по 111 створам лет-

не-осеннего и 123 зимнего минимального стока с более короткими рядами наблюдений [50].



а, б – летне-осенний; в, г, д – зимний минимальный сток

Рисунок 4.5 – Типовые спектры минимального стока рек Беларуси

На всех графиках-спектрах независимо от продолжительности временного ряда, четко выделяются основные циклы. Резкие, т.е. имеющие максимальную высоту, пики функции анализировались и были приняты как значимые. На некоторых графиках отмечалось несколько всплесков близких по величине, что затрудняло выделение более значимого, поэтому отмечались оба пика. Анализ построенных спектров дал возможность выделить в *летне-осеннюю межень* 2 района, в *зимнюю* – 3 района. Первый район летне-осенней межени характеризуется наличием значимого пика на 4 и

8 году, а второй – на 5 году (рисунок 4.5). Для первого района зимней межени отмечены значимые гармоники на 2 и 4 году, для второго – на 4 и 6 году, для третьего – значимый пик наблюдается на 2 году (рисунок 4.5). Наиболее яркими и устойчивыми являются циклы продолжительностью 2, 4–6 и 8 лет.

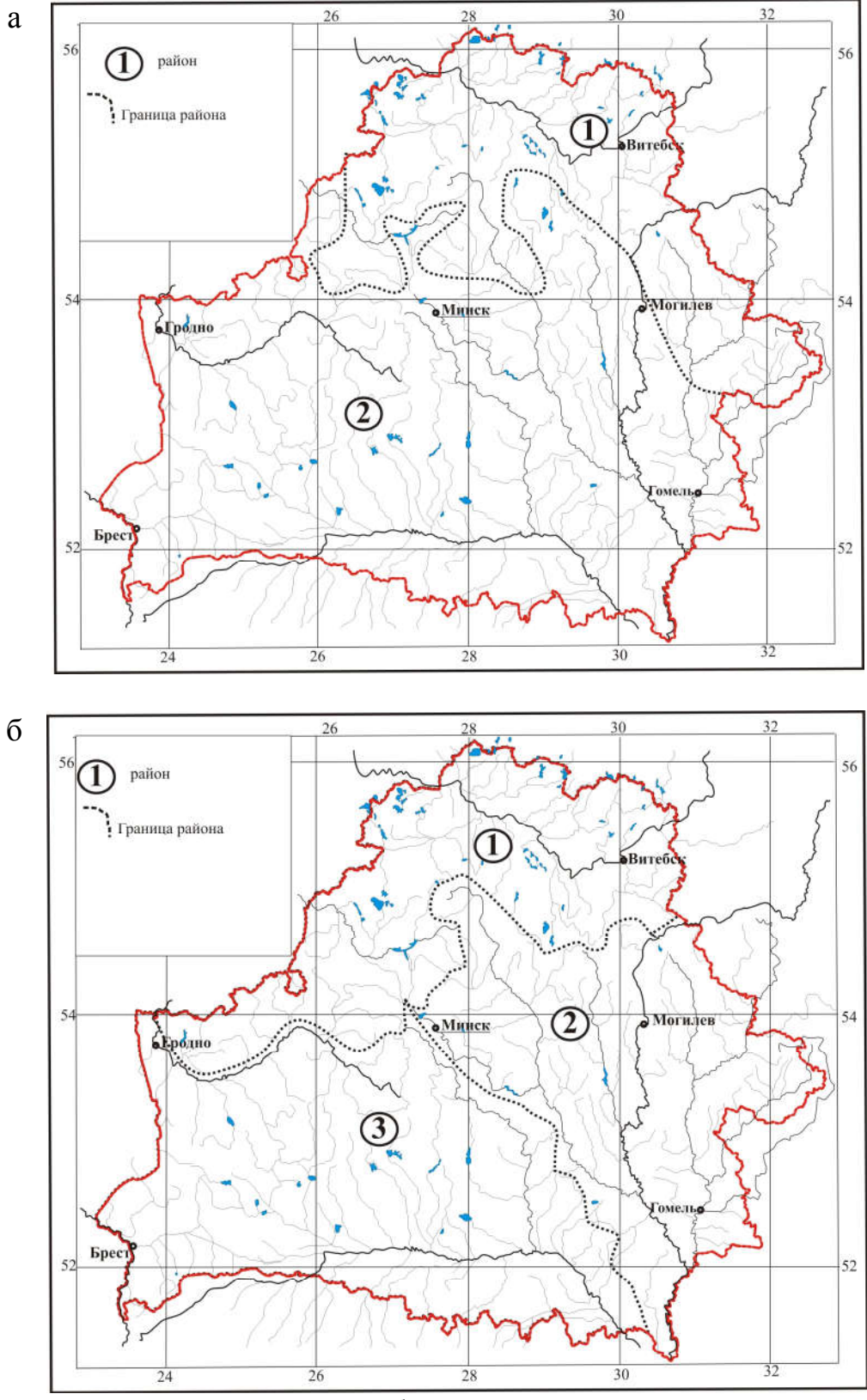
В результате исследования проведена оценка основных статистических характеристик (модуля летне-осеннего и зимнего минимального стока ($q_{\min}^{л-о(з)}$, л/(с км²)), коэффициента вариации (Cv), коэффициента автокорреляции (r)) каждого из районов (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Основные статистические характеристики временных рядов гидрологически однородных районов минимального стока

Район	q , л/(с км ²)	Cv	Cs/Cv	$r(l)$
Летне-осенний минимальный сток				
Район 1	1,80	0,45	3,44	0,09
Район 2	1,16	0,58	2,16	0,28
Зимний минимальный сток				
Район 1	2,39	0,53	2,75	0,14
Район 2	1,66	0,44	2,35	0,13
Район 3	1,64	0,68	3,29	0,68

Из таблицы 4.5 видно, что модуль стока уменьшается с севера на юг как для летне-осенней, так и зимней межени, что связано с уменьшением общей увлажненности территории. Коэффициент вариации имеет тенденцию к увеличению с северо-запада на юго-восток. Большой диапазон варьирования имеет коэффициент автокорреляции в зимнюю межень.

Проведенные районирования были сопоставлены с гидрологическим и физико-географическим районированием Беларуси. Выделенные районы с синхронными колебаниями минимального стока хорошо согласуются с физико-географическими провинциями: район 1 соответствует Белорусскому Позерью, 2 – Белорусской гряде, 3 – Приднепровью (Восточно-Белорусская провинция), 4 и 6 – Полесью, а 5 – Предполесью. Выделенные гидрологически однородные районы минимального стока на территории Беларуси неплохо согласуются с гидрологическим районированием. Первый район для летне-осеннего минимального стока включает в себя три гидрологических района (Западно-Двинский,



а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 4.6 – Районирование территории Беларуси по цикличности колебаний минимального стока рек

Вилейский и Верхнеднепровский), а второй практически совпадает с тремя более южными гидрологическими районами – Неманским, Центральнорезинским, Припятским. Иная картина наблюдается при выделении районов для зимнего минимального стока. Первый район полностью охватывает Западно-Двинский, северную часть Верхнеднепровского и Неманского, западную часть Вилейского гидрологических районов; второй – основную часть Верхнеднепровского, восточную часть Вилейского, Центральнорезинского и Припятского гидрологических районов; третий – основную часть Неманского и Припятского районов.

4.3 Изменения минимального стока рек Беларуси

Влияние хозяйственной деятельности на речной сток, его оценка и учет при хозяйственном использовании природных вод занимал и занимает умы ученых и практиков. Начало комплексному воднобалансовому исследованию, на основании которого выявлена роль почвенного и растительного покрова речных водосборов в изменении водоносности рек было положено В.В. Докучаевым, А.И. Воейковым, А.А. Измаильским и П.А. Костычевым еще в конце XIX века. К настоящему времени накоплен большой материал с результатами этих исследований.

Основой всех методов оценки влияния хозяйственной деятельности на речной сток является сравнение стока, преобразованного хозяйственной деятельностью, со стоком естественным, обусловленным комплексом стокоформирующих факторов. В исследованиях данного направления применяются обычно три группы методов [27, 92]:

- 1) исследования многолетних колебаний стока;
- 2) исследования изменений составляющих водного и теплового балансов;
- 3) методы активного эксперимента.

В связи с тем, что в настоящей работе используются методы первой группы, на них остановимся более подробно. *Первая группа методов* в исследовании влияния хозяйственной деятельности на сток дает положительные результаты при условии, что все физико-географические факторы, в сравниваемые периоды одинаковы. Поэтому при их применении обязательно приведение стока сравниваемых периодов к однородным условиям.

Методы первой группы можно разделить на **три подгруппы**.

К первой относятся методы, основанные на *анализе многолетних колебаний годового стока за периоды с различной степенью хозяйственного освоения речных бассейнов*, при этом сопоставляются коэффициенты стока за указанные периоды.

Ко второй подгруппе принадлежат методы, основанные на *анализе многолетних колебаний стока за те же периоды с применением множественной корреляции, статистической проверки однородности гидрологических рядов* с помощью непараметрических критериев Ван дер Вардена и Вилькоксона, построения нормированных разностных интегральных кривых стока и т.п. При этом фактический сток сопоставляется с вычисленным по уравнению регрессии климатическим (зональным). К этой же подгруппе следует отнести методы множественной линейной корреляции стока с факторами, обуславливающими его изменение. Большое распространение для оценки влияния хозяйственной деятельности получили различного рода *способы восстановления* естественных гидрологических характеристик исследуемой реки *по рекам-аналогам*, имеющим ненарушенный режим [15–18, 57, 75, 140].

К третьей подгруппе можно отнести методы, основанные на *анализе характера взаимосвязи сезонного стока (весеннего и межлетнего) за периоды с различной степенью хозяйственного освоения земель на водосборах*.

В связи с этим следует отметить *недостатки* первой группы методов и необходимые условия их применения. К ним можно отнести следующие:

- необходимость длительных рядов наблюдений, за стоком и факторами, его обуславливающими. Ряды должны включать периоды с различным уровнем хозяйственного освоения;
- затруднен учет динамики сельскохозяйственного освоения земель, различий в почво-грунтах на вновь освоенных землях, в уровне агротехнических приемов земледелия, в характере водообеспечения и водоотведения, типе регулирования водного режима почвы и пр.;
- невозможность оценки влияния хозяйственной деятельности на сток малых водосборов, как из-за отсутствия продолжительных рядов наблюдений, так и в связи с недостаточным для регрессионного анализа количеством пунктов наблюдений за стоком;
- ограниченность применения регрессионного анализа для районов с большой вариацией стока ($C_v > 1,0$). Это приводит к значительному преувеличению или преуменьшению оценки влияния того или иного фактора.

Несмотря на многочисленные минусы, эти методы наиболее употребимы, но они могут быть использованы только для приближенной оценки этого влияния.

Минимальные расходы воды в летне-осеннюю и зимнюю межень распределялись по трем классам водности:

- годы с маловодьями (s_1) ($p > 66\%$);
- годы со средней водностью (s_2) ($33 \leq p \leq 66\%$);
- годы с многоводьями (s_3) ($p < 33\%$).

Затем анализировались ряды стока, представляющие собой последовательность маловодных, средневодных и многоводных лет, и подсчитывалось количество в многолетнем ряду соответствующих классов водности (т.е. определялась их абсолютная частота) в период 1881–2000 гг.

Рассматриваемый отрезок времени охватывает три различных по уровню хозяйственной деятельности периода (1881–1930, 1931–1964, 1965–1999):

• **первый период** характеризуется довольно примитивной системой земледелия и экстенсивным ведением сельского хозяйства;

• **второй** отличается применением более высокой агротехники и интенсификацией сельскохозяйственного производства;

• **третий** характеризуется началом крупномасштабной мелиорации на Полесье, строительством крупных гидротехнических сооружений (Вилейская водная система, водохранилища Селец, Любанское, Солигорское).

Необходимо иметь также в виду, что водосборы основных рек Беларуси относятся к районам, где степень использования пахотных земель значительно возросла в послевоенные годы [36].

Исследование частот лет *летне-осеннего* минимального стока различной водности каждого из периодов позволяет констатировать:

• в первом периоде (1881–1930 гг.) в бассейнах рр. Неман и Днепр заметно преобладали годы с пониженной водностью, в бассейнах рр. Припять и Западная Двина годы со средней водностью;

• во втором периоде (1931–1964 гг.) в бассейне р. Припять увеличилось число лет с пониженной водностью, в бассейне р. Западная Двина увеличилось число лет с повышенной водностью, а в бассейнах рр. Неман и Днепр увеличилось число лет с пониженной и средней водностью;

• в третьем периоде (1965–1999 гг.) в бассейнах всех исследуемых рек преобладают годы с повышенной водностью.

Для *зимнего* минимального стока характерно:

- в первый период в бассейне рр. Неман и Западный Буг преобладают годы со средней водностью, в бассейне р. Западная Двина годы средней водности составляют 55%, а в бассейнах рр. Днепр и Припять большинство составляют маловодные годы 74% и 83% соответственно;
- второй период в различных бассейнах характеризуется по-разному: в бассейне р. Неман на 49% рек преобладают годы с повышенной водностью, в бассейнах рр. Припять, Западная Двина и Днепр преобладают годы со средней водностью, а в бассейне р. Западный Буг – годы с пониженной водностью;
- для третьего периода характерна повышенная водность для всех рек Беларуси в бассейнах р. Днепр – 98%, рр. Неман и Припять – 85%, рр. Западная Двина и Западный Буг – 69%.

Тенденция увеличения минимального стока характерна как для летне-осенней межени, так и для зимней. Следовательно, в анализируемых рядах стока имеет место положительный тренд.

Поскольку тренды используются для оценки тенденции будущих значений ряда, исключение тренда – одна из основных задач анализа нерегулярных колебаний. В данной работе, тренд выделяется по методу наименьших квадратов способом скользящей средней и 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 изменения стока.

Прием экстраполяции динамики рядов или их тренда следующий:

1) проводится обобщающая линия, отражающая тенденцию ряда на основе визуального впечатления о расположении фактических точек;

2) определяется постоянство и рассчитывается средний абсолютный прирост за последние годы – $\Delta = (y_n - y_1)/(n - 1)$. Далее, 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;

3) устанавливаются соотношения изменений показателей динамики сравниваемых рядов на основе корреляции между ними.

Исследование временных рядов многолетних колебаний летне-осеннего и зимнего минимальных расходов воды показывает наличие по-

ложительных (77% исследуемых рек) и отрицательных (23%) трендов (рисунк 4.7). Из Приложения В следует, что для большинства исследуемых рек отмечается стабильная тенденция увеличения летне-осенних (73% исследуемых рек) и зимних (80%) минимальных расходов воды, причем на большей части рек градиент изменения стока в зимний период больше, чем в летне-осенний. На 12% исследуемых рек минимальные расходы воды уменьшаются и в летне-осенний и в зимний период, это в основном реки Белорусской гряды. Градиент изменения стока наибольшие значения принимает на рр. Днепр, Припять, Сож [39, 51].

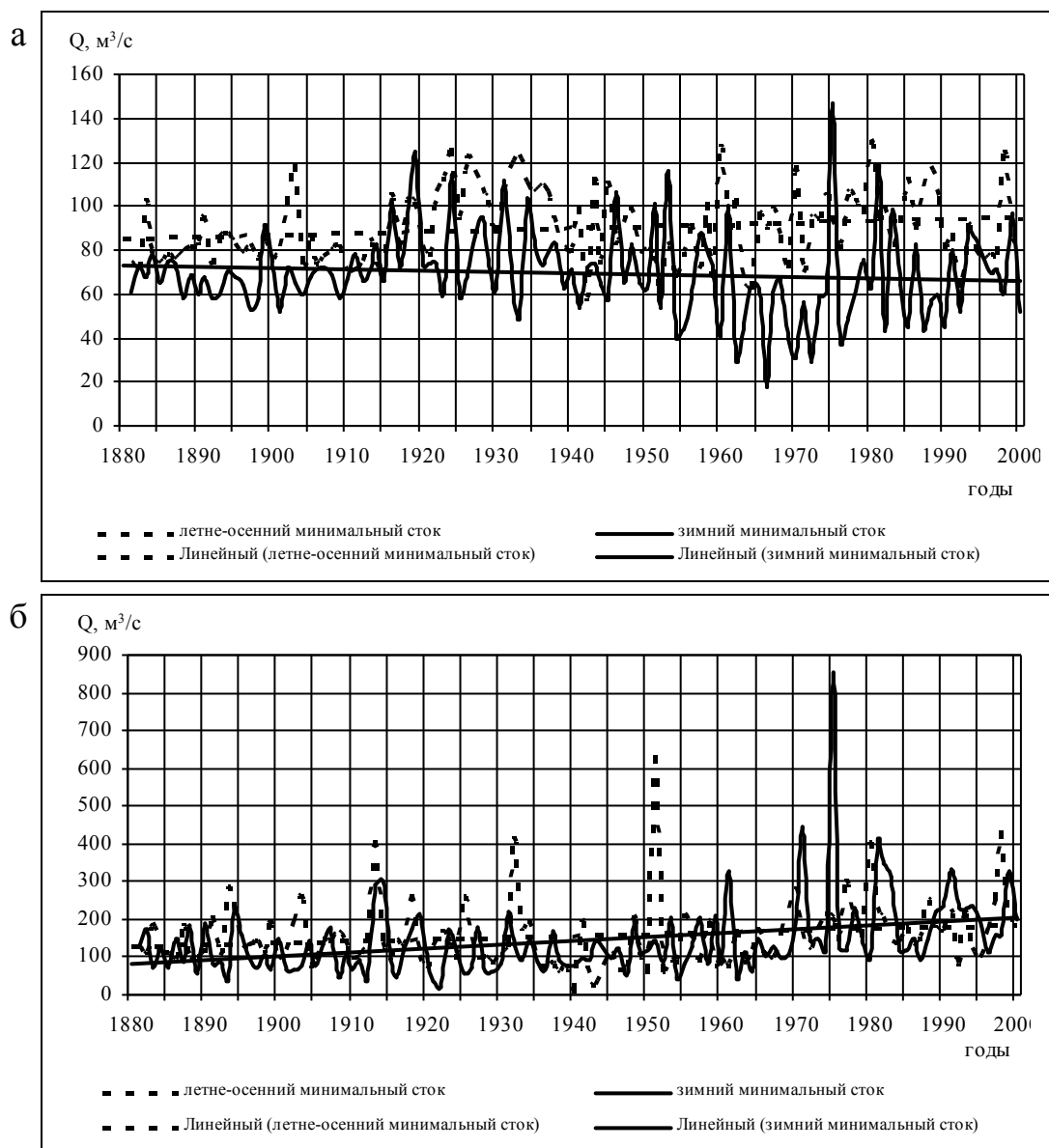
Так как во временных рядах существует устойчивый тренд, его можно использовать для прогноза. Тренд отражает динамику с очень большим моментом инерции, и изменения, определяемые такой динамикой, не могут моментально изменить свое направление.

Результаты расчетов коэффициентов изменения минимального стока рек (k_i) позволяют сделать следующие выводы [39]:

- на большинстве исследуемых рек (до 80%) и летне-осенний, и зимний минимальный сток увеличился;
- на 5% и летне-осенний, и зимний минимальный сток уменьшился;
- на 5% летне-осенний увеличился, а зимний уменьшился;
- на 10% летне-осенний уменьшился, а зимний минимальный сток увеличился.

Летне-осенний минимальный сток увеличился на 85% исследуемых рек, из них на 49% рек – значимо ($k_i \geq 0,27$). На 18% изучаемых объектов (рр. Ясельда, Оресса, Словечна, Чертень, Вить, Мухавец, Жабинка, Копаяювка) сток увеличился более чем в 2 раза. Уменьшился летне-осенний минимальный сток на 15% исследуемых рек, из них только на двух значимо, это р. Случь (г. Старобин) и р. Виляя (г. Вилейка), что связано со строительством на этих реках водохранилищ. На р. Случь в 1967 г. построено Солигорское водохранилище для обеспечения водой предприятий «Беларуськалий» и питания рыбоводного хозяйства «Старобин». На р. Виляя в 1976 г. введена в эксплуатацию Вилейско-Минская водная система, которая предусматривает переброску воды из р. Виляя в р. Свислочь.

Зимний минимальный сток увеличился на 90% исследуемых рек, из них на 53% рек увеличился значимо ($k_i \geq 0,27$), на 20% более чем в 2 раза (Молчадь, Ясельда, Оресса, Лань, Цна, Словечна, Чертень, Вить, Мухавец, Жабинка, Копаяювка). Зимний минимальный сток уменьшился на 10% рек, в большинстве своем это реки бассейна р. Неман [90].



а – Неман – г. Гродно; б – Припять – г. Мозырь

Рисунок 4.7 – Динамика многолетних минимальных расходов воды рек Беларуси

Анализ пространственной структуры коэффициентов изменения (k_i) минимального стока рек показал (рисунок 4.8):

- наибольшие изменения произошли на Полесье (в бассейне рр. Припять, Западный Буг, Днепр), где антропогенные воздействия были наиболее существенными (изменение площади водосборов, перераспределение стока, зарегулированность и др.);
- в бассейнах рр. Припять и Западный Буг сток увеличился почти в 2 раза;

• в бассейне р. Неман зимний минимальный сток уменьшился, либо остался прежним.

Увеличение летне-осеннего минимального стока может быть связано с осушительными мелиорациями, в результате которых были *сброшены*, частично, *вековые запасы грунтовых вод* верхнего горизонта. Кроме того, произошло *увеличение проводящей сети*. Ранее влага накапливалась в торфяных болотах и расходовалась на испарение, после устройства осушительных каналов уменьшились пути фильтрации, вода быстрее попадает в систему мелиоративных каналов. Осушение и освоение болот способствовало перераспределению объемов стока, а также уменьшению поверхностного стока и *увеличению подземного стока*. Поверхностный сток уменьшается за счет большой аккумулирующей емкости зоны аэрации освоения болот, а подземный сток увеличивается за счет более интенсивного дренирования вод осушительными системами [15–18, 58, 61, 85, 137]. Увеличение зимнего минимального стока обусловлено в большей степени климатическими факторами. Выявленные изменения зимнего минимального стока могут быть вызваны общей тенденцией потепления климата и в частности увеличением количества оттепелей в зимний период. Регулярно наблюдаемые в природе периоды временного снижения и повышения водности рек связаны с изменением климатических элементов (осадки, температура воздуха), вызываемых причинами планетарного (общая циркуляция атмосферы) характера [72, 82, 132, 139].

Для оценки в изменениях дат наступления наименьших расходов воды в период открытого русла и зимний сезон рассматривались два временных отрезка. При выборе расчетных периодов учитывались природно-климатические и антропогенные факторы, а также время их воздействия. В частности, массовые крупномасштабные мелиорации, начало которых приходится на середину 60-х годов прошлого столетия и заметное потепление климата, начало которого приурочено к середине 80-х годов. Кроме того, изменениям стока и времени его наступления присуща определенная инерционность и проявляются они спустя некоторое время. Поэтому не существует ярко выраженных границ начала или окончания тех или иных воздействий. Исходя из этих предположений, логично искать окончание первого и начало второго расчетных периодов в этом диапазоне между этими воздействиями. Поэтому было принято два периода: с начала инст

рументальных наблюдений до 1980 г. и с 1981 по 2004 гг. Изменения дат начала наименьшего расхода воды на реках Беларуси за рассматриваемые периоды представлены в виде карт (рисунок 4.9) [34].

Формирование минимального стока носит сложный и не однозначный характер, особенно в современных условиях, когда антропогенные воздействия, в ряде случаев, сопоставимы с природными факторами. При обобщении данных о сроках наступления наименьшего расхода наблюдается большое разнообразие, как в пространственном, так и во временном отношении. Причем большие изменения коснулись летне-осеннего сезона. Во всех бассейнах рек имеет место наступление как ранних, так и поздних дат наименьшего расхода воды. Количественная характеристика этих смещений приведена в таблице 4.6.

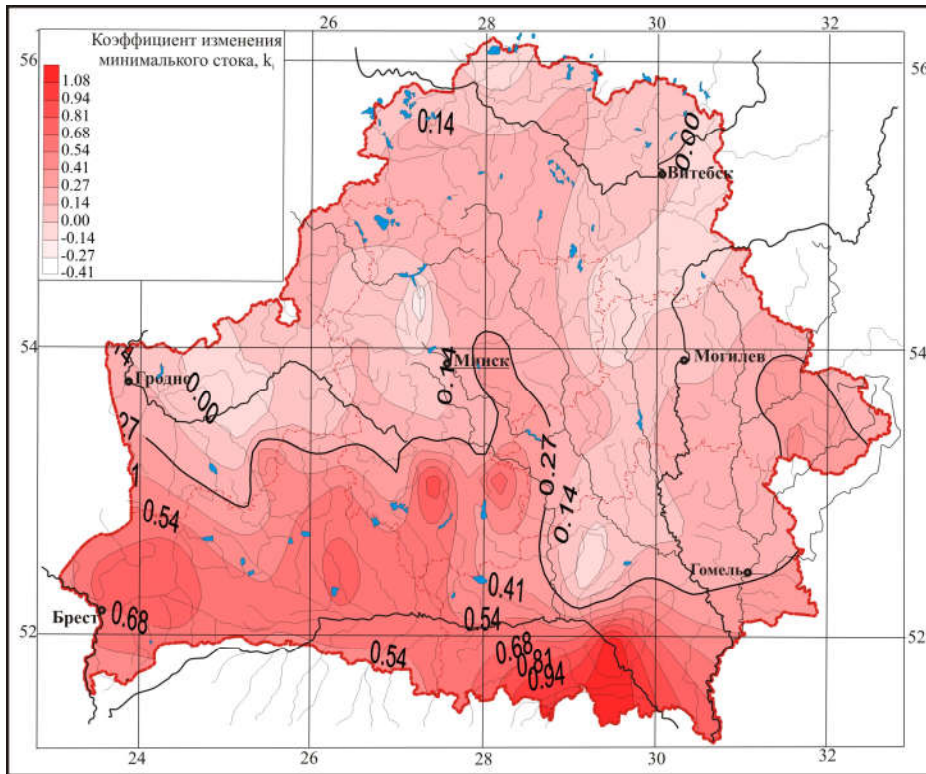
Таблица 4.6 – Средние значения смещения дат начала наименьшего расхода воды, дней

Бассейн реки	Летне-осенний период		Зимний период	
	ранние сроки	поздние сроки	ранние сроки	поздние сроки
Западная Двина	2	-12	3	-9
Неман	9	-16	4	-6
Западный Буг	2	-12	16	-6
Днепр	6	-12	4	-9
Припять	8	-12	4	-8

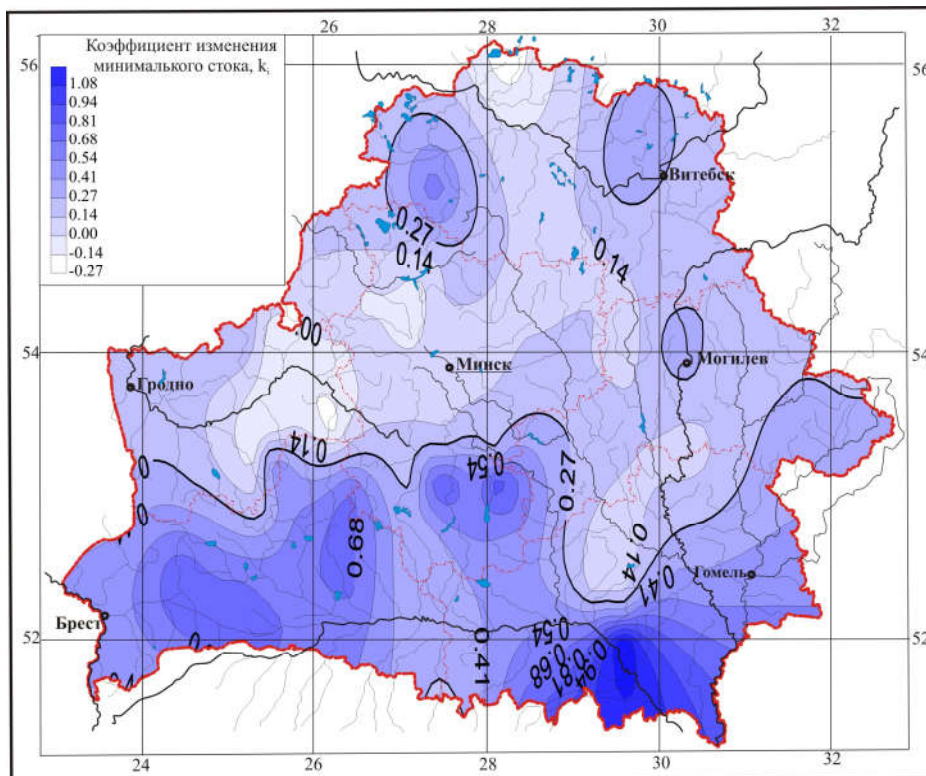
Для *летне-осеннего* сезона, наибольшие смещения дат начала наименьшего расхода наблюдаются на малых и средних реках, на крупных реках изменения менее существенны и колеблются в ту или другую сторону от 5 до 10 суток. В географическом плане также наблюдается большое различие во времени наступления дат начала наименьшего расхода воды.

Наиболее поздние сроки наблюдаются в бассейнах рр. Неман и Днепр. В целом по территории Беларуси, на большинстве рассматриваемых рек (58%) наступление дат начала наименьшего расхода сместилось на более поздние сроки, в среднем на 13 дней. При этом имеет место достаточно большой диапазон варьирования от 3 до 30 суток. Примерно на третьей части исследуемых рек эти смещения менее существенные, но имеют противоположную тенденцию. Период наименьших расходов воды наступает на 7 суток раньше по сравнению с периодом до 1980 г. Размах колебаний также достаточно велик и составляет от 1 до 20 суток.

а



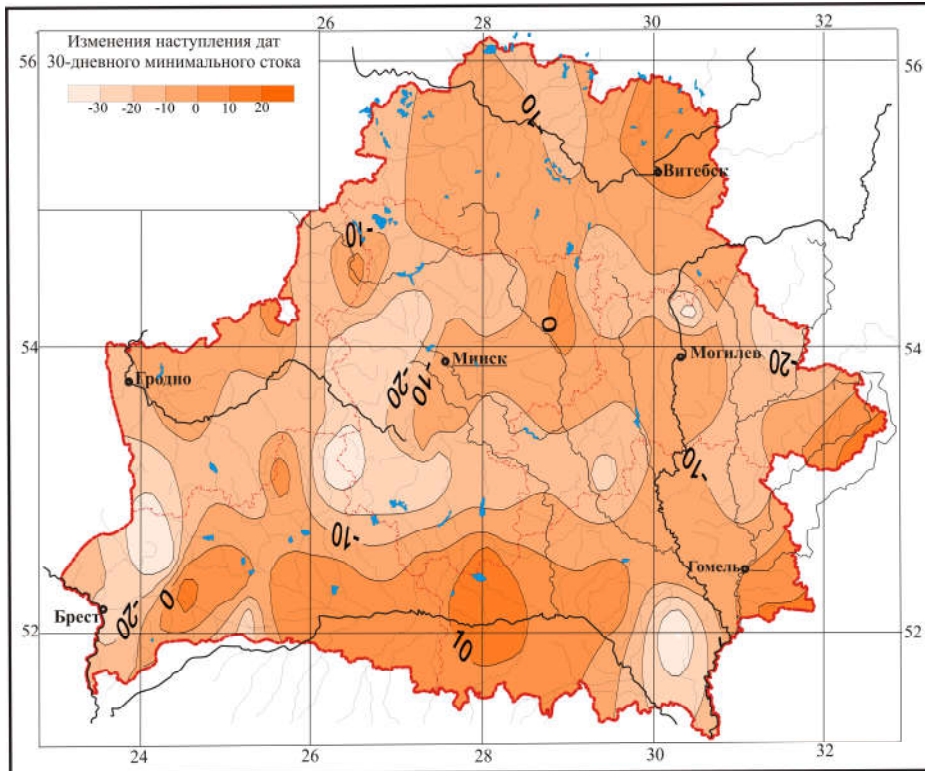
б



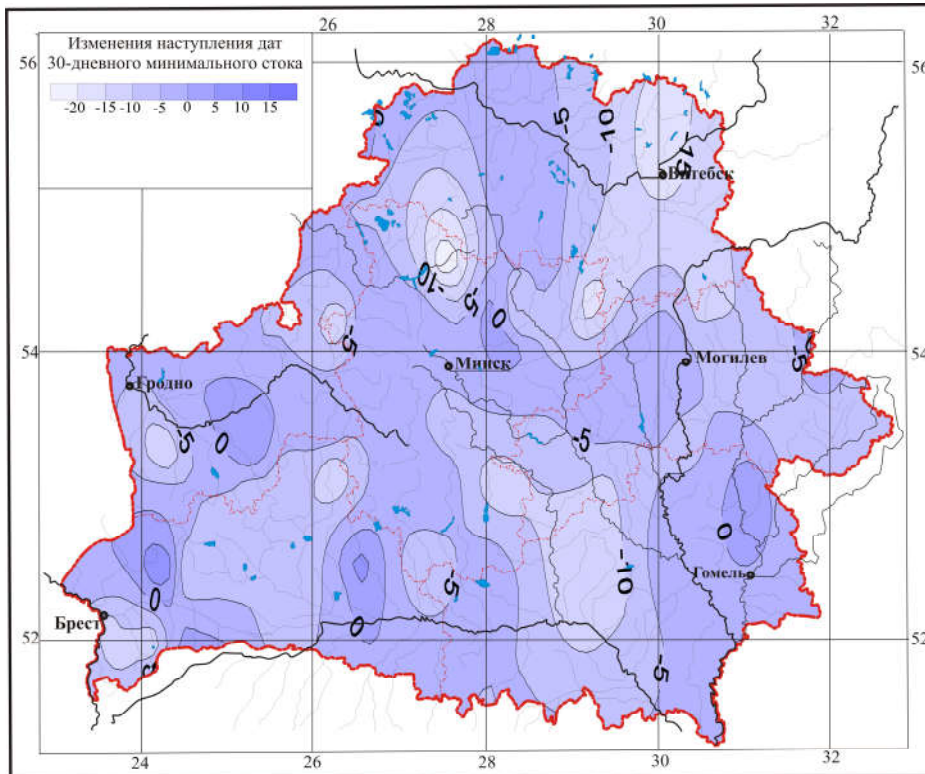
а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 4.8 – Пространственная структура изменения минимального стока рек Беларуси

а



б



а – в период открытого русла; б – в зимний период

Рисунок 4.9 – Картосхема изменения наступления дат наименьшего расхода воды

В особую группу (около 10%) необходимо выделить канализированные и мелиорированные бассейны (рр. Жабинка, Ясельда, Морочь и др.), где маловодный период наступает позже более чем на 30 суток, по сравнению с первым периодом.

Наиболее ранние сроки наступления дат маловодного периода в **зимнюю** межень характерны для южной части территории Беларуси, в частности в бассейнах рр. Днепр и Припять. В связи с большей однородностью формирования стока в зимний период, повсеместное смещение наступления наименьшего расхода на более поздние сроки в среднем составляет 8 дней, хотя варьируют от 2 до 21 дня. В тоже время, примерно на 20% рек маловодный период наступает раньше в среднем на 5 дней.

Рассмотренные изменения происходят, в основном, под воздействием природно-климатических факторов, как следствие потепления климата. В зимы без оттепелей происходит накопление снега на замершей почве и во время весеннего половодья посредством поверхностного стока большая часть талых вод попадает в речную сеть. При частых зимних оттепелях происходит таяние снега, и интенсивное питание грунтовых вод повышает зимний минимальный сток, что снижает величину весеннего половодья, растягивает его во времени и отодвигает наступление маловодной фазы. Эти процессы могут усиливаться и антропогенными воздействиями, в частности глубокая сеть мелиоративных каналов способна дренировать более глубокие горизонты подземных вод и тем самым поддерживать средние уровни воды в реках.

Смещение дат начала наименьшего расхода воды на более ранние сроки вызвано в большей части антропогенными воздействиями, в частности увеличением на водосборах густоты речной сети посредством открытой и закрытой дренажной сети. Особенно эти воздействия заметны на водосборах с преобладанием песчаных почв. Осушение мелкозалежных торфяников, подстилаемых крупнозернистыми песками, и последующая сработка торфяного слоя повлияли на сроки наступления маловодной фазы. Произошедшие изменения внутригодового хода атмосферных осадков в Полесье, выраженные в уменьшении количества осадков в апреле-мае и особенно сильно в августе, усилили антропогенные воздействия. Смещение дат начала минимальных зимних периодов, в основном, вызвано природно-климатическими факторами.

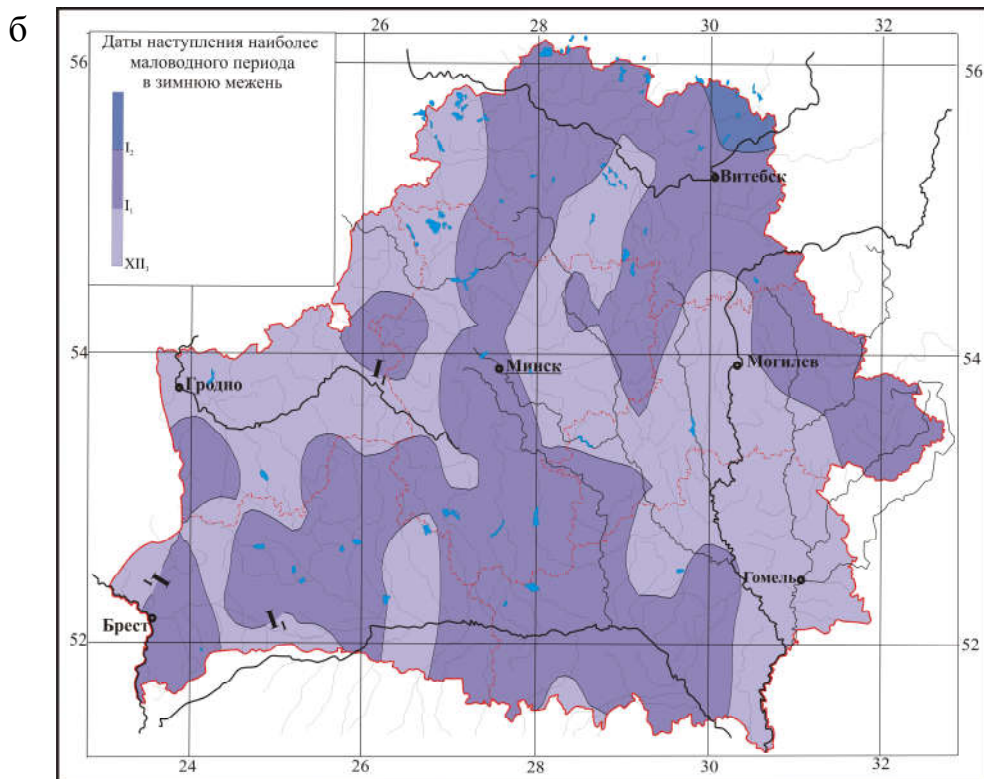
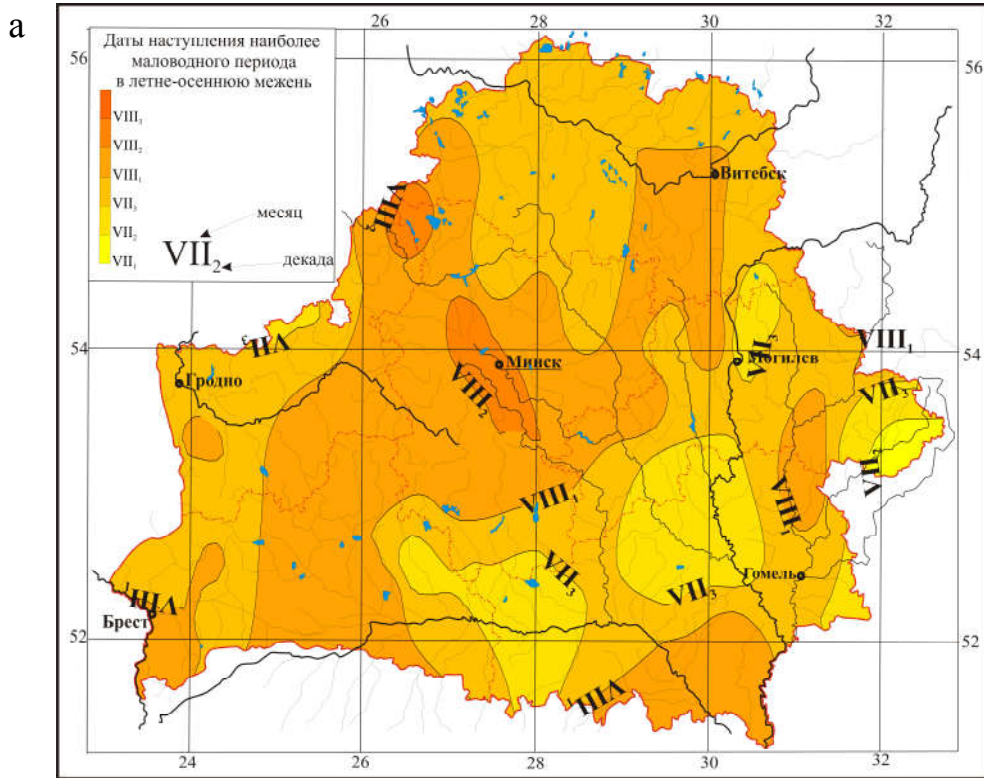
Современная пространственная картина наступления начала наименьшего расхода воды на реках Беларуси представлена на рисунке 4.10.

Среднее время появления наименьшего расхода воды в период открытого русла приходится на вторую декаду июля – вторую декаду августа, а зимнего – на третью декаду декабря – вторую декаду января. В таблице 4.7 приведены процентные соотношения количества рассматриваемых рек по основным водосборам Беларуси и декады начала наименьшего расхода воды. В настоящее время летне-осенний минимальный сток на большинстве рек формируется в конце июля – середине августа, а зимнего минимального стока приходится на первую половину января.

Таблица 4.7 – Начало периода 30-дневного минимального стока

Бассейн реки	Летне-осенний				Зимний		
	июль		август		декабрь	январь	
	II де- када	III де- када	I дека- да	II де- када	III де- када	I де- када	II де- када
Западная Двина	0	3	10	0	0	9	5
Неман	0	6	7	10	3	17	4
Западный Буг	0	0	10	0	3	5	2
Днепр	7	8	5	9	5	19	6
Припять	3	5	7	10	3	15	4
Всего	10	22	39	29	14	65	21

Под влиянием природно-климатических факторов и антропогенных воздействий произошли изменения начала наименьшего расхода в период открытого русла и зимний период. Начало этих периодов минимального стока сместились как на ранние, так и на более поздние даты. Описанные в настоящей работе общие закономерности и причины изменения в датах начала наименьшего расхода воды имеет важное практическое значение. Смещения дат начала наименьших расходов воды надо признать существенными, а данный факт необходимо учитывать при разработке схем управления водными ресурсами.



а – период открытого русла; б – зимний период

Рисунок 4.10 – Картограмма дат наступления наименьшего расхода воды в современных условиях

4.4 Прогнозная оценка колебаний минимального стока рек Беларуси

В 70-х годах XX столетия наибольшее развитие получили локальные (применительно к конкретному, достаточно большому, отдельному водному объекту) и территориальные или фоновые (прогноз стока рек составляется для территории) гидрологические прогнозы. Прогнозные оценки строились в основном с учетом факторов формирования минимального стока [10, 54, 102, 103, 118]. В настоящее время наиболее часто используется статистический прогноз, т.е. экстраполяция случайного процесса. Кроме того, в последнее время активно разрабатываются нелинейные модели колебаний речного стока [73].

Для удобства анализа временного ряда и построения на его основе прогноза все методы обычно объединяют в одну программу АРПСС (Авторегрессионное проинтегрированное Скользящее Среднее – ARIMA) [112]. В прогнозной модели рассматриваются два основных процесса:

- процесс авторегрессии;
- процесс скользящего среднего.

Процесс авторегрессии. Большинство временных рядов содержат элементы, которые последовательно зависят друг от друга. Такую зависимость можно выразить следующим уравнением (4.14):

$$x_t = \xi + \phi_1 \cdot x_{(t-1)} + \phi_2 \cdot x_{(t-2)} + \phi_3 \cdot x_{(t-3)} + \dots + \varepsilon, \quad (4.14)$$

где ξ – константа (свободный член), ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 – параметры авторегрессии.

Видно, что каждое наблюдение есть сумма случайной компоненты (случайное воздействие, ε) и линейной комбинации предыдущих наблюдений.

Процесс скользящего среднего. В отличие от процесса авторегрессии, в процессе скользящего среднего каждый элемент ряда подвержен суммарному воздействию предыдущих ошибок. В общем виде это можно записать следующим образом (4.15):

$$x_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \cdot \varepsilon_{(t-1)} - \theta_2 \cdot \varepsilon_{(t-2)} - \theta_3 \cdot \varepsilon_{(t-3)} - \dots, \quad (4.15)$$

где μ – константа,

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – параметры скользящего среднего.

Другими словами, текущее наблюдение ряда представляет собой сумму случайной компоненты (случайное воздействие, ε) в данный момент и

линейной комбинации случайных воздействий в предыдущие моменты времени.

Модель авторегрессии и скользящего среднего. Общая модель, предложенная Боксом и Дженкинсом (1976) включает как параметры авторегрессии, так и параметры скользящего среднего. Имеется три типа параметров модели:

- параметры авторегрессии (p),
- порядок разности (d),
- параметры скользящего среднего (q).

В обозначениях Бокса и Дженкинса модель записывается как АРПСС (p, d, q) [14].

Идентификация. На этом этапе решается вопрос, как много параметров авторегрессии (p) и скользящего среднего (q) должно присутствовать в эффективной и экономной модели процесса. (*Экономность* модели означает, что в ней имеется наименьшее число параметров и наибольшее число степеней свободы среди всех моделей, которые подгоняются к данным). На практике очень редко бывает, что число параметров p или q больше.

Оценивание и прогноз. Следующий шаг (*Оценивание*) состоит в оценивании параметров модели. Полученные оценки параметров используются на последнем этапе (*Прогноз*) 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. На интегрирование данных указывает буква I в общем названии модели (АРПСС = Авторегрессионное Проинтегрированное Скользящее Среднее).

Константа в моделях АРПСС. Дополнительно модели АРПСС могут содержать константу, интерпретация которой зависит от подгоняемой модели. Именно, если (1) в модели нет параметров авторегрессии, то константа μ есть среднее значение ряда, если (2) параметры авторегрессии имеются, то константа представляет собой свободный член. Если бралась разность ряда, то константа представляет собой среднее или свободный член преобразованного ряда. Например, если бралась первая разность (разность первого порядка), а параметров авторегрессии в модели нет, то константа представляет собой среднее значение преобразованного ряда и, следовательно, *коэффициент наклона линейного тренда* исходного.

Число оцениваемых параметров. Конечно, до того, как начать оценивание, необходимо решить, какой тип модели будет подбираться к данным, и какое количество параметров присутствует в модели, иными словами, нужно идентифицировать модель АРПСС. Основными инструментами идентификации порядка модели являются графики, автокорреляционная функция (АКФ), частная автокорреляционная функция (ЧАКФ). Это решение не является простым и требуется основательно поэкспериментировать с альтернативными моделями. Тем не менее, большинство встречающихся на практике временных рядов можно с достаточной степенью точности аппроксимировать одной из 5 основных моделей, которые можно идентифицировать по виду автокорреляционной (АКФ) и частной автокорреляционной функции (ЧАКФ). Ниже дается список этих моделей (таблица 4.8). Отметим, что число параметров каждого вида невелико (меньше 2), поэтому нетрудно проверить альтернативные модели.

Таблица 4.8 – Критерии нестационарности процесса и выбора модели

АКФ	ЧАКФ	Вид модели
Экспоненциально затухает	выброс лишь при $\tau = 1$	(АР(1)) авторегрессия первого порядка
Форма затухания в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает	выброс лишь при $\tau = 1$ $\tau = 2$	(АР(2)) авторегрессия второго порядка
Выброс при $\tau = 1$, остальные значения нулевые	Экспоненциально затухает или осциллирует с изменением знака	(СС(1)) скользящее среднее первого порядка
Выброс при $\tau = 1$ и $\tau = 2$, остальные значения нулевые	Форма синусоидальной волны или экспоненциально затухает	(СС(2)) скользящее среднее второго порядка
Экспоненциально затухает, начиная с $\tau = 1$ (затухание может быть монотонным или осциллирующим)	Экспоненциально затухающие значения ординат либо монотонно осциллируют	(АР СС(1)) авторегрессия и скользящее среднее первого порядка

Оценки параметров. Если значения вычисляемой t статистики не значимы, соответствующие параметры в большинстве случаев удаляются из модели без ущерба подгонки. Другой обычной мерой надежности модели является сравнение прогноза, построенного по урезанному ряду с «известными (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 (в частности, АКФ ос-

татков не должна иметь какой-либо периодичности). Поэтому необходим всесторонний анализ остатков. Хорошей проверкой модели являются: график остатков и изучение их трендов, проверка АКФ остатков (на графике АКФ обычно отчетливо видна периодичность).

Оценивание модели. Анализ остатков. 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*. Анализ остатков чрезвычайно важен и необходим при анализе временных рядов. Процедура оценивания предполагает, что остатки не скоррелированы и нормально распределены.

Ограничения. Следует напомнить, что модель АРПСС является подходящей только для рядов, которые являются стационарными (среднее, дисперсия и автокорреляция примерно постоянны во времени); для нестационарных рядов следует брать разности. Рекомендуется иметь, как минимум, 50 наблюдений в файле исходных данных. Также предполагается, что параметры модели постоянны, т.е. не меняются во времени.

Многолетние колебания минимального стока можно рассматривать как простую цепь Маркова, то есть принимается во внимание связь между стоком смежных лет и не учитывается корреляция между стоками несмежных интервалов. Представление о пространственной структуре коэффициента автокорреляции можно получить из рисунка 4.12. Коэффициент автокорреляции временных рядов летне-осеннего минимального стока изменяется в пределах $-0,45-0,88$, а зимнего $-0,46-0,81$, что свидетельствует о наличии тесной связи минимальных расходов в смежные годы. Положительные коэффициенты автокорреляции характерны для рек верхнего течения рр. Неман, Березина, Друть, а отрицательные для междуречий рр. Свислочь – Березина, Припять – Днепр.

Для описания многолетних колебаний минимального стока основных рек Беларуси использовалась сложная цепь Маркова (допускается наличие ближних и дальних внутрирядных связей) со сдвижкой до 30 лет. В этом случае ключевым моментом для описания колебаний является автокорреляционная функция (АКФ). Как показал анализ значимости коэффициента автокорреляции минимального стока рек, гипотеза независимости минимального стока не может быть принята ни для одной из исследуемых рек, так как минимальные расходы не являются совокупностью независимых случайных

величин. Частный вид моделей приведен в таблицах 4.9, 4.10. Для рассматриваемых моделей коэффициент корреляции принимает значения от 0,30 (Сож – г. Гомель) до 0,71 (Щара – г. Слоним). Коэффициент детерминации численно изменяется от 0,23 (Днепр – г. Речица) до 0,50 (Щара – г. Слоним). Коэффициент детерминации указывает на 50% вероятность объяснения переменных, включенных в модель. Анализ автокорреляционных функций показал, что для моделей характерно наличие дальних внутрирядных связей. Так для летне-осеннего минимального стока характерно наличие значимой связи на 12, 20, 28 году, а для зимнего встречаются как ближние (на 3, 4, 6 году), так и дальние связи (на 17, 26, 28 году).

Анализ выборочных АКФ и ЧАКФ (рисунок 4.11) показал, что для большинства временных рядов минимальных расходов воды рек Беларуси закономерности формирования летне-осеннего и зимнего стока в многолетнем разрезе может быть идентифицировано моделями $AR(1)$ и $AR(2)$. Так как для первой модели характерна экспоненциально затухающая автокорреляционная функция, а частная автокорреляционная функция имеет выброс при $\tau = 1$. Вторая модель характеризуется затуханием автокорреляционной функции в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает, а частная автокорреляционная функция имеет выброс при $\tau = 1$ $\tau = 2$.

В настоящее время, по данным Департамента гидрометеорологии Министерства природных ресурсов Республики Беларусь, с 1988 г. на территории республики наблюдается рост среднегодовых температур воздуха. За исключением 1996 г., когда средняя годовая температура воздуха была выше нормы. Выявлен положительный тренд годовых температур воздуха, а анализ среднемесячных температур за период с 1985 по 2005 гг. показал, что наибольшие изменения произошли в зимние месяцы и в июле. Линейный тренд температуры воздуха за год в целом составляет $+0,72^\circ\text{C}$ за 10 лет, а в июле $+1,40^\circ\text{C}$ за 10 лет [40, 42]. Кроме того, наблюдается смещение самых холодных месяцев на ноябрь и декабрь.

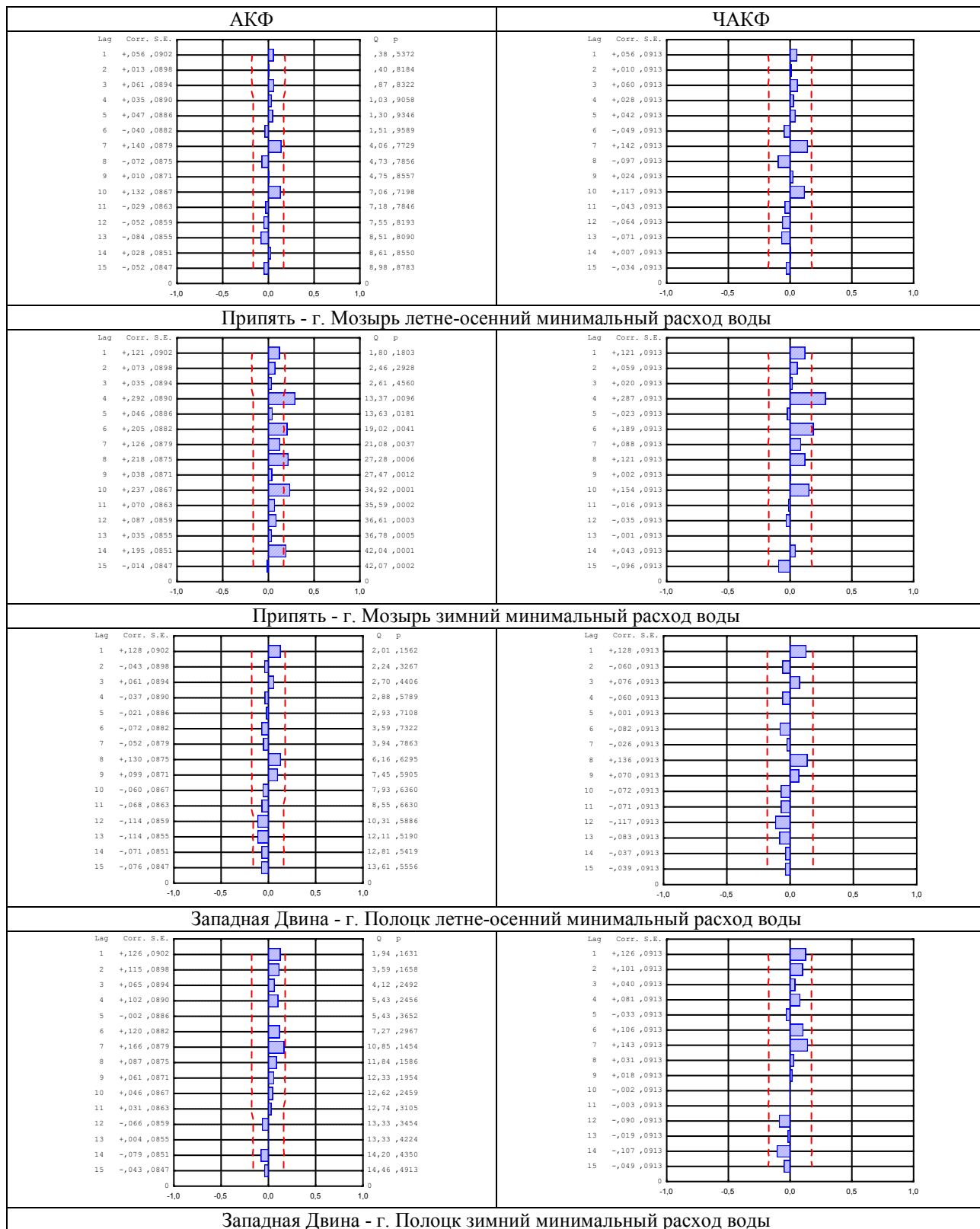


Рисунок 4.11 – Автокорреляционная функция и частная автокорреляционная функция минимальных расходов воды

По модельным оценкам увеличение количества атмосферных осадков при потеплении климата должно наблюдаться в высоких широтах, а уменьшение – в низких. Граница раздела проходит по 50–55° с.ш., что позволяет прогнозировать небольшие изменения атмосферных осадков на территории Беларуси при потеплении климата. В изменениях атмосферных осадков на территории Беларуси наблюдаются следующие тенденции: в январе, июне, сентябре, ноябре и декабре идет уменьшение количества осадков, а в феврале, мае, августе и октябре – увеличение [40]. Исходя из вышесказанного, можно полагать, что для Беларуси ожидается увеличение температуры воздуха на 0,3–3°C, а изменение атмосферных осадков (увеличение или уменьшение) на 0–15% от современного уровня [86, 87, 88].

Используя гидролого-климатическую гипотезу В.С. Мезенцева [97], разработана многофакторная модель, в основе которой лежит стандартное уравнение водного баланса участка суши с независимой оценкой основных элементов баланса (атмосферные осадки, суммарное испарение и климатический сток) в годовом аспекте [35]. Разработанная модель позволила оценить возможные изменения минимальных расходов рек Беларуси в теплый период в зависимости от тех или иных гипотез развития климата.

На рисунке 4.13 представлена пространственная структура слоя минимального стока рек Беларуси на 2015 г. Сравнение прогнозных данных с современными показало:

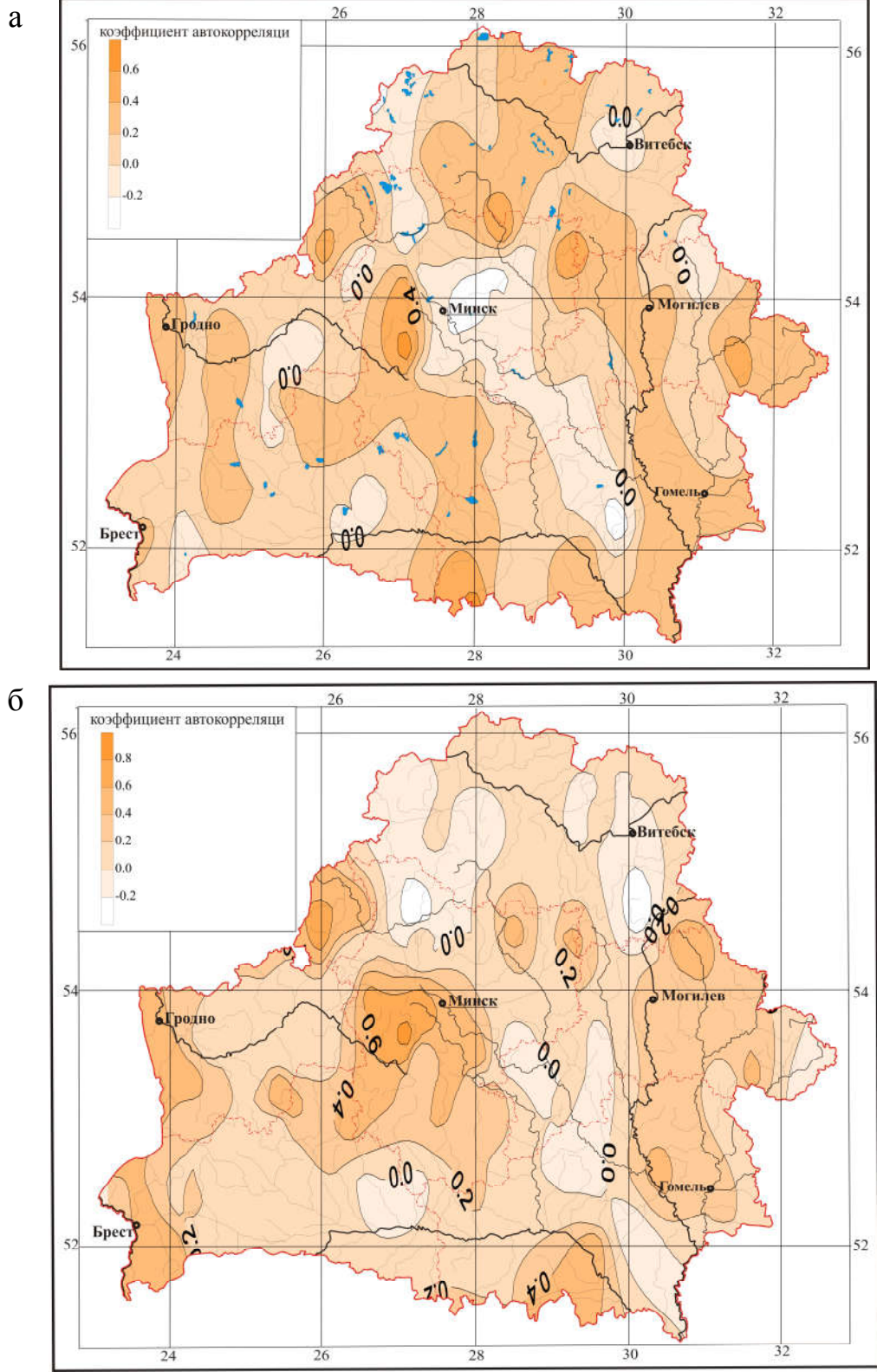
- на большей части территории Беларуси летне-осенний и зимний минимальный сток рек Беларуси уменьшится; летне-осенний на 24%, зимний – 21%;
- на юге и юго-востоке изменения будут иметь обратную тенденцию, т.е. летне-осенний и зимний минимальный сток увеличится; летне-осенний на 23%, а зимний – 16%.

Таблица 4.9 – Параметры прогнозных моделей для летне-осеннего минимального стока

Река – пост	коэффициент множественной корреляции	Модель
Западная Двина – г. Полоцк	0,59	$Q(t) = -0,244 \cdot Q(t-12) - 0,257 \cdot Q(t-28) + 225,534 + \xi(t)$
Припять – г. Мозырь	0,60	$Q(t) = 0,446 \cdot Q(t-12) + 136,071 + \xi(t)$
Неман – г. Гродно	0,64	$Q(t) = -0,260 \cdot Q(t-12) + 0,286 \cdot Q(t-28) + 48,782 + \xi(t)$
Днепр – г. Речица	0,55	$Q(t) = -0,312 \cdot Q(t-11) - 0,293 \cdot Q(t-18) + 272,583 + \xi(t)$
Птичь – с. Лучицы	0,58	$Q(t) = -0,228 \cdot Q(t-2) - 0,240 \cdot Q(t-16) + 0,267 \cdot Q(t-20) + 9,668 + \xi(t)$
Мухавец – г. Брест	0,64	$Q(t) = 0,266 \cdot Q(t-20) + 2,634 + \xi(t)$
Щара – г. Слоним	0,71	$Q(t) = 0,264 \cdot Q(t-28) + 6,518 + \xi(t)$
Виляя – с. Михалишки	0,54	$Q(t) = 0,245 \cdot Q(t-28) + 16,954 + \xi(t)$
Дисна – пгт Шарковщина	0,69	$Q(t) = 0,364 \cdot Q(t-5) - 0,317 \cdot Q(t-12) - 0,259 \cdot Q(t-21) + 12,087 + \xi(t)$
Сож – г. Гомель	0,30	$Q(t) = 0,228 \cdot Q(t-29) + 79,127 + \xi(t)$

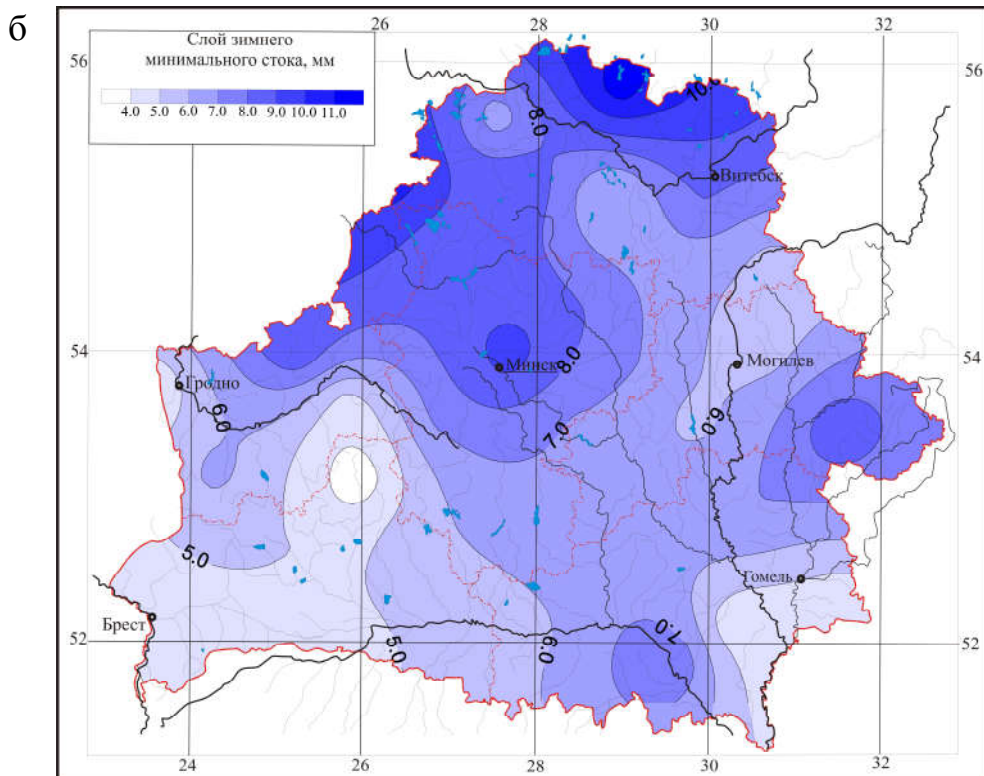
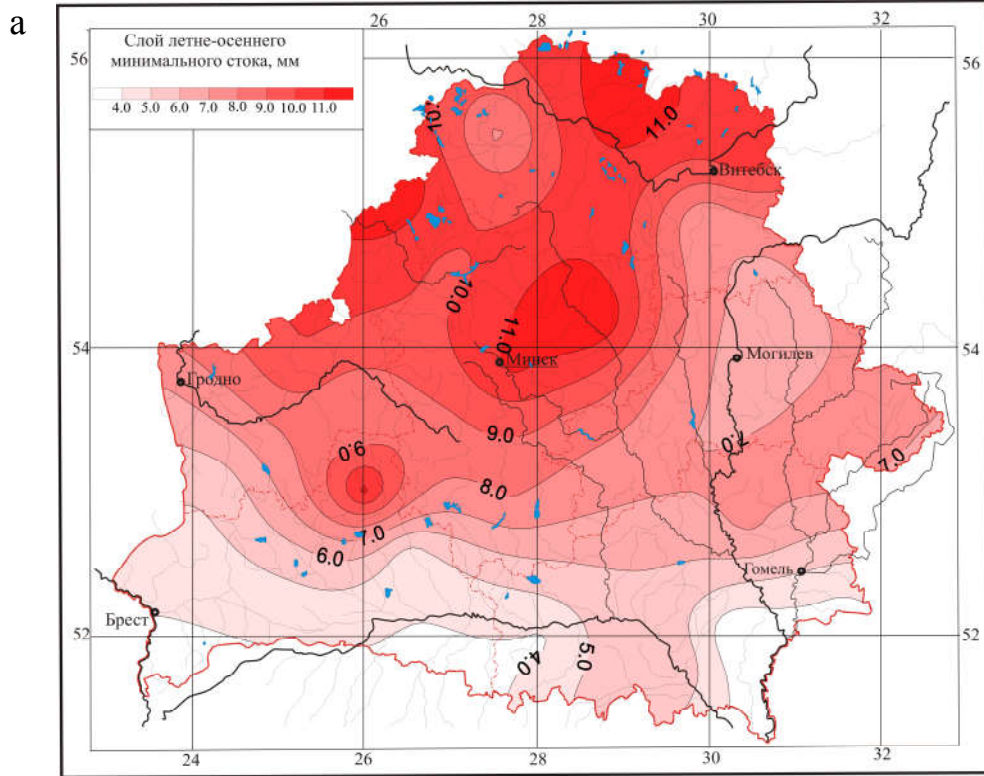
Таблица 4.10 – Параметры прогнозных моделей для зимнего минимального стока

Река – пост	коэффициент множественной корреляции	Модель
Зимний минимальный сток		
Западная Двина – г. Полоцк	0,53	$Q(t) = -0,267 \cdot Q(t-9) + 136,045 + \xi(t)$
Припять – г. Мозырь	0,61	$Q(t) = 0,126 \cdot Q(t-6) + 0,151 \cdot Q(t-17) - 0,270 \cdot Q(t-28) + 109,26 + \xi(t)$
Неман – г. Гродно	0,50	$Q(t) = 0,228 \cdot Q(t-27) + 33,634 + \xi(t)$
Днепр – г. Речица	0,48	$Q(t) = 0,224 \cdot Q(t-17) + 0,261 \cdot Q(t-28) + 54,821 + \xi(t)$
Птичь – с. Лучицы	0,62	$Q(t) = 0,183 \cdot Q(t-17) + 0,230 \cdot Q(t-26) - 0,343 \cdot Q(t-27) + 17,189 + \xi(t)$
Мухавец – г. Брест	0,70	$Q(t) = -0,207 \cdot Q(t-4) - 0,194 \cdot Q(t-9) + 0,369 \cdot Q(t-16) + 0,261 \cdot Q(t-17) + 12,784 + \xi(t)$
Щара – г. Слоним	0,63	$Q(t) = 0,351 \cdot Q(t-26) + 12,759 + \xi(t)$
Вилия – с. Михалишки	0,63	$Q(t) = 0,252 \cdot Q(t-1) + 16,535 + \xi(t)$
Дисна – пгт Шарковщина	0,57	$Q(t) = -0,246 \cdot Q(t-14) + 12,996 + \xi(t)$
Березина – г. Бобруйск	0,70	$Q(t) = 0,321 \cdot Q(t-3) + 34,42 + \xi(t)$
Сож – г. Гомель	0,52	$Q(t) = 0,265 \cdot Q(t-28) + 48,033 + \xi(t)$



а – летне-осенние; б – зимние минимальные расходы воды

Рисунок 4.12 – Пространственная структура коэффициента автокорреляции



а – летне-осенний период; б – зимний период

Рисунок 4.13 – Пространственная структура среднееголетнего слоя минимального стока на 2015 год

Представленная прогнозная оценка изменения минимального стока на территории Беларуси на 2015 год достаточно схематична и актуальна при условии сохранения современных тенденций изменения метеоэлементов.

Для проведения численного эксперимента возможного изменения минимального стока рек Беларуси были отобраны 47 малых рек. Основываясь на существующих в настоящее время сценариях изменения климата и антропогенного воздействия на водосборы рек, эксперимент проведен по следующим вариантам:

Вариант 1 – средняя годовая температура воздуха увеличится на 2 °С по сравнению с современными условиями при неизменном количестве атмосферных осадков;

Вариант 2 – уменьшение годовых атмосферных осадков на 10% с неизменной температурой воздуха;

Вариант 3 – годовые атмосферные осадки уменьшаются на 10%, а средняя годовая температура воздуха увеличивается на 2 °С;

Вариант 4 – заболоченность и лесистость водосбора уменьшаются, а густота речной сети и распаханность увеличиваются на 5, 10, 20 и 30% от существующих в настоящее время при неизменных климатических условиях.

Изменения минимального стока в результате антропогенных воздействий выражаются в относительных величинах – в процентах по отношению к современным условиям, т.е. рассчитывается относительное увеличение или уменьшение минимального стока.

Исходя из расчетов, на основе указанных выше уравнений с принятыми гипотезами, сделаны следующие выводы:

– **по первому варианту** (увеличение температуры на 2 °С) летне-осенний минимальный сток практически не изменится (2,2–2,5%) (Приложение Г).

Анализ таблицы Г 1 дает представление о небольшом уменьшении минимального стока при увеличении температуры. Произошло небольшое увеличение суммарного испарения на севере республики и почти не изменилось на юге, особенно заметна эта тенденция в летние месяцы (июнь, июль, август). Небольшие изменения минимального стока можно объяснить тем, что температура воздуха не является решающим стокоформирующим фактором;

– *по второму варианту* (уменьшение осадков на 10%) летне-осенний минимальный сток может уменьшиться на 15% (таблица Г 2), а суммарное испарение – в среднем на 5–10%. При этом максимальное уменьшение стока наблюдается в июне–июле на 20%. Необходимо отметить синхронное уменьшение минимального речного стока и суммарного испарения при уменьшении количества атмосферных осадков. Количество поступающей влаги уменьшилось, соответственно уменьшилась и возможность ее испарения, что можно объяснить меньшей влажностью почвы и увеличением ее водопоглощающей способности;

– *по третьему варианту* (уменьшение осадков на 10% и увеличение температуры на 2 °С) сток уменьшился в среднем на 20% (июнь – 40%). Картина хода изменения минимального стока приведена в таблице Г 3.

Речной сток оказался очень чувствительным к одновременному уменьшению количества атмосферных осадков и увеличению температуры воздуха. Значения минимального стока существенно уменьшились для июня на 38%, июля на 18%, августа на 16%. Такое положение можно объяснить небольшими расходами во время летней межени и большим (по отношению к остальным месяцам года) абсолютным уменьшением количества осадков (в летние месяцы выпадает наибольшее количество осадков);

– *по четвертому варианту* (заболоченность и лесистость водосбора уменьшаются, а густота речной сети и распаханность увеличиваются на 5, 10, 20 и 30% соответственно) средние значения изменений речного стока для исследуемых рек-водосборов приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Средние величины изменения минимального стока по *варианту 4*, в % к существующему

Степень антропогенного воздействия	VI	VII	VIII	IX	X
5%	-1,08	-0,4	1,9	2,24	1,29
10%	-2,16	-0,8	3,81	4,93	2,59
20%	-4,32	-2,41	7,14	9,87	5,18
30%	-7,19	-4,82	10,48	15,25	7,44

Анализ таблицы 4.11 позволяет выявить тенденцию постепенного перехода от уменьшения стока в июне – июле к его увеличению в августе – октябре, при этом переход через критические значения изменений прихо-

дится на вторую половину июля. Необходимо отметить, что одновременное осушение болот, вырубка лесов, создание мелиоративных систем и увеличение процента пахотных земель уменьшает и растягивает во времени речной сток весеннего половодья и тем самым увеличивает его в летне-осенние месяцы. Прослеживается тенденция увеличения летне-осеннего минимального стока в зависимости от степени антропогенных воздействий, но 20–30% изменений на водосборе практически невозможно, поэтому хозяйственная деятельность в бассейнах рек не может повлиять существенным образом на изменение минимального стока рек Беларуси в ближайшем будущем.

Таким образом, наиболее неблагоприятным прогнозом развития климата для рек Беларуси является *третий вариант* (уменьшение количества осадков на 10% и увеличение средней годовой температуры на 2°C), так как приведет к уменьшению летне-осеннего минимального стока до 38%, а при наложении на этот вариант 10%-го антропогенного воздействия на водосбор реки уменьшение минимального стока может достигнуть 50%.

Спектрально-временной анализ показал наличие устойчивых 3–5-х и 33-летних циклов, что может быть использовано при построении прогностических моделей.

По синхронности колебаний минимального стока рек на территории Беларуси выделено для летне-осеннего минимального стока 6 районов, для зимнего – 4 района. Внутрирайонные значения коэффициентов корреляции (0,54–0,63) указывают на синхронность колебаний минимального стока в пределах выделенных районов. Корреляционные связи между районами убывают с запада на восток, вплоть до появления асинхронности в колебаниях минимального стока.

По однородности условий формирования минимального стока на территории Беларуси в летне-осеннюю межень выделено 2 района, в зимнюю 3 района. Первый район летне-осенней межени характеризуется наличием значимого пика на 4 и 8 году, а второй – на 5 году. Для первого района зимней межени отмечены значимые гармоники на 2 и 4 году, для второго – на 4 и 6 году, для третьего – значимый пик наблюдается на 2 году. Наиболее яркими и устойчивыми являются циклы продолжительностью 2, 4–6 и 8 лет. Модуль минимального стока уменьшается от первого района ко второму для летне-осенней и от первого к третьему для зимней межени, что закономерно в связи с уменьшением общей увлажненности территории. Коэффициент вариации имеет обратную тенденцию, т.е. увеличение с севера на юг.

Для большинства исследуемых рек (80–90%) отмечается стабильная тенденция увеличения летне-осенних и зимних минимальных расходов воды, при чем на большей части рек градиент изменения стока в зимний период больше чем в летне-осенний период.

Летне-осенний минимальный сток увеличился на 85% исследуемых рек, из них на $\frac{1}{2}$ рек сток значимо ($k_i \geq 0,27$). На $\frac{1}{5}$ изучаемых объектов (рр. Ясельда, Оресса, Словечна, Чертедь, Мухавец, Копаяовка) увеличился более чем в 2 раза. Зимний минимальный сток увеличился на 91% исследуемых рек, из них на 53% рек увеличился значимо ($k_i \geq 0,27$), на 20% более чем в 2 раза. Наибольшие изменения произошли на Полесье (бассейн рр. Припять и Западный Буг), наименьшие в бассейне р. Неман.

Произошли изменения в датах наступления наименьшего расхода воды в период открытого русла и зимнего периода. Начало наименьших расходов воды сместились как на более ранние даты (8 дней), так и на более поздние (13 дней). Эти смещения необходимо признать существенными, и данный факт учитывать при разработке схем управления водными ресурсами.

Установлено наличие дальних внутрирядных связей для временных рядов минимального стока рек Беларуси, что позволяет использовать для прогностических оценок модели $AR(1)$ (автокорреляционная функция экспоненциально затухает, а частная автокорреляционная функция имеет выброс при $\tau = 1$) и $AR(2)$ (форма затухания автокорреляционной функции в виде синусоидальной волны или экспоненциально затухает, а частная автокорреляционная функция имеет выброс при $\tau = 1$ $\tau = 2$).

Получена прогнозная оценка изменения минимального стока на территории Беларуси на 2015 год: на большей части территории Беларуси минимальный сток рек Беларуси уменьшится в среднем на 20%, а на юге и юго-востоке изменения будут иметь обратную тенденцию.

Получены прогнозные оценки изменений минимального стока рек Беларуси для различных сценариев развития климата:

- при увеличении средней годовой температуры на 2 °C и неизменном количестве атмосферных осадков (**вариант 1**) существенного изменения летне-осеннего минимального стока не произойдет и составит $\pm 2,5\%$;
- при уменьшении количества осадков на 10% и неизменной температуре воздуха (**вариант 2**) произойдет уменьшение летне-осеннего минимального стока на 15%. При этом максимальное уменьшение стока наблюдается в июне–июле на 20%;

– при уменьшении количества осадков на 10% и увеличение средней годовой температуры на 2°C (*вариант 3*) летне-осенний минимальный сток уменьшится на 20%;

– при уменьшении заболоченности и лесистости и увеличении густоты речной сети и распаханности (*вариант 4*) выявлена тенденция постепенного перехода от уменьшения стока в июне – июле к его увеличению в августе – октябре, при этом переход через «нулевые» значения изменений приходится на вторую половину июля.

Наиболее неблагоприятным прогнозом развития климата для рек Беларуси является *третий вариант* (уменьшение количества осадков на 10% и увеличение средней годовой температуры на 2°C), а при наложении хотя бы 10%-го антропогенного воздействия на водосбор реки уменьшение минимального стока может достигнуть 50%.

ГЛАВА 5

РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО СТОКА ВОДЫ МАЛЫХ РЕК БЕЛАРУСИ

5.1 Методика расчета минимального стока воды малых рек Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

Используемая в настоящее время методика расчета минимального стока воды рек Беларуси основана на учете связи модуля минимального стока и площади водосбора [110]. Однако интенсивность подземного питания рек определяется не только водообильностью питающих горизонтов, но и их количеством, а последнее определяется глубиной эрозионного вреза русла реки, что было отмечено еще в работах А.М. Норватова [100, 101], К.А. Ключевой [77] и др. Между глубиной эрозионного вреза (ΔH) и величиной площади водосбора (A) существует прямая связь ($r = 0,69$),

В основу исследования положены временные ряды минимальных 30-суточных расходов воды летне-осенней и зимней межени по 126 речным створам с периодом наблюдений от 20 до 120 лет с площадями водосборов от 100 до 74000 км².

В качестве характеристики, определяющей интенсивность формирования минимального стока, использован показатель эрозионного вреза (5.1) [121]:

$$\Delta H = H_{\text{водсб}} - H_{\text{ств}}, \quad (5.1)$$

где $H_{\text{водсб}}$ – средняя высота водосбора, м;

$H_{\text{ств}}$ – отметка среднего наименьшего уровня воды за период межени в замыкающем створе, м.

Пространственная структура эрозионного вреза рек Беларуси (ΔH) представлена на рисунке 5.1 [37].

Из рисунка видно, что величина эрозионного вреза рек изменяется в больших пределах от 10 до 70 м. Наибольшие величины приурочены к возвышенностям (Новогрудская, Минская и др.), а наименьшие – к равнинам и низменностям (Полесье). В бассейне р. Западная Двина глубина эрозионного вреза изменяется 20–50 м, небольшие величины приурочены к Полоцкой низине, а на северо-востоке увеличиваются в районе Городокской и Витебской возвышенностей. Наиболее расчленен бассейн р. Неман, так как бассейн окружен возвышенностями (Ошмянская, Минская, Новогрудская,

Слонимская, Волковыская, Гродненская, Копыльская) и имеет наибольшие значения глубины эрозионного вреза до 87 м. Бассейн р. Днепр занимает Центральнорезинскую, где глубина эрозионного вреза составляет 15–25 м, и Оршанско-Могилевскую равнины (около 40 м). Глубина эрозионного вреза изменяется в больших пределах от 15 до 60 м, а средняя величина составляет около 30 м. Бассейн р. Припять характеризуется широким спектром глубины эрозионного вреза от 12 (р. Неслуха) до 100 м (р. Горынь). Преобладающая глубина составляет 15–25 м, а в отдельных местах достигает 40–50 м (р. Уборть). Возрастает глубина эрозионного вреза р. Припять более 50 м в районе Мозырской возвышенности. Наименьшие глубины эрозионного вреза приурочены к бассейну р. Западный Буг ($\Delta H_{cp} = 22$ м).

При составлении схем комплексного использования водных ресурсов на ближайшие годы и на перспективу необходимо иметь данные о минимальном стоке рек не только применительно к определенным пунктам водозабора, но главным образом в отношении его распределения по территории Беларуси. На рисунке 5.2. представлена пространственная структура модуля летне-осеннего и зимнего минимального стока. На территории Беларуси распределение минимального стока, в общем, соответствует распределению осадков и рельефу: модуль стока изменяется: наибольшие величины (до 5,66 л/(с км²)) характерны для возвышенностей, а меньшие для равнин и низменностей. Летне-осенний минимальный сток меньше зимнего в 0,5–2,0 раза. Наибольший модуль стока отмечается в бассейне р. Неман ($q_{\min}^{л-о} = 2,66$ л/(с км²), $q_{\min}^з = 2,79$ л/(с км²)), наименьший в бассейне р. Припять ($q_{\min}^{л-о} cp = 1,10$ л/(с км²), $q_{\min}^з cp = 1,56$ л/(с км²)).

При изучении пространственной структуры модуля минимального стока и анализе карт глубины эрозионного вреза, подземного стока в реки, поверхности грунтовых вод была обнаружена хорошо выраженная связь модулей летне-осеннего и зимнего минимального стоков с показателями эрозионного вреза русла реки ΔH , которая аппроксимируется линейной зависимостью типа (5.2):

$$q_{\min}^{л-о(з)} = \mu_{л-о(з)} \cdot \Delta H \pm q_0^{л-о(з)} \quad (5.2)$$

где $q_{\min}^{л-о(з)}$ – минимальные модули стока летне-осенней (зимней) межени, л/(с км²);

$\mu_{л-о(з)}$ – коэффициент, характеризующий интенсивность питания реки подземными водами в летне-осеннюю (зимнюю) межень, приходящийся на единицу эрозионного вреза, л/(с км²)/м;

$\pm q_0^{л-о(з)}$ – параметр, учитывающий влияние азональных факторов минимального стока:

+ $q_0^{л-о(з)}$ – модуль поверхностного стока, л/(с км²);

– $q_0^{л-о(з)}$ – инфильтрация в нижележащие слои, л/(с км²).

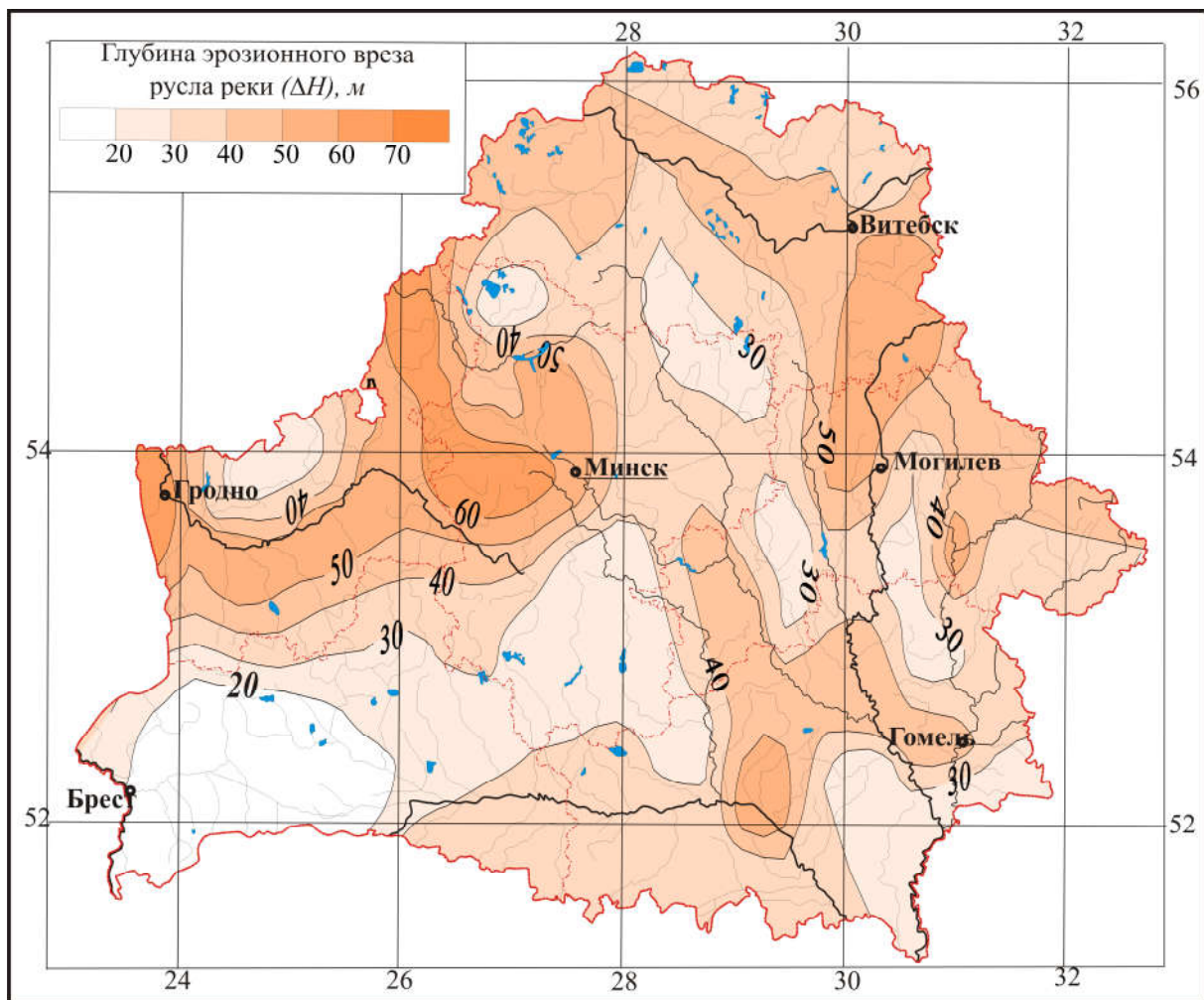
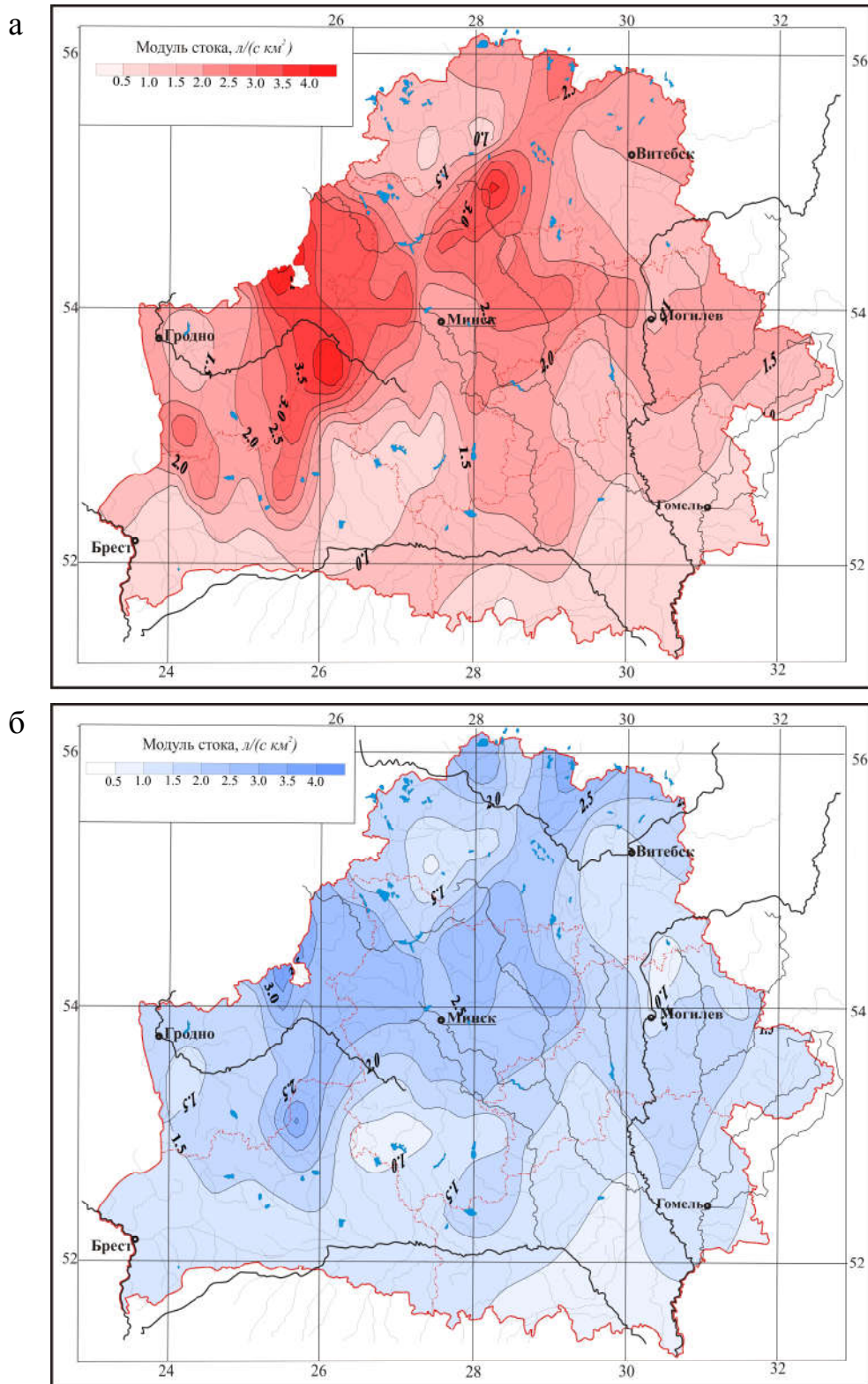


Рисунок 5.1 – Карта глубины эрозионного вреза рек Беларуси

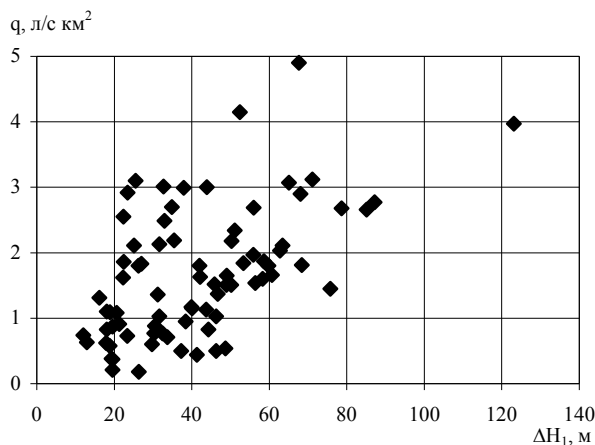


а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

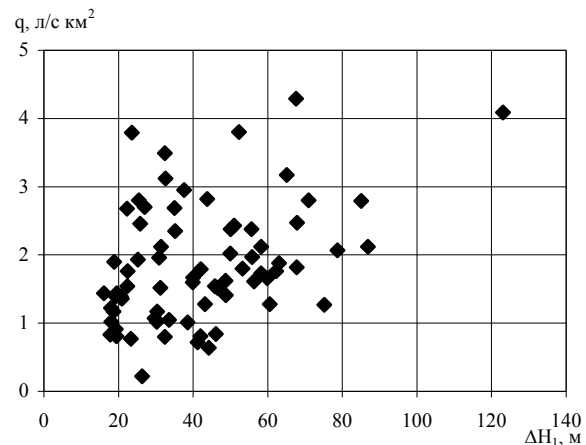
Рисунок 5.2 – Модуль минимального стока воды рек Беларуси

Зависимость модуля минимального летне-осеннего и зимнего стока от эрозионного вреза русла реки представлена на рисунке 5.3. Имеющий место разброс точек свидетельствует о больших различиях физико-географических условий формирования минимального стока, поэтому построение графиков зависимости модуля минимального стока ($q_{\min}^{л-о(з)}$) от эрозионного вреза реки (ΔH) проводилось для каждого гидрогеологического района, водоносные горизонты которого имеют одинаковую по территории водность (рисунок 5.4, 5.5). В случае большой пестроты водообильности слагающих горизонтов проводилось дробление районов, а при схожести объединялись в один. При этом было выделено 6 районов для летне-осенней межени и 3 района для зимней межени (рисунок 5.6). Для каждого из районов были получены параметры модели (таблица 5.1).

а



б



а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 5.3 – Зависимость модуля стока от глубины эрозионного вреза русла реки

Таблица 5.1 – Параметры моделей для расчета модуля минимальных расходов воды рек Беларуси

Район	Межень					
	Летне-осенняя			зимняя		
	μ	q	r	μ	q	r
Район 1	0,03	-0,29	0,97	0,02	1,46	0,88
Район 2	0,03	0,06	0,99	0,01	1,19	0,75
Район 3	0,04	0,35	0,95	0,01	0,90	0,81
Район 4	0,03	0,02	0,97			
Район 5	0,07	0,17	0,97			
Район 6	0,03	-0,01	0,96			

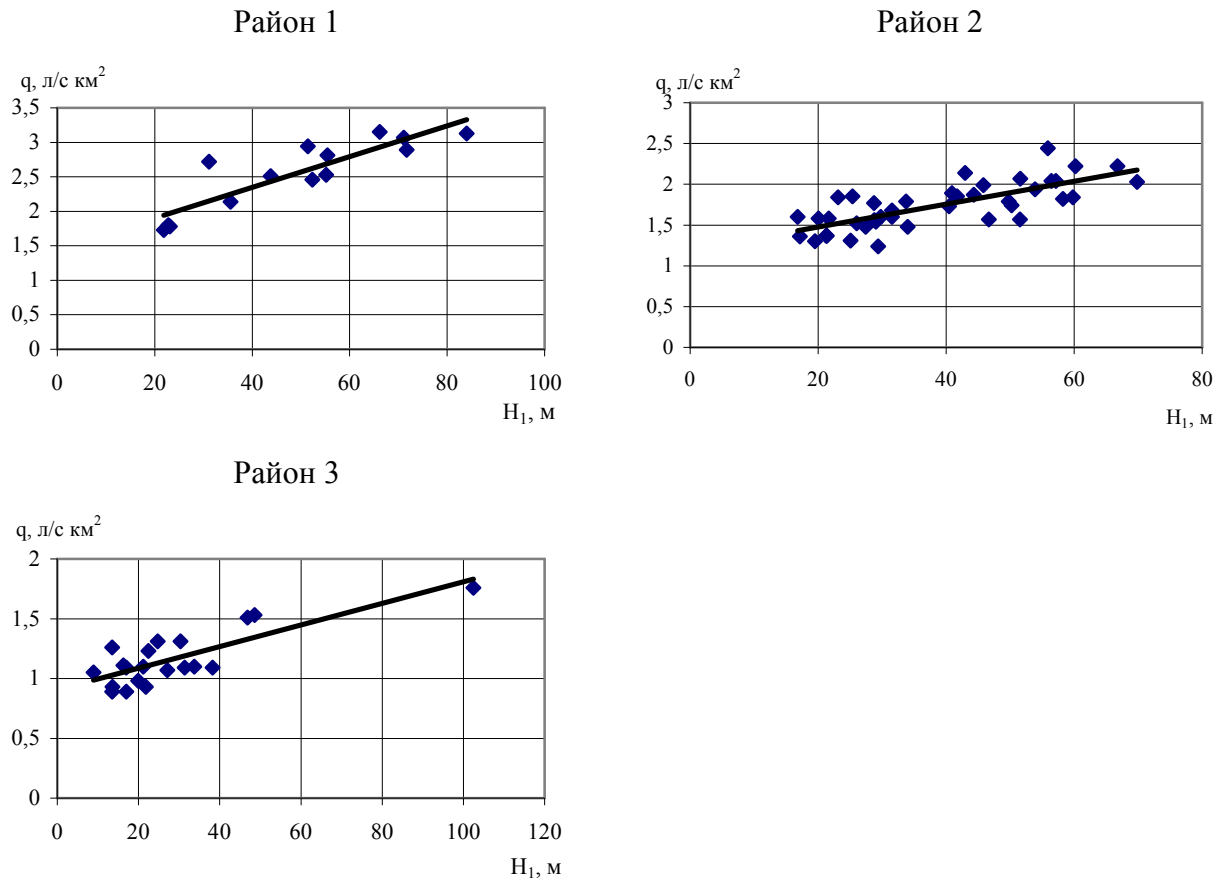


Рисунок 5.4 – Зависимость модуля зимнего минимального стока воды от глубины эрозионного вреза русла реки

Район 1 (рисунок 5.6 а) находится на севере республики и охватывает белорусскую часть бассейна р. Западная Двина. Эрозионный врез рек изменяется от 24 до 70 м, а средний составляет 44 м. В этом районе много переуглубленных русел, которые сложены моренными суглинками. Минимальный сток формируется главным образом водами верхнедевонских отложений. Средняя величина модуля среднесного подземного стока из верхнедевонских отложений составляет $1,2 \text{ л/(с км}^2\text{)}$. Мощность четвертичных отложений колеблется от 50 до 150 м, из них наиболее водообильными являются подморенные и межморенные флювиогляциальные пески и супеси. Воды четвертичных отложений имеют подчиненное значение в формировании подземного стока этого района [68, 69, 81]. Модуль подземного стока составляет $2,5 \text{ л/(с км}^2\text{)}$. Модуль летне-осеннего минимального стока варьирует от $0,43$ до $1,89 \text{ л/(с км}^2\text{)}$, средний составляет 1,2.

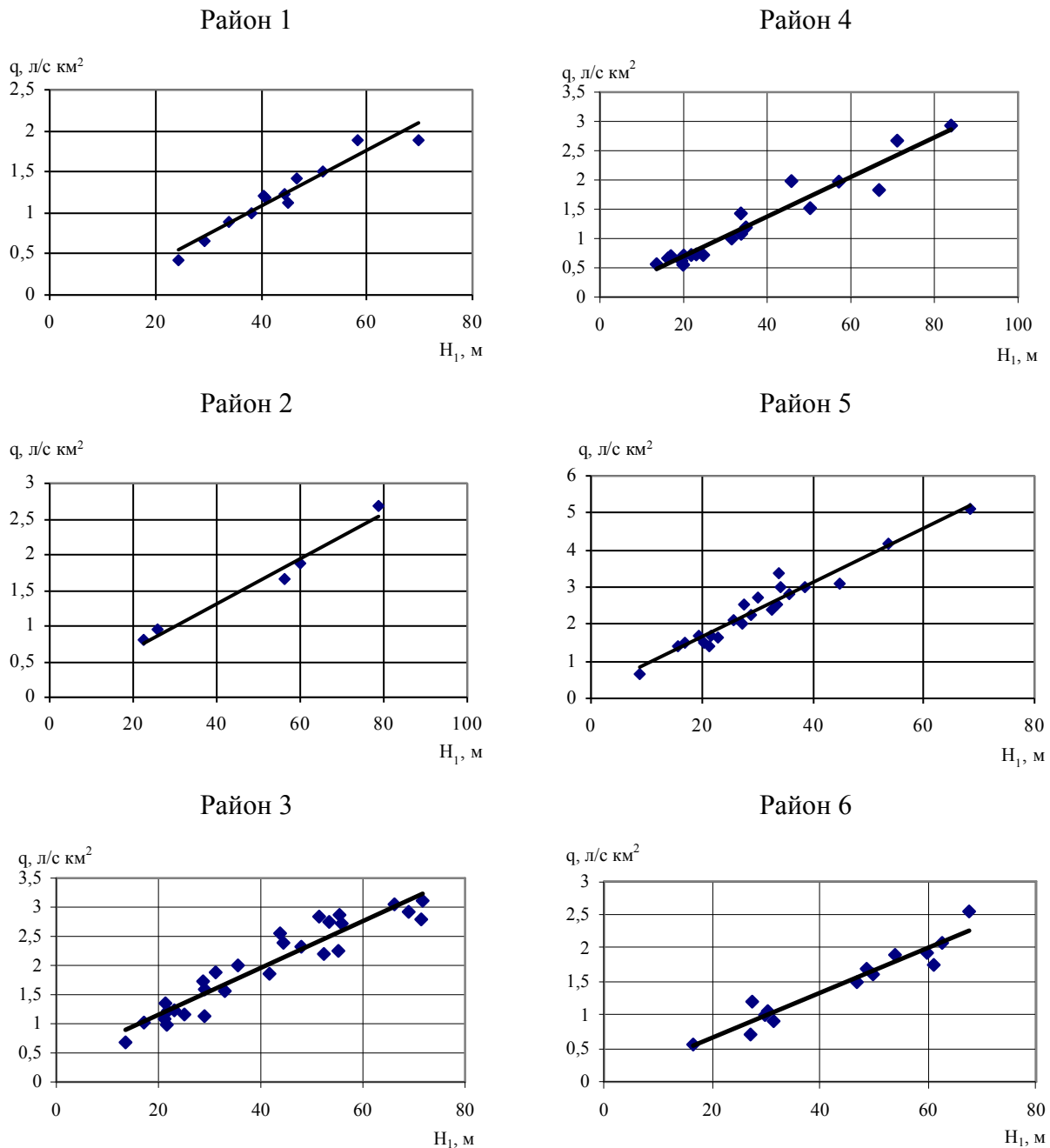


Рисунок 5.5 – Зависимость модуля летне-осеннего минимального стока воды от глубины эрозионного вреза русла реки

Район 2 протягивается узкой полосой вдоль западной границы республики и охватывает бассейн р. Западный Буг и частично бассейн р. Неман. Эрозионный врез изменяется от 22 до 79 м, средний – 48,8 м. Основными водоносными горизонтами и комплексами являются четвертичные отложения, подчиненную роль играют палеоген-неогеновые и меловые отложения. Мощность четвертичных отложений составляет 150–200 м. Модули средне-

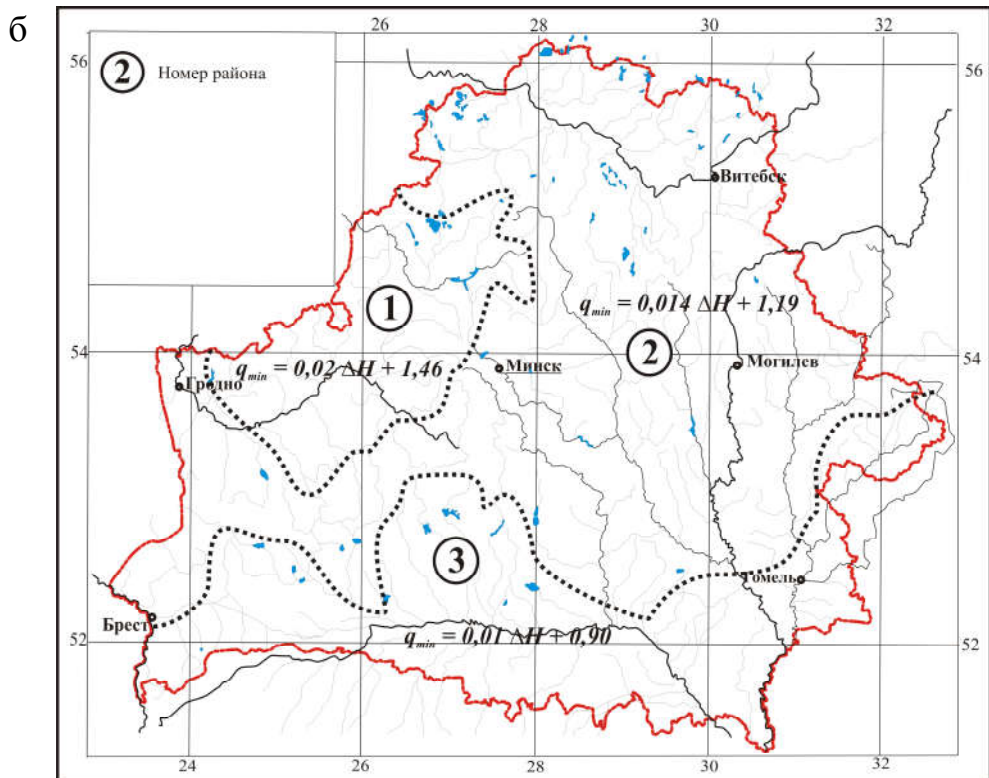
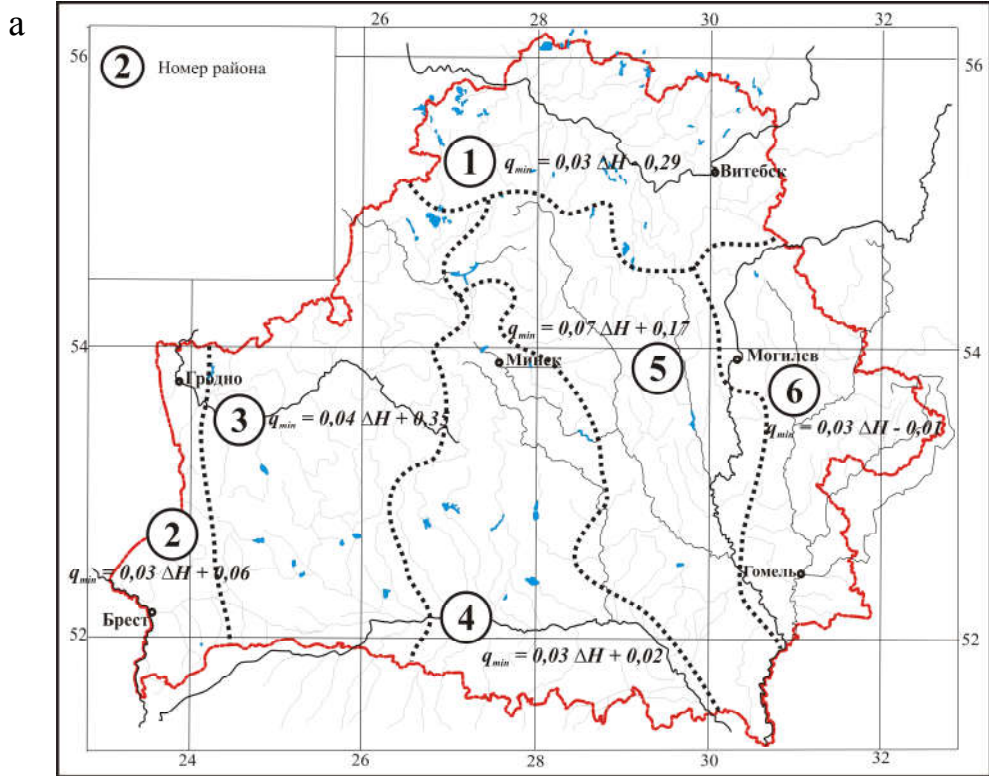
многолетнего подземного стока колеблются от 1,5 до 4,0 л/(с км²). Модуль летне-осеннего поверхностного стока изменяется от 0,8 до 2,68 л/(с км²), а средний – 1,59 л/(с км²).

Район 3 занимает западную часть Беларуси, охватывает бассейн р. Ви́лия, большую часть бассейна р. Неман и верхнее течение р. Припять. Для северной части района характерны большие абсолютные (200–250 м) и относительные высоты, что обуславливает большие значения эрозионного вреза до 72 м, средний – 40,4 м. К югу абсолютные отметки высот снижаются и составляют 130–145 м. Основными водоносными горизонтами являются четвертичные отложения, подчиненную роль играют палеоген-неогеновые отложения. Модули среднемноголетнего подземного стока колеблются от 1,0 на юге района до 5,5 л/(с км²) в бассейне р. Ви́лия. Данный район характеризуется максимальными значениями модуля летне-осеннего минимального стока 3,0–4,0 л/(с км²), средний – 1,97.

Район 4 располагается в центральной части Беларуси, и охватывает бассейн р. Припять. Абсолютные отметки высот уменьшаются при движении с севера на юг от 300 до 130 м. Эрозионный врез изменяется от 16 м (р. Вить) на юге до 84 м (р. Исloch) на севере района, а средний составляет 36 м. Основной подземный сток в районе формируется за счет вод четвертичного водоносного комплекса. Величина модуля среднемноголетнего подземного стока изменяется от 0,5 до 2 л/(с км²). Модуль летне-осеннего минимального стока изменяется от 0,56 до 2,93 л/(с км²), а средний – 1,24.

Район 5 расположен в бассейнах рр. Березина и Друть и занимает Центральнoберезинскую равнину и Гомельское Полесье. Высоты земной поверхности района уменьшаются от 220 м на севере до 130 м на юге. Основное формирование подземного стока происходит за счет четвертичных отложений, а подчиненное значение имеет сеноман-альбский водоносный горизонт. Мощность четвертичных отложений составляет 50–100 м, а эрозионный врез рек составляет в среднем 30 м. Среднемноголетний модуль летне-осеннего минимального стока составляет 2,39 л/(с км²).

Район 6 располагается на востоке республики и дренируется р. Днепр и его левыми притоками. В бассейнах рр. Ипуть, Беседь основное значение в подземном питании рек имеет сеноман-альбский водоносный горизонт, на остальной территории района четвертичные отложения. Эрозионный врез рек в среднем составляет 44 м, а модуль минимального стока – 1,46 л/(с км²).



а – летне-осенняя межень; б – зимняя межень

Рисунок 5.6 – Карта районов однотипной зависимости $q = f(\Delta H)$

В *зимний период* на территории Беларуси выделяется три района (рисунок 5.7 б) с различными условиями разгрузки подземных вод в реки

Район 1 занимает бассейны рр. Неман и Виляя и представляет собой область краевых ледниковых образований сожского ледникового покрова. Для него характерны сильная расчлененность рельефа (эрозионный врез рек составляет от 22 до 84 м, средний – 49 м), большая мощность четвертичных отложений, относительно устойчивый и высокий минимальный сток ($q_{\min}^{л-о(з)} = 2,55 \text{ л/(с км}^2\text{)}$).

Район 2 простирается на большей части республики и включает в себя бассейны рр. Западная Двина, Днепр, Березина. Глубина эрозионного вреза изменяется от 17 до 69 м, средний – 38,7 м; модуль стока варьирует от 1,24 до 2,44 л/(с км²), средний составляет 1,74 л/(с км²).

Район 3 расположен на юге и юго-востоке республики и занимает Полесскую низменность. Характеризуется плоскоравнинным рельефом. Подземный сток здесь замедленный и невысокий, среднемноголетний зимний минимальный сток изменяется от 0,89 до 1,76 л/(с км²). Глубина эрозионного вреза рек колеблется от 9 до 102 м (р. Горынь), средний – 28 м.

Значения параметров Cv и Cs необходимы при построении теоретической кривой обеспеченности, и в силу того, что для практических целей интерес представляет минимальный сток больших расчетных обеспеченностей, то нами решалась задача определения коэффициентов вариации и асимметрии.

Величина изменчивости минимального стока определяется многими факторами. Коэффициент вариации минимального стока меньше:

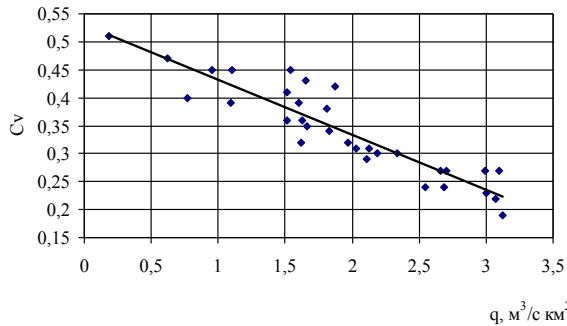
- на реках где доля подземного стока больше,
- на больших реках, чем на малых,
- на реках зарегулированных озерами, водохранилищами.

Значения коэффициента вариации были рассчитаны с помощью программы «Гидролог». При обобщении данных об изменчивости минимального стока была выявлена зависимость, которая представлена на рисунке 5.7 и имеет вид (5.3):

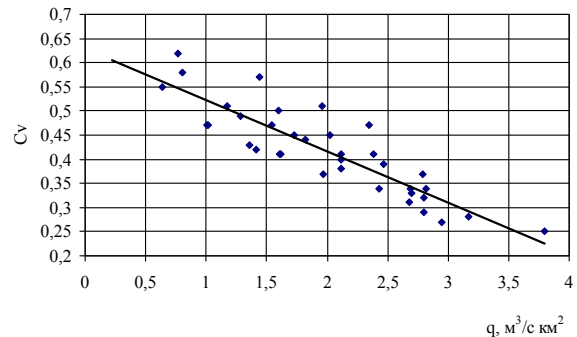
$$Cv = Cv_{q \rightarrow 0} - \alpha \cdot q_{\min}^{л-о(з)} \quad (5.3)$$

где $Cv_{q \rightarrow 0}$ – коэффициент вариации для модуля стока при $q \rightarrow 0$.

а



б



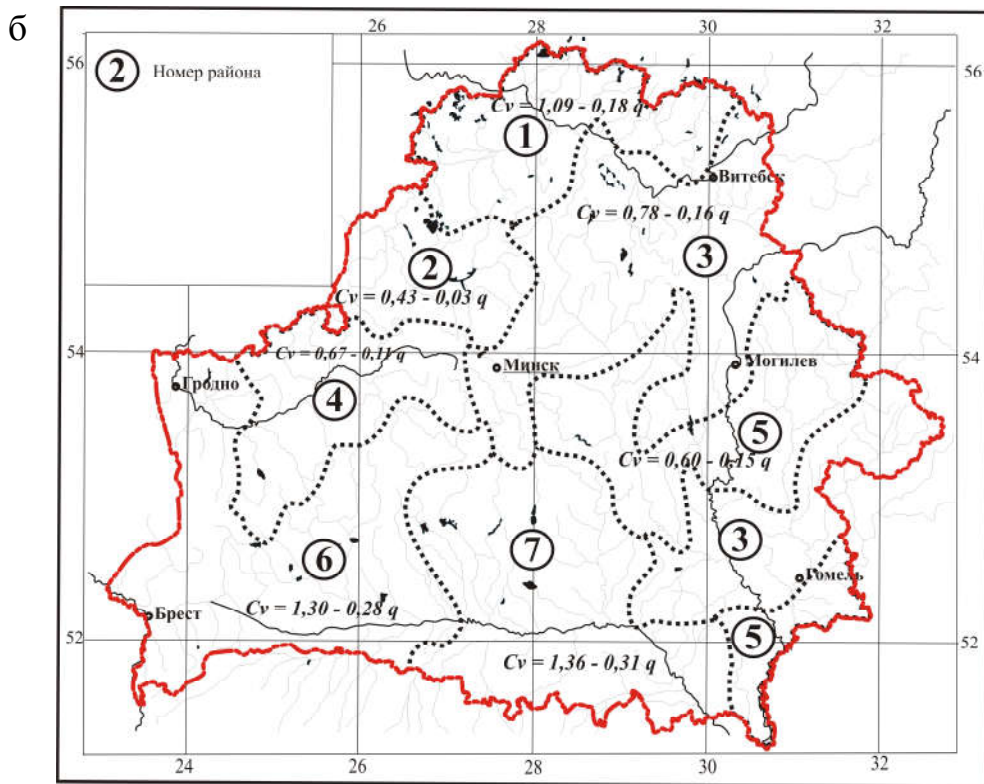
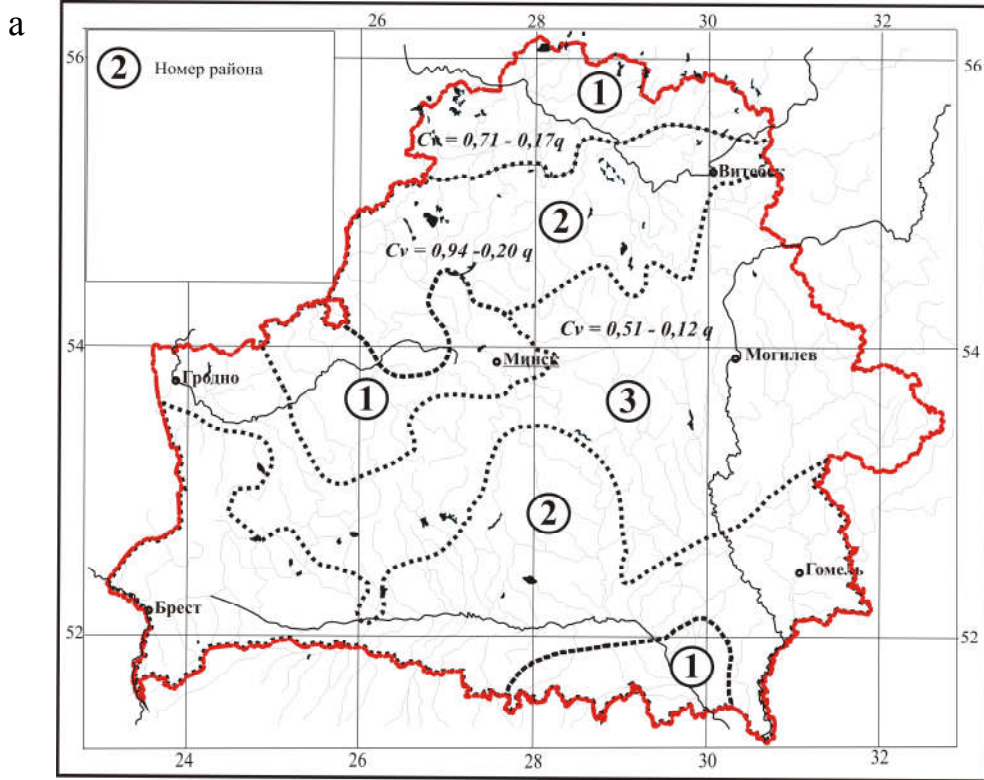
а – летне-осенний; б – зимний минимальный сток

Рисунок 5.7 – Зависимость коэффициента вариации от модуля минимального стока

Исследования показывают, что большим значениям модуля минимального стока рек соответствуют меньшие величины коэффициента изменчивости, что подтверждается рисунок 5.8. На территории Беларуси коэффициент вариации летне-осеннего минимального стока рек изменяется от 0,12 до 4,00; а зимнего – от 0,17 до 1,91. Так как значения коэффициентов вариации сильно изменяются и условия формирования минимального стока довольно разнообразны, было проведено выделение районов с однотипной зависимостью $Cv = f(q)$. Для расчета коэффициента вариации минимального стока за летне-осенний период выделено 3 района, а для зимнего – 7 (рисунок 5.8). Параметры модели приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Параметры моделей для расчета коэффициента изменчивости минимальных расходов воды

Зона	Минимальный сток					
	летне-осенний			зимний		
	α	Cv	r	α	Cv	r
1	-0,20	0,94	0,94	-0,18	1,09	0,96
2	-0,17	0,71	0,95	-0,03	0,43	0,59
3	-0,12	0,51	0,91	-0,16	0,79	0,85
4				-0,11	0,67	0,95
5				-0,15	0,60	0,95
6				-0,28	1,30	0,91
7				-0,31	1,36	0,83

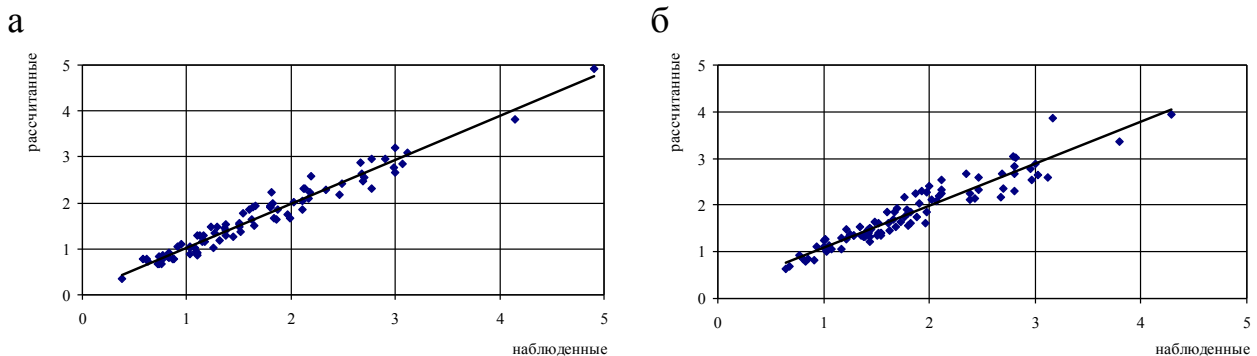


а – летне-осенняя; б – зимняя межень

Рисунок 5.8 – Карта районов однотипной зависимости $S_v = f(q)$

Величина коэффициента асимметрии C_s обычно определяется по отношению его с коэффициентом C_v . Для увлажненных районов (северная и центральная часть республики) рекомендуется принимать $C_s = 2 C_v$, а для более засушливых районов, каким является юг республики (Полесье) $C_s = 1,5 C_v$ [23].

Проверка полученных данных осуществлялась на независимых материалах и дала хорошие результаты. Отклонение фактических данных от рассчитанных составляет в среднем 5–20% (рисунок 5.9).



а – летне-осенняя; б – зимняя межень

Рисунок 5.9 – График рассчитанных и измеренных величин минимального стока

Разработанная методика сравнивалась с методикой Пособия П1-98 к СНиП, А.М. Владимирова, А.М. Норватова и К.А. Ключевой. Сравнение было проведено на независимых материалах наблюдений по 18 пунктам (летне-осенний и зимний минимальный сток), равномерно расположенным по территории Беларуси.

Данная методика позволяет определить минимальный сток рек Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений и дает приемлемые для практики результаты. Исследования показали возможность использования физически обоснованных методик расчета летне-осеннего и зимнего минимального стока неизученных рек, основанных на связи модуля стока с мощностью дренируемой рекой толщи почво-грунтов. Полученные модели могут использоваться для расчета не только минимальных расходов воды, но и для определения экологического стока.

Пример расчета

Расчет модуля минимального стока по приведенной методике выполняется по следующему алгоритму:

1. Определяется по карте местоположение изучаемой реки. В случае отсутствия изображения ее на карте местоположение определяется с помощью координат гидрологического створа или путем нахождения на карте других ориентиров, характеризующих ее положение (реки, принимающей ее; населенный пункт): р. Улла – с. Промыслы левый приток р. Западная Двина, координаты створа Промыслы $\varphi = 54^{\circ}59'$ с.ш. $\lambda = 29^{\circ}09'$ в.д.

2. Определяется по карте глубина эрозионного вреза $\Delta H = 50$ м.

3. Район находится по карте в соответствии с местоположением изучаемой реки, затем по таблице 5.1 находятся параметры модели соответствующие данному району. Район **I в**, модель:

$$q_{\min}^{л-о} = 0,03 \cdot \Delta H - 0,29, \quad q_{\min}^{л-о} = 0,03 \cdot 50 \text{ м} - 0,29 = 1,42 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$$

4. Для расчета коэффициента вариации по карте находим район, где расположена искомая река (район 2), по таблице 5.2 находим модель:

$$Cv = 0,71 - 0,17 \cdot q, \quad Cv = 0,71 - 0,17 \cdot 1,42 = 0,47$$

5. Коэффициент асимметрии $Cs = 2 Cv$, так как река лежит в увлажненном районе $Cs = 0,93$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты настоящей работы заключаются в следующем:

1. *Дана количественная оценка минимального стока рек Беларуси в современных условиях.* Для большинства исследуемых рек отмечается стабильная тенденция увеличения летне-осенних (73% исследуемых рек) и зимних (80%) минимальных расходов воды, при чем на большей части рек градиент изменения стока в зимний период больше чем в летне-осенний период. Наибольшие изменения произошли на Полесье (бассейн рр. Припять и Западный Буг), наименьшие – в бассейне р. Неман. Произошли изменения в наступлении дат наименьшего расхода воды в период открытого русла и зимнего периода. Эти смещения необходимо признать существенными и необходимо учитывать при разработке схем управления водными ресурсами.

2. *Установлена цикличность колебаний минимального стока рек Беларуси.* Выявлены как короткопериодичные 3–5-летние, так и длиннопериодичные 33-летние циклы.

3. *Выполнены районирования территории Беларуси.* По *синхронности колебаний* минимального стока рек на территории Беларуси выделено для летне-осеннего минимального стока 6 районов, для зимнего – 4 района. Внутрирайонные значения коэффициентов корреляции (0,54–0,63) указывают на синхронность колебаний минимального стока. Корреляционные связи между районами убывают с запада на восток, вплоть до появления асинхронности в колебаниях минимального стока. По *однородности условий формирования* минимального стока на территории Беларуси в летне-осеннюю межень выделено 2 района, в зимнюю 3 района. Первый район летне-осенней межени характеризуется наличием значимого пика на 4 и 8 году, а второй – на 5 году. Для первого района зимней межени отмечены значимые гармоника на 2 и 4 году, для второго – на 4 и 6 году, для третьего – значимый пик наблюдается на 2 году. Наиболее яркими и устойчивыми являются циклы продолжительностью 2, 4–6 и 8 лет. Модуль минимального стока уменьшается от первого района ко второму для летне-осенней и от первого к третьему для зимней межени, что закономерно в связи с умень-

шением общей увлажненности территории. Коэффициент вариации имеет обратную тенденцию, т.е. увеличение с севера на юг.

4. Разработана методика расчета минимального стока малых рек Беларуси при отсутствии данных гидрометрических наблюдений, которая основывается на связи модуля летне-осеннего и зимнего минимального стока ($q_{\min}^{л-о(з)}$) с глубиной эрозионного вреза русла реки (ΔH). В связи с большим разнообразием условий формирования минимального стока рек Беларуси были выделены однотипные районы ($q_{\min}^{л-о(з)} = f(\Delta H)$) (6 районов для летне-осенней межени и 3 района для зимней межени) и получены параметры модели для каждого из них. Территория районов оконтуривалась по границам смены гидрогеологических комплексов с учетом конфигурации бассейнов рек. Для расчета коэффициента вариации (Cv) выделены однотипные районы ($Cv = f(q_{\min}^{л-о(з)})$) (для летне-осеннего минимального стока выделено 3 района, а для зимнего – 7) и предложены параметры модели. Величина коэффициента асимметрии (Cs) для северной и центральной части Беларуси принята $2Cv$, а для южных районов (Полесье) $Cs = 1,5 Cv$. Проверка полученных данных дала хорошие результаты, отклонение фактических данных от рассчитанных составляет в среднем 5–20%. Использование предлагаемой методики в совокупности с другими позволит существенно уточнить величины минимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. Полученные модели могут использоваться для расчета не только минимальных расходов воды меженных периодов, но и для определения экологического стока.

5. Получены прогнозные оценки изменений минимального стока рек Беларуси для различных сценариев развития климата, которые необходимы для рационального использования речных вод:

- при увеличении средней годовой температуры на 2°C и неизменном количестве атмосферных осадков (**вариант 1**) существенного изменения летне-осеннего минимальный стока не произойдет и составит $\pm 2,5\%$;

- при уменьшении количества осадков на 10% и неизменной температуре воздуха (**вариант 2**) произойдет уменьшение летне-осеннего минимального стока на 15%. При этом максимальное уменьшение стока наблюдается в июне – июле на 20%;

– при уменьшении количества осадков на 10% и увеличение средней годовой температуры на 2°C (*вариант 3*) летне-осенний минимальный сток уменьшится на 20%;

– при уменьшении заболоченности и лесистости и увеличении густоты речной сети и распаханности (*вариант 4*) выявлена тенденция постепенного перехода от уменьшения стока в июне – июле к его увеличению в августе – октябре, при этом переход через критические значения изменений приходится на вторую половину июля.

Наиболее неблагоприятным прогнозом развития климата для рек Беларуси является *третий вариант* (уменьшение количества осадков на 10% и увеличение средней годовой температуры на 2°C), а при наложении хотя бы 10%-го антропогенного воздействия на водосбор реки уменьшение минимального стока может достигнуть 50%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амусья, А.З. О расчете среднего многолетнего значения минимального зимнего стока для неизученных рек / А.З. Амусьян, В.Г. Гутниченко, В.А. Шелутко // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоиздат, 1988. – Вып. 335. – С. 43–53.
2. Андерсон, А.Б. Внутриводная корреляция минимального стока рек земного шара / А.Б. Андерсон // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеоиздат, 1988. – № 20. – С. 92–104.
3. Андерсон, А.Б. О чередовании группировок лет различной водности в периоды низкого стока рек земного шара / А.Б. Андерсон, Н.П. Артемьева, В.В. Куприянов // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеоиздат, 1988. – № 20. – С. 69–92.
4. Андерсон, А.Б. Оценка стационарности многолетних колебаний низкого стока рек земного шара / А.Б. Андерсон, Н.П. Артемьева // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоиздат, 1988. – Вып. 335. – С. 161–175.
5. Андреев, В.Г. Внутриводное распределение речного стока / В.Г. Андреев. – Л. : Гидрометеоиздат, 1960. – 328 с.
6. Антонов, Н.Д. Минимальный сток рек Европейской части СССР / Н.Д. Антонов // Труды НИУ ГУГМС. – Л. : Гидрометеоиздат, 1941. – Сер. IV, вып. 2. – С. 23–26.
7. Антропогенное воздействие на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / отв. ред.: Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. – М. : Наука, 2003. – 367 с.
8. Артемьева, Н.П. Анализ циклических колебаний минимального зимнего стока рек Советского Союза / Н.П. Артемьева, В.В. Куприянов // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеоиздат, 1988. – № 20. – С. 104–114.
9. Баранов, В.А. Карты минимального стока рек Европейской территории СССР / В.А. Баранов, Л.Н. Попов // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоиздат, 1966. – Вып. 133. – С. 112–147.
10. Барышников, Н.Б. Методика долгосрочных прогнозов минимального стока, основанная на учете погодных условий / Н.Б. Барышников // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. – Л. : Гидрометеоиздат, 1959. – Т. 2. – С. 718–722.
11. Белецкий, С.С. Общий подземный сток БССР / С.С. Белецкий // Комплексное использование и охрана подземных вод БССР: сб. науч. тр. /

- Министерство геологии СССР, Бел. науч.-иссл. геологоразв. ин-т. – Минск, 1976. – С. 20–36.
12. Блакітная кніга Беларусі: Энцыклапедыя / Беларус. энцыкл.; рэдкал. Н.А. Дзісько [і інш.]. – Мінск : Беларуская энцыклапедыя, 1994. – 415 с.
 13. Боголюбов, С.Н. О роли подземного питания в годовом стоке рек и временных водотоков / С.Н. Боголюбов, З.П. Богомазова // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1956. – Вып. 52 (106). – С. 5–41.
 14. Бокс, Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – Вып. 1. – 406 с.
 15. Булавко, А.Г. Влияние осушения болот на элементы водного баланса рек Белорусского Полесья / А.Г. Булавко; под ред. В.В. Романова. – Л. : Гидрометеиздат. – 1961. – 151 с.
 16. Булавко, А.Г. Водорегулирующее значение болот и последствия их осушения / А.Г. Булавко, Б.С. Маслов // Гидротехника и мелиорация. – 1982. – № 8. – С. 53–56.
 17. Булавко, А.Г. Исследование тенденций речного стока в связи с динамикой лесистости и распаханности речных водосборов Нечерноземной зоны / А.Г. Булавко // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. – № 8. – С. 47–57.
 18. Булавко, А.Г. Состояние и перспектива исследований по оценке влияния осушения болот на водные Ресурсы Белоруссии / А.Г. Булавко // Тр. ГГИ. – Л., 1973. – Вып. 208. – С. 161–167
 19. Бычук, Г.В. Оценка понижения минимальных уровней воды на судоходных реках / Г.В. Бычук // Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР. – М., 1983. – Вопросы гидравлики и инженерной гидрологии. – С. 61–66.
 20. Вельнер, Х.А. Определение лимитирующего минимального расхода воды рек в интересах охраны водоемов от загрязнения и истощения / Х.А. Вельнер, А.Г. Каск // Экологические модели малых рек и водоемов: труды советско-датского симпозиума, Силькеборг, Дания, 14–19 июня 1981 г. / Гос. комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды; под ред. А.М. Никанорова [и др.] – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – С. 21–27.
 21. Владимиров, А.М. Минимальный сток рек СССР / А.М. Владимиров. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 214 с.
 22. Владимиров, А.М. Об «указаниях по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании» /

- А.М. Владимиров // Метеорология и гидрология. – 1967. – № 2. – С. 91–93.
23. Владимиров, А.М. Особенности формирования и расчет минимального стока малых рек СССР / А.М. Владимиров // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоздат, 1966. – Вып. 133. – С. 148–174.
 24. Владимиров, А.М. Связь минимального стока малых рек севера Европейской территории СССР с подземным питанием / А.М. Владимиров // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоздат, 1964. – Вып. 114. – С. 119–136.
 25. Владимиров, А.М. Сток рек в маловодный период года / А.М. Владимиров. – Л. : Гидрометеоздат, 1976. – 295 с.
 26. Водный кодекс Республики Беларусь: Закон Республики Беларусь, 13 июня 2007 г. № 238-З // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь, 2007 г. – № 147. – 2/1335.
 27. Водогрецкий, В.Е. Антропогенное изменение стока малых рек / В.Е. Водогрецкий. – Л. : Гидрометеоздат, 1990. – 176 с.
 28. Водогрецкий, В.Е. Оценка влияния агролесомелиоративных мероприятий на минимальный сток равнинных рек / В.Е. Водогрецкий, Г.В. Голофаст // Тр. ГГИ – Л. : Гидрометеоздат, 1978. – Вып. 255: Влияние хозяйственной деятельности на водные ресурсы и водный режим. – С. 69–76.
 29. Водогрецкий, В.Е. Оценка влияния агротехнических мероприятий на сезонный сток рек / В.Е. Водогрецкий // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоздат, 1981. – Вып. 273: Влияние хозяйственной деятельности на водные ресурсы и гидрологический режим. – С. 3–8.
 30. Войтов, И.В. Научные основы рационального управления и охраны водных ресурсов трансграничных рек для достижения устойчивого развития и эколого-безопасного водоснабжения Беларуси / И.В. Войтов. – Минск : Современное слово, 2000. – 476 с.
 31. Воложинская, А.С. Особенности оценки ограничения использования (изъятия) речных вод в Минской области на основе построения лимитирующих гидрографов стока / А.С. Воложинская // Водные ресурсы, 2006. – № 21. – С. 47–54.
 32. Волчек, А.А. Водные ресурсы Брестской области / А.А. Волчек, М.Ю. Калинин. – Минск : Изд. Центр БГУ, 2002. – 440 с.
 33. Волчек, А.А. Выбор репрезентативного периода для расчета характеристик минимального летне-осеннего стока / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Природные и антропогенные ландшафты Полесья:

- проблемы природопользования и охраны окружающей среды: материалы Республ. науч.-практ. конф., Брест, ноябрь 2003 г. / БООООБГО, Брест. обл. комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды; редкол.: С.В. Артеменко [и др.]. – Брест, 2003. – С. 50–55.
34. Волчек, А.А. Изменения дат наступления наиболее маловодных периодов на реках Беларуси в современных условиях / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Современные экологические проблемы устойчивого развития Полесского региона и сопредельных территорий: наука, образование, культура: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Мозырь, 26–27 сен. 2007 г. / Мозырь. гос. пед. университет; редкол.: В.В. Валетов [и др.]. – Мозырь, 2007. – С. 123–127.
35. 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; Институт географии РАН. – М., 2006. – 38 с.
36. Волчек, А.А. Колебания минимального летне-осеннего стока рек Беларуси в условиях различной антропогенной нагрузки / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Брестский географический вестник. – 2004. – Т. IV, вып. 1. – С. 35–38.
37. Волчек, А.А. Методика расчета минимального стока воды рек Беларуси при отсутствии данных наблюдений / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Водное хозяйство России. – 2008. – № 6. – С. 4–28.
38. Волчек, А.А. Многолетние колебания летне-осеннего минимального стока воды реки Неман / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Весн. Брэсцкага ун-та. Сер. прыродазнаўчых навук. – 2005. – № 2 (23). – С. 88–97.
39. Волчек, А.А. Пространственно-временные колебания минимального стока р. Припять / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Природная среда Полесья: особенности и перспективы развития: сб. науч. раб. / НАН Беларуси, Полесский аграрно-экологический институт; под общ. ред. Н.В. Михальчука. – Брест, 2006. – С. 405–412.
40. Волчек, А.А. Районирование территории Беларуси по изменению градиента атмосферных осадков / А.А. Волчек, Ан.А. Волчек, О.И. Грядунова // География в XXI веке: проблемы и перспективы развития: материалы междунар. науч.-практ. конф., Брест, 17–18 марта 2008 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина; редкол.: К.К. Красовский [и др.]. – Брест, 2008. – С. 8–10.

41. Волчек, А.А. Статистический метод при восстановлении гидрологических характеристик минимального летне-осеннего стока / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Брестский географический вестник. – 2003. – Т. III, вып. 2. – С. 27–29.
42. Волчек, А.А. Трансформации температуры воздуха на территории Беларуси в современных условиях / А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Наука, образование и культура: состояние и перспективы инновационного развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Мозырь, 27–28 марта 2008 г. / Мозыр. гос. пед. ун-т; редкол.: В.В. Валетов [и др.]. – Мозырь, 2008. – С. 23–25.
43. Гатило, П.Д. Об использовании предложений о минимально допустимом расходе воды в реках для охраны природы / П.Д. Гатило, И.М. Филиппович // Сб. науч. тр. – Минск, 1977. – Вып. 5: Комплексное использование водных ресурсов. – С. 45–53.
44. Геология Беларуси / А.С. Махнач [и др.]. – Минск : Ин-т геологических наук НАН Беларуси, 2001. – 815 с.
45. Герасименко, В.П. Влияние озер на минимальный сток рек западной Сибири / В.П. Герасименко // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – Вып. 188: Исследования подземного стока. – С. 305–311.
46. Герасименко, В.П. Применение множественной линейной корреляции к оценке факторов и расчета минимального стока / В.П. Герасименко // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1979. – Вып. 9. – С. 52–61.
47. Глушков, В.Г. Методы приближенного расчета стока при недостаточности гидрометрических данных / В.Г. Глушков // Труды II Всесоюзного Гидрол. Съезда. – Л. : Гидрометеиздат, 1929. – Ч. II. – С. 43–45.
48. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши // Государственный комитет по гидрометеорологии Республики Беларусь. Т. III. Часть 1: Реки и каналы. 2: Озера и водохранилища.
49. Гриневич, А.Г. Методика расчета лимитирующего гидрографа на основе многолетних данных о гидрологическом режиме / А.Г. Гриневич, Ю.Н. Емельянов, О.В. Шклянюк // Вестник БГУ. Серия 2, Химия, Биология, География. – 1998. – № 2. – С. 68–71.
50. Грядунова, О.И. Выделение гидрологически однородных районов зимнего минимального стока на основе анализа выборочных спектров / О.И. Грядунова // Материалы VIII Респ. межвузовской науч.-метод.

- конф. молодых ученых, Брест, 19 мая 2006 г. / Мин. об. РБ, Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина; под общ. ред. Б.М. Лепешко. – Брест, 2006. – С. 24–26.
51. Грядунова, О.И. Минимальный сток реки Мухавец / О.И. Грядунова // Материалы VII межвузовской науч.-метод. конф. молодых ученых, посвящ. 60-летию университета, Брест, 20 мая 2005 г. / Брест. гос. ун-т им. А.С. Пушкина; под общ. ред.: А.А. Горбацкого. – Брест, 2005. – С. 18–19.
52. Грядунова, О.И. Оценка влияния современных природно-климатических факторов на формирование минимального стока рек Беларуси / О.И. Грядунова // Молодежь в науке – 2007: прил. к журн. Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. Фізико-матэматычных наук. – 2007. – С. 382–387.
53. Грядунова, О.И. Районирование территории Беларуси по синхронности колебаний летне-осеннего минимального стока / О.И. Грядунова // Известия НАН Беларуси. Сер. Биологических наук. – 2005. – № 5/1. – С. 73–75.
54. Гуревич, М.И. Локальный и обобщенный способы предсказания летне-осеннего стока рек северо-запада СССР / М.И. Гуревич // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1962. – Вып. 97. – С. 138–204.
55. Гутниченко, В.Г. Районирование территории севера ЕЧС по условиям формирования минимального стока рек способом факторного анализа / В.Г. Гутниченко, Е.И. Седов // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – Вып. 335: Исследования подземного стока. – С. 36–42.
56. Данович, Д.А. Анализ минимального стока и обуславливающих его факторов на примере рек Белорусской ССР / Д.А. Данович // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1950. – Вып. 27 (81). – С. 96–130.
57. Дрозд, В.В. Анализ однородности гидрологических рядов: методические рекомендации / В.В. Дрозд. – Минск, 1985. – 40 с.
58. Дрозд, В.В. Изменение водности Припяти при гидромелиорации / В.В. Дрозд, С.Н. Маркова // Сб. науч. тр. / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР. – М., 1990. – Вопросы рационального использования водных ресурсов. – С. 5–12.
59. Дрозд, В.В. О карсте в Белоруссии / В.В. Дрозд // Известия Всесоюзного географического общ-ва, 1964. – № 1. – С. 23–30.

60. Дрозд, В.В. Подземное питание рек в бассейне Немана / В.В. Дрозд // Комплексное использование и охрана водных ресурсов: сб. науч. тр. – Минск, 1968. – С. 90–96.
61. Дрозд, В.В. Статистический анализ изменений речного стока после мелиорации / В.В. Дрозд, Г.В. Бычук // Комплексное использование водных ресурсов: сб. науч. тр. – Минск, 1976. – Вып. 4. – С. 30–35.
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. 24–28.
63. Емельянов, Ю.Н. Ресурсы малых рек источник повышения устойчивости систем водоснабжения / Ю.Н. Емельянов, А.Г. Гриневич, Т.С. Масленникова // Вестник БГУ. Серия 2, Химия, Биология, География. – 1997. – № 1. – С. 68–71.
64. Жук, П.Л. Оценка синхронности многолетних колебаний годового стока на основе анализа корреляционной матрицы / П.Л. Жук, В.А. Скорняков // Расчеты речного стока (Методы пространственного обобщения). – М. : Изд. МГУ, 1984. – С. 6–21.
65. Жукинский, В.Н. Экологический риск и экологический ущерб качеству поверхностных вод: актуальность, терминология, количественная оценка / В.Н. Жукинский // Водные ресурсы. – 2003. – Т. 30, № 2. – С. 213–221.
66. Задорожная, Р.Г. О влиянии средней высоты бассейна и глубины вреза на минимальный сток в бассейне Тисы / Р.Г. Задорожная // Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР. – М., 1975. – Вып. 3: Комплексное использование водных ресурсов. – С. 107–115.
67. Заруцкая, И.П. Картографирование природных условий и ресурсов / И.П. Заруцкая. – М. : Недра, 1988. – 299 с.
68. Зекцер, И.С. Гидрогеологические условия подземного стока в реки северо-запада европейской территории СССР / И.С. Зекцер // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1963. – № 3. – С. 73–84.
69. Зекцер, И.С. Опыт изучения подземного стока на примере бассейна Западной Двины (Даугавы) / И.С. Зекцер, А.П. Лавров, О.В. Попов // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1966. – Вып. 133: Исследования подземного стока в реки. – С. 42–57.

70. История и современное состояние географического изучения Белоруссии / Б.Н. Гурский [и др.]. – Минск : Университетское, 1988. – 156 с.
71. Кайсл, Ч. Анализ временных рядов гидрологических данных / Ч. Кайсл. – Л. : Гидрометеиздат, 1972. – 138 с.
72. Калинин, Г.П. Циклические колебания стока рек Северного полушария / Г.П. Калинин, А.И. Давыдова // Проблемы речного стока. – М. : Изд-во Московского ун-та, 1968. – С. 9–22.
73. Картвелишвили, Н.А. Стохастическая гидрология / Н.А. Картвелишвили. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 167 с.
74. Климат Беларуси / под ред. В.Ф. Логинова. – Минск : Ин-т геологических наук АН Беларуси, 1996. – 234 с.
75. 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.
76. 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.
77. Клюева, К.А. Районирование территории БССР по однотипным условиям формирования минимального стока рек / К.А. Клюева // Сб. работ по гидрологии. – Л. : Гидрометеиздат, 1961. – № 2. – С. 131–136.
78. Коваль, А.Х. Минимальный сток рек б. Западной области / А.Х. Коваль // Труды НИУ – М. – Л. : Гидрометеиздат, 1941. – Сер. VIII, Вып. 3: Вопросы речного стока. – С. 32–41.
79. Коронкевич, Н.И. Современные антропогенные воздействия на водные ресурсы / Н.И.Коронкевич // Известия РАН. Серия географическая. – 1998. – № 5. – С. 55–67.
80. Кочерин, Д.И. Низкие и наименьшие расходы воды рек Европейской части СССР / Д.И. Кочерин // Труды Московск. ин-та инженеров транспорта. – М., 1929. – Вып. XI. – С. 23–30.
81. Куделин, Б.И. Подземный сток на территории СССР / Б.И. Куделин. – М. : Изд-во Московского университета, 1966. – 303 с.
82. Кузин, П.С. Циклические колебания стока рек северного полушария / П.С. Кузин. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 179 с.
83. Курганова, Н.М. Связь летне-осеннего стока рек бассейна р. Припять с физико-географическими факторами / Н.М. Курганова // Вопросы водного хозяйства / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР, ЦНИИКИВР. – Минск : Ураджай, 1976. – Вып. 2. – С. 79–83.

84. Курдов, А.Г. Минимальный сток рек (основные закономерности формирования и методы расчета) / А.Г. Курдов. – Воронеж : ВГУ, 1970. – 252 с.
85. Лихацевич, А.П. Мелиорация земель в Беларуси / А.П. Лихацевич, А.С. Мееровский, Н.К. Вахонин. – Минск : БелНИИМиЛ, 2001. – 308 с.
86. Логинов, В.Ф. Водный баланс речных водосборов Беларуси / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек. – Минск : Тонпик, 2006. – 160 с.
87. Логинов, В.Ф. Изменения климата Беларуси и их последствия / В.Ф. Логинов, Г.И. Сачок, В.С. Микуцкий. – Минск : Тонпик, 2003. – 330 с.
88. Логинов, В.Ф. Причины и следствия климатических изменений / В.Ф. Логинов. – Минск: Навука і тэхніка, 1992. – 319 с.
89. 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 : ОДО «Тонпик», 2003. – Вып. 9. – С. 25–33.
90. Логинов, В.Ф. Сравнительная характеристика многолетних колебаний летне-осеннего и зимнего минимального стока реки Неман / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек, О.И. Грядунова // Природные ресурсы. – 2005. – № 3. – С. 13–21.
91. Лысенко, К.А. Минимальный сток рек Украины и Молдавии / К.А. Лысенко // Труды УкрНИГМИ. – Киев, 1966. – Вып. 64. – С. 143–154.
92. Львович, М.И. Человек и воды. Преобразование водного баланса и речного стока / М.И. Львович. – М. : Географгиз, 1963. – 568 с.
93. Макаренко, Ф.А. О подземном питании рек / Ф.А. Макаренко // Труды лабор. гидрогеол. проблем АН СССР, Т. 1. – 1948 а. – С. 67–71.
94. Маркин, В.Н. Определение экологически допустимого воздействия на малые реки / В.Н. Маркин // Оценка экологически допустимого воздействия на малые реки [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://www.msuee.ru/kmirz/Htmls4/Markin/DopVozd.htm>. – Дата доступа: 04.05.2005.
95. Матвеев, А.В. Рельеф Белоруссии / А.В. Матвеев, Б.Н. Гурский, Р.И. Левицкая – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – 319 с.
96. Международное руководство по методам расчета основных гидрологических характеристик. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. – 247 с.

97. Мезенцев, В.С. Метод гидролого-климатических расчетов и опыт его применения для Западно-Сибирской равнины по признакам увлажненности и теплообеспеченности / В.С. Мезенцев // Тр. Омского с.х. ин-та. – Омск, 1957. – Т. 27. – С. 59–66.
98. Мелиорация: энциклопедический справочник / под ред. А.И. Мурашко. – Минск: Белорусская советская энциклопедия, 1984. – 567 с.
99. Народецкая, Р.Я. К расчету меженного и минимального стока рек летнего периода при проектировании мелиоративных мероприятий на территории центрального района РСФСР / Р.Я. Народецкая // Сб. работ по гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – № 9. – С. 177–180.
100. Норватов, А.М. Минимальный сток малых рек в связи с подземным питанием / А.М. Норватов // Тр. ГГИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1950. – Вып. 27 (81). – С. 58–85.
101. Норватов, А.М. Минимальный сток малых рек Европейской территории СССР / А.М. Норватов // Тр. ГГИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – Вып. 52 (106). – С. 42–74.
102. Норватов, А.М. О долгосрочном территориальном прогнозе водности летней межени / А.М. Норватов // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – Т. 2. – С. 722–730.
103. Норватов, А.М. Условия формирования летнего меженного стока рек Прибалтики и прогноз водности их с большой заблаговременностью / А.М. Норватов // Тр. ГГИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – Вып. 97. – С. 204–242.
104. Общие подходы к оценке и достижению гидроэкологической безопасности речных бассейнов / Н.И. Алексеевский [и др.]. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2000. – № 1. – С. 22–28.
105. Оппоков, Е.В. О водоносности рек в связи с атмосферными осадками и другими факторами стока / Е.В. Оппоков // Записки Имп. Р. Геогр. Общ. по общ. геогр., 1911. – Т. XLVII. – С. 545–622.
106. Орлов, В.Г. К вопросу оценки экологически допустимого воздействия на речные экосистемы // В.Г. Орлов / Ученые записки – СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. – № 5. – С. 105–110.
107. Петлицкий, Е.Е. Зависимость характеристик минимального летне-осеннего стока от физико-географических факторов / Е.Е. Петлицкий // Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР / Министерство мелиорации и водного хоз-ва

- СССР. – М., 1990. – Вопросы рационального использования водных ресурсов. – С. 12–15.
108. Петлицкий, Е.Е. Изменение минимального стока в створах городов Белоруссии / Е.Е. Петлицкий // Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР. – М., 1988. – Вопросы рационального использования водных ресурсов – С. 54–61.
109. Попов, О.В. Подземное питание рек / О.В. Попов. – Л. : Гидрометеиздат, 1968. – 290 с.
110. Пособие П1-98 к СНиП 2.01.14-83 «Определение расчетных гидрологических характеристик». – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2000. – 174 с.
111. Природная среда Беларуси / под ред. В.Ф. Логинова; НАН Беларуси. Ин-т пробл. Использования природ. ресурсов и экологии. – Минск : НОООО «БИП-С», 2002. – 424 с.
112. Пузаченко, Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях / Ю.Г. Пузаченко. – М. : Академия, 2004. – 416 с.
113. Распопов, М.П. Районирование подземных вод равнины Европейской части СССР по условиям их стока в реки / М.П. Распопов // Тр. ГГИ. – Л., 1950. – Вып. 27 (81). – С. 5–56.
114. Раткович, Д.Я. О восстановлении коротких рядов стока по аналогам / Д.Я. Раткович // Водные ресурсы, 1983. – № 5. – С. 26–44.
115. Рахманов, В.В. Влияние лесов на водность в бассейне верхней Волги / В.В. Рахманов // Труды Гирдометцентра СССР, 1971. – Вып. 88. – С. 174.
116. Рахманов, В.В. Речной сток и агротехника / В.В. Рахманов // Труды Гирдометцентра СССР, 1973. – Вып. 114. – С. 199.
117. Ревера, О.З. Осушение болот, заболоченных и переувлажненных земель и речной сток / О.З. Ревера, А.В. Яцык // Сб. науч. тр. / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР. – М., 1986. – Вопросы рационального использования водных ресурсов. – С. 54–61.
118. Ремизова, Л.К. Долгосрочный прогноз минимального и сезонного стока р. Неман за летне-осенний период / Л.К. Ремизова // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1962. – Вып. 97. – С. 243–260.
119. Ресурсы поверхностных вод СССР – Л. : Гидрометеиздат, 1966. – Т. 5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье; Ч. 1, 2: Основные гидрологические характеристики. – 720 с.

120. Рождественский, А.В. Статистические методы в гидрологии / А.В. Рождественский, А.И. Чеботарев. – Л. : Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
121. Сакович, В.М. Исследование роли эрозионного вреза в формировании минимального стока рек (на примере рек бассейна р. Шелони) / В.М. Сакович // 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. 45–48.
122. Сачок, Г.И. Пространственно-временная структура гидрометеорологического режима Белоруссии и прилегающих регионов / Г.И. Сачок. – Минск : Наука и техника, 1980. – 221 с.
123. Сибирцева, Л.А. Минимальный сток и его распределение на территории Европейской части СССР / Л.А. Сибирцева // Исследование рек СССР. – Л., 1937. – Вып. 10. – С. 105–127.
124. Соколов, А.А. Влияние озерного регулирования на величину минимального стока рек / А.А. Соколов // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеиздат, 1954. – Вып. 43 (97). – С. 175–182.
125. Соколов, А.А. Очерки развития гидрологии в СССР / А.А. Соколов, А.И. Чеботарев. – Л. : Гидрометеиздат, 1970. – 310 с.
126. Сотченко, О.М. Минимальный сток рек УССР / О.М. Сотченко, Г.О. Чиппинг // Гидрологические расчеты. – Киев, 1947. – С. 23–30.
127. Фащевский, Б.В. Обоснование и оценка допустимых изъятий речного стока / Б.В. Фащевский // Сб. науч. тр. ЦНИИКИВР / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР. – М., 1982. – Влияние хозяйственной деятельности на водный режим. – С. 62–71.
128. Фащевский, Б.В. Основы экологической гидрологии / Б.В. Фащевский. – Минск : Экоинвест, 1996. – 240 с.
129. Фащевский, Б.В. Расчет экологически допустимого изменения характеристик водного режима рек Беларуси / Б.В. Фащевский // Природные ресурсы. – 1987. – № 1. – С. 30–35.
130. Федоров, В.В. Долгосрочные прогнозы гарантированных минимальных навигационных расходов и уровней / В.В. Федоров // Труды III Всесоюзного гидрологического съезда. – Л., 1959. – Т. 2. – С. 640–649.
131. Филиппович, И.М. О минимальных расходах рек средних за маловодные периоды различной длин / И.М. Филиппович // Комплексное использование водных ресурсов. – Минск, 1975. – Вып. 3. – С. 87–92.

132. Фомченков, А.К. Пространственно-временная изменчивость стока рек Европы / А.К. Фомченков // Водные ресурсы, 1980. – № 6. – С. 52–63.
133. Чеботарев, А.И. Гидрологический словарь / А.И. Чеботарев. – Л. : Гидрометеоиздат, 1970. – 306 с.
134. Чеботарев, Н.П. Теория и метод определения минимального стока / Н.П. Чеботарев // Труды Всесоюз. Совещ. по изучению стока, регулированию стока и зимнему режиму. – М., 1954. – С. 34–38.
135. Шаров, Д.Г. О коэффициенте подземного стока на территории Европейской части Союза ССР / Д.Г. Шаров // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоиздат, 1965. – Вып. 122. – С. 217–225.
136. Швец, Г.И. Выдающиеся гидрологические явления на юго-западе СССР / Г.И. Швец. – Л. : Гидрометеоиздат, 1972. – 243 с.
137. Шебеко, В.Ф. Влияние осушительных мелиораций на водный режим территорий / В.Ф. Шебеко. – Минск : Ураджай, 1983. – 200 с.
138. Шевелев, М.Э. Метод расчета обеспеченных минимумов речного стока / М.Э. Шевелев. – Метеорология и гидрология, 1937. – № 8. – С. 39–44.
139. Шелутко, В.А. Оценка вероятности серий маловодных лет подземного притока в реки севера ЕЧС / В.А. Шелутко, Т.И. Речнова // Тр. ГГИ. – Л. : Гидрометеоиздат, 1988. – Вып. 335: Исследования подземного стока. – С. 27–35.
140. Шикломанов, И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток / И.А. Шикломанов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1989. – 334 с.
141. Шкляр, А.Х. Климатические ресурсы Белоруссии и использование их в сельском хозяйстве / А.Х. Шкляр. – Минск : Вышэйшая школа, 1973. – 432 с.
142. Энцыклапедыя прыроды Беларусі: у 5-і т. / рэдкал.: І.П. Шамякін [і інш.] – Мінск : Беларус. Сав. Энцыклапедыя, 1983–1986. – Т. 5.
143. Юркевич, И.Д. Влияние леса на водный режим малых рек Белорусского Полесья / И.Д. Юркевич, Н.Ф. Ловчий, Э.П. Ярошевич // Лесоведение. – 1976. – № 5. – С. 3–11.
144. Якушко, О.Ф. Озероведение: география озер Белоруссии / О.Ф. Якушко. – Минск : Вышэйшая школа, 1981. – 223 с.
145. Ясинский, С.В. Геоэкологический анализ антропогенных воздействий на водосборы малых рек / С.В. Ясинский // Известия АН. Сер. геогр. – 2000. – № 4. – С. 74–82.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты исследований однородности временных рядов

Таблица А 1 – Список рек-створов с однородными временными рядами

Летне-осенний минимальный сток	Зимний минимальный сток
Западная Двина – г. Витебск	Западная Двина – с. Здравнево
Западная Двина – г. Полоцк	Западная Двина – г. Витебск
Овсянка – с. Веречье	Западная Двина – г. Полоцк
Лужесьянка – с. Борково	Овсянка – с. Веречье
Лучеса – с. Кузьменцы	Каспля – с. Лепино
Улла – с. Промыслы	Лужесьянка – с. Борково
Оболь – пгт. Оболь	Лучеса – с. Кузьменцы
Усыса – с. Казиново	Кривинка – с. Добригоры
Полота – с. Яново 1-е	ручей б/н – г. Сенно
Ушача – с. Толкачи	Эсса – с. Гадивля
Дисна – с. Козяны	Усвейка – с. Загатье
Дисна – пгт. Шарковщина	Оболь – пгт. Оболь
Дисна – с. Пазики	Полота – с. Яново 1-е
Березовка – с. Саутки	Ушача – с. Толкачи
Дрисса – с. Демехи	Дисна – с. Козяны
Дрисса – с. Дерновичи	Дисна – пгт. Шарковщина
Свольна – с. Пользино	Дисна – с. Пазики
Неман – г. Столбцы	Дрисса – с. Демехи
Неман – с. Белица	Дрисса – с. Дерновичи
Неман – пгт. Мосты	Свольна – с. Пользино
Неман – г. Гродно	Неман – г. Столбцы
Перепуть – с. Городище	Неман – с. Белица
Уша – с. Большие Жуховичи	Неман – пгт. Мосты
Березина – с. Неровы	Неман – г. Гродно
Ольшанка – с. Богданово	Перепуть – с. Городище
Ислочь – с. Боровиковщина	Уша – с. Большие Жуховичи
Гавья – с. Лубинята	Невда – с. Валевка
Щара – с. Залужье	Березина – с. Неровы
Щара – г. Слоним	Ислочь – с. Боровиковщина
Щара – с. Великая Воля	Гавья – с. Лубинята
Гривда – гпт. Ивацевичи	Жижма – с. Гельвицы
Зельвянка – с. Пески	Дитва – с. Поречаны
Россь – с. Студенец	Молчадь – с. Молчадь
Котра – пгт. Сахкомбинат	Щара – с. Залужье
Невища – с. Пиловня	Щара – с. Доманово
Скиделька – г. Скидель	Щара – г. Слоним
Виляя – с. Стешницы	Щара – с. Великая Воля
Виляя – ст. Залесье	Мышанка – Березки
Виляя – с. Михалишки	Гривда – гпт. Ивацевичи

Продолжение таблицы А 1

Сервечь – с. Кривичи	Зельвянка – с. Пески
Илия – с. Владыки	Россь – с. Студенец
Илия – с. Щуки	Свислочь – с. Сухая Долина
Рыбчанка – пгт. Радошковичи	Невища – с. Пиловня
Нарочь – с. Нарочь	Скиделька – г. Скидель
Ошмянка – с. Солы	Вилия – с. Стешицы
Ошмянка – с. Великие Яцыны	Вилия – г. Вилейка
Лесная – с. Тюхиничи	Вилия – ст. Залесье
Днепр – г. Орша	Вилия – с. Михалишки
Днепр – г. Могилев	Сервечь – с. Кривичи
Днепр – г. Жлобин	Илия – с. Владыки
Днепр – г. Речица	Илия – с. Щуки
Россасенка – с. Козьяны	Рыбчанка – пгт. Радошковичи
Друть – с. Городище	Гуйка – пгт. Радошковичи
Ржавка – с. Черная Вирня	Удранка – х. Удранка
Добысна – с.Малевичская Рудня	Нарочь – с. Нарочь
Березина – с. Березино Липское	ручей б/н – с. Проньки
Березина – г. Борисов	ручей б/н – с. Купа
Березина – пгт. Березино	Скема – с. Никольцы (Микольцы)
Березина – г. Бобруйск	Уша – г. Молодечно
Березина – с. Шатилки	Ошмянка – с. Солы
Сха – Житьково	Мухавец – г. Брест
Плисса – с. Трубенки	Рыта – с. Малые Радваничи
Бобр – с. Куты	Лесная – с. Замосты
Бобр – с. Клыпенка	Лесная – с. Тюхиничи
Волма – с. Корзуны	Пульва – г. Высокое
Волма – х. Заберезянка	Нарев – ур. Немержа
Ола – с. Михалево	Рудавка – с. Рудня
Ведрич – с. Демехи	Днепр – г. Могилев
Сож – г. Кричев	Днепр – г. Жлобин
Сож – г. Славгород	Ухлясть – пос. Радьков
Сож – г. Гомель	Друть – с. Городище
Вихра – г. Красный Берег	Друть – с. Румок
Остер – с. Ходунь	Добысна – с.Малевичская Рудня
Сенна – с. Пильня	Березина – с. Березино Липское
Проня – с. Будино	Березина – г. Борисов
Проня – с. Летяги (х. Яскарь)	Березина – пгт. Березино
Бася – с. Хильковичи	Березина – г. Бобруйск
Уть – с. Прибытки	Гайна – с. Гайна
Верхняя Брагинка – с. Рудня Журавлевка	Плисса – с. Трубенки
Припять – с. Коробы	Плисса – с. Залесье
Припять – пгт. Туров	Бобр – с. Куты
Припять – г. Мозырь	Бобр – с. Клыпенка
Меречанка – с. Красеево	Уша – с. Слобода

Окончание таблицы А 1

Морочь – с. Мацкевичи	Свислочь – с. Заречье
Птичь – с. Русаковщина	Волма – с. Корзуны
Птичь – ст Кринка (Комарино)	Волма – х. Заберезянка
Птичь – с. Холопеничи	Грава – с. Аминовичи
Тремля – с. Дуброва	Ола – с. Михалево
Иппа – с. Кротов	Сож – г. Кричев
Свиновод – с. Симоничи	Сож – г. Славгород
Сколодина – Сколодино	Сож – г. Гомель
Птичь – с. Лецковщина	Проня – с. Будино
Друть – Чигиринская ГЭС	Проня – с. Летяги (х. Яскарь)
Плисса – с. Залесье	Припять – пгт. Туров
Вяча – с. Паперня	Ясельда – с. Хорево
Осиповка – с. Петровичи	Жегулянка – с. Нехачево
Рыта – с. Малые Радваничи	Меречанка – с. Красеево
Нача – с. Горовцы	Горынь – пгт. Речица
Щара – с. Доманово	Морочь – с. Мацкевичи
	кан. Бычок – с. Озераны
	Сколодина – с. Сколодино
	Птичь – с. Русаковщина
	Птичь – ст Кринка (Комарино)
	Птичь – с. Холопеничи
	Птичь – с. Лучицы
	Шать – с. Шацк
	Тремля – с. Дуброва
	Иппа – с. Кротов
	Вымянка – с. Пивовары
	Улла – Лепельская ГЭС (г. Лепель)
	Янка – с. Куштали
	Нарочь – Черемшицы
	Случь – с. Старобин

Таблица А 2 – Список рек-створов с неоднородными временными рядами

Река – створ	Подтверждение гипотезы об однородности ряда	
	Критерий Стьюдента, t	Критерий Фишера, F
Летне-осенний минимальный сток		
Улла – Лепельская ГЭС	да	нет
Оболь – с. Ломоносово	да	нет
Мяделка – с. Русаки	да	нет
Нища – с. Соколище	да	нет
Жижма – с. Гельвицы	нет	да
Дитва – с. Поречаны	да	нет

Продолжение таблицы А 2

Молчадь – с. Молчадь	нет	да
Нарочь – с. Черемшицы	да	нет
Уша – г. Молодечно	да	нет
Копаявка – с. Черск	нет	да
Мухавец – г. Пружаны	нет	да
Мухавец – г. Брест	да	нет
Жабинка – с. Малая Жабинка	нет	да
Малорыта – г. Малорита	да	нет
Лесная – с. Замосты	нет	да
Пульва – г. Высокое	нет	да
Ухлясть – пос. Радьков	нет	да
Сушанка – с. Суша	да	нет
Реста – с. Сухари	нет	да
Покоть – с. Красный Дубок	нет	да
Жадунька – с. Костюковичи	нет	да
Уза – с. Прибор	да	нет
Неслуха – с. Рудск	нет	да
Ясельда – г. Береза	нет	да
кан. Винец – с. Рыгали	нет	да
Лань – с. Локтыши	нет	да
Случь – с. Новодворцы	нет	да
Случь – с. Клепчаны	нет	да
Шать – с. Шацк	нет	да
Оресса – пгт. Любань	нет	да
Словечна – с. Кузьмичи	нет	да
Чертень – с. Некрашевка	нет	да
Эсса – с. Гадивля	нет	нет
Мышанка – с. Березки	нет	нет
Свислочь – с. Сухая Долина	нет	нет
Вилия – г. Вилейка	нет	нет
кан. Ореховский – с. Маленково	нет	нет
Нарев – ур. Немержа	нет	нет
Ведрич – х. Бабичи	нет	нет
Чечера – с. Дербичи	нет	нет
Беседь – с. Бельковичи	нет	нет
Беседь – с. Светиловичи	нет	нет
Терюха – с. Грабовка	нет	нет
Ясельда – с. Хорево	нет	нет
Ясельда – с. Сенин	нет	нет
Жегулянка – с. Нехачево	нет	нет
Бобрик – с. Парохонск	нет	нет
Цна – с. Дятловичи	нет	нет
Горынь – пгт. Речица	нет	нет
Лань – с. Мокрово	нет	нет

Продолжение таблицы А 2

Случь – с. Старобин	нет	нет
Случь – с. Ленин	нет	нет
кан. Бычок – с. Озераны	нет	нет
Уборть – с. Краснобережье	нет	нет
Оресса – с. Верхутино	нет	нет
Оресса – с. Андреевка	нет	нет
Вить – с. Борисовщина	нет	нет
Зимний минимальный		
Улла – с. Промыслы	нет	да
Усыса – с. Казиново	нет	да
Нача – с. Горовцы	нет	да
Мяделка – с. Русаки	нет	да
Березовка – с. Саутки	нет	да
Нища – с. Соколище	нет	да
Волта – с. Ильмовики	да	нет
Ольшанка – с. Богданово	да	нет
ручей б/н – с. Урлики	да	нет
Ошмянка – с. Великие Яцыны	нет	да
Копаявка – с. Черск	нет	да
Мухавец – г. Пружаны	нет	да
кан. Ореховский – с. Маленково	нет	да
Жабинка – с. Малая Жабинка	нет	да
Осиповка – с. Петровичи	нет	да
Малорыта – г. Малорита	да	нет
Днепр – г. Орша	нет	да
Друть – Чигиринская ГЭС	нет	да
Свислочь – с. Теребуты	нет	да
Ведрич – х. Бабичи	нет	да
Ведрич – с. Демехи	нет	да
Ивня-Бонда (канавы) – с. Будки	нет	да
Белая Натопы – с. Писаревщина	нет	да
Остер – с. Ходунь	нет	да
Лобжанка – с. Поля	нет	да
Сенна – с. Пильня	нет	да
Реста – с. Сухари	нет	да
Чечера – с. Дербичи	да	да
Покоть – с. Красный Дубок	нет	да
Беседь – с. Бельковичи	нет	да
Беседь – с. Светиловичи	нет	да
Жадунька – с. Костюковичи	нет	да
Уть – с. Прибытки	нет	да
Терюха – с. Грабовка	нет	да
Верхняя Брагинка – с. Рудня Журавлевка	нет	да
Припять – с. Коробы	нет	да
Припять – г. Мозырь	нет	да
Ясельда – г. Береза	нет	да
Ясельда – с. Сенин	нет	да

Окончание таблицы А 2

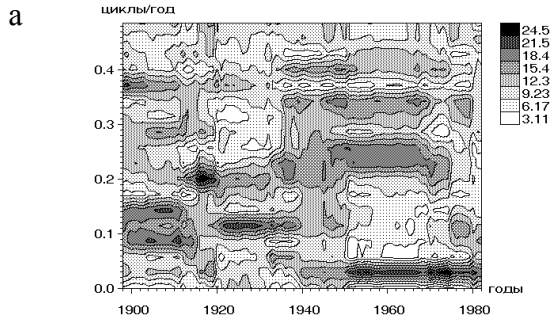
кан. Винец – с. Рыгали	нет	да
Бобрик – с. Парахонск	нет	да
Цна – с. Дятловичи	нет	да
Лань – с. Локтыши	нет	да
Лань – Мокрово	нет	да
Случь – с. Новодворцы	нет	да
Случь – Клепчаны	нет	да
Случь – с. Ленин	нет	да
Уборть – с. Краснобережье	нет	да
Оресса – пгт. Любань	нет	да
Оресса – с. Андреевка	нет	да
Закованка – с. Гулевичи	нет	да
Вить – с. Борисовщина	нет	да
Словечна – с. Кузьмичи	нет	да
Батывля – с. Кузьмичи	нет	да
Чертень – с. Некрашевка	нет	да
Днепр – г. Речица	нет	нет
Россасенка – с. Козьяны	нет	нет
Свислочь – Осиповичская ГЭС	нет	нет
Вяча – с. Паперня	нет	нет
Сушанка – с. Суша	нет	нет
Проня – г. Горки	нет	нет
Поросица – г. Горки	нет	нет
Уза – с. Прибор	нет	нет
Оресса – с. Верхутино	нет	нет

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты спектрально-временного анализа

Летне-осенний минимальный сток

Зимний минимальный сток



б

в

г

д

е

ж

и

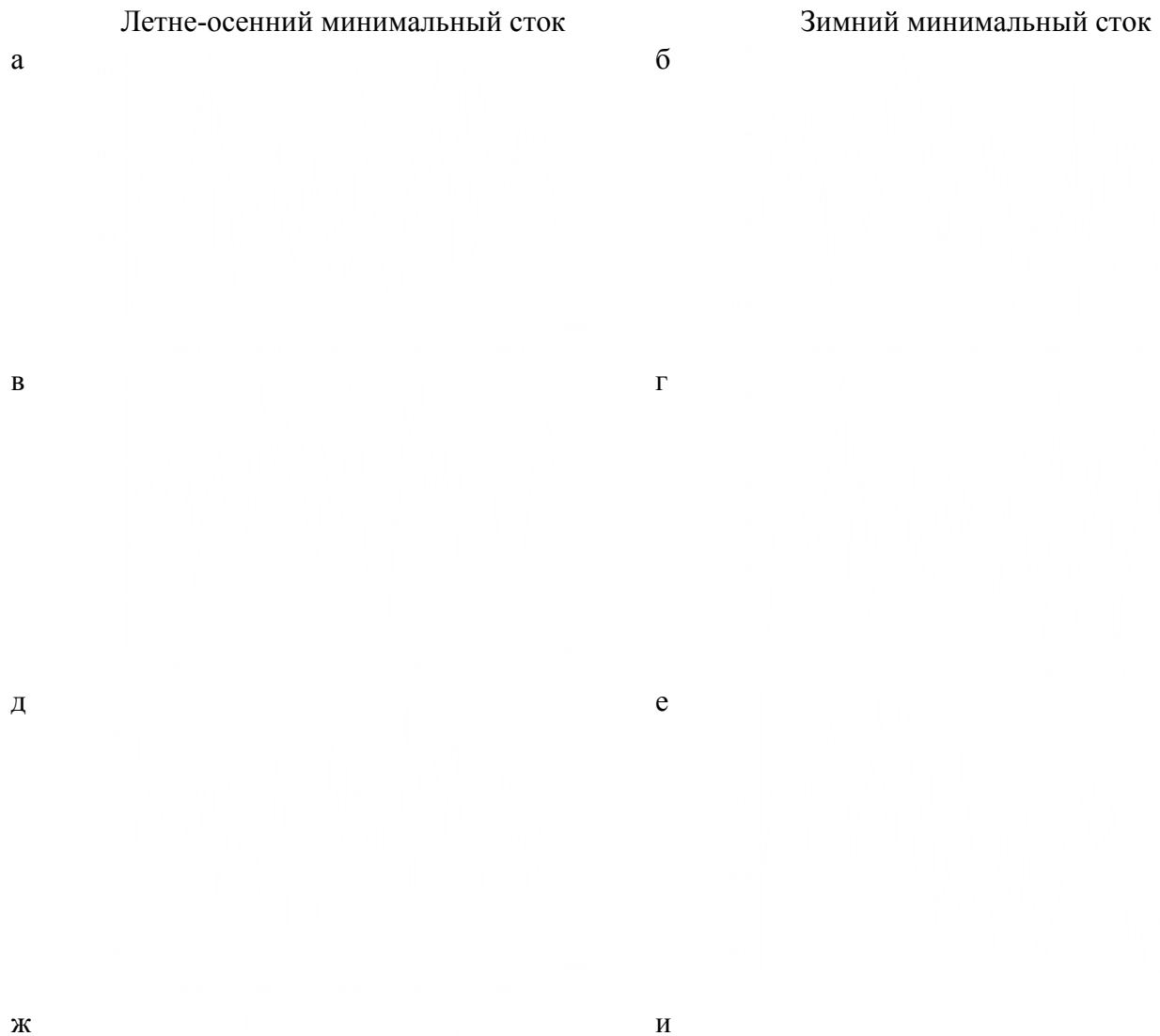
а, б – Западная Двина – г. Полоцк; в, г – Дисна – г.п. Шарковщина; д, е – Щара – г. Слоним; ж, и – Виляя – с. Михалишки

Рисунок Б 1 – СВАН-диаграммы временных рядов минимальных расходов воды

а	Летне-осенний минимальный сток	б	Зимний минимальный сток
в		г	
д		е	
ж		и	
к		л	

а, б – Мухавец – г. Брест; в, г – Днепр – г. Орша; д, е, – Березина – г. Бобруйск;
ж, и – Сож – г. Гомель; к, л – Птичь – с. Лучицы

Рисунок Б 2 – СВАН-диаграммы временных рядов минимальных расходов воды



а, б – Западная Двина – г. Полоцк; в, в – Дисна – г.п. Шарковщина; д, е – Щара – г. Слоним; ж, и – Вилия – с. Михалишки

Рисунок Б 3 – Распределение параметра хаотизации временных рядов минимальных расходов воды

Летне-осенний минимальный сток

Зимний минимальный сток

а

б

в

г

д

е

ж

и

к

л

а, б – Мухавец – г. Брест; в, г – Днепр – г. Орша; д, е, – Березина – г. Бобруйск; ж, и – Сож – г. Гомель; к, л – Птичь – с. Лучицы

Рисунок Б 4 – Распределение параметра хаотизации временных рядов минимальных расходов воды

Таблица Б 1 – Цикличность временных рядов минимальных расходов воды рек Беларуси (СВАН-анализ)

Река – створ	Размах колебаний	Амплитуда	Годы	Циклы	Преобладающие амплитуды
Западная Двина – г. Витебск	2,20–16,90	14,70	1888–1914	11	14,8
			1912–1920	5	14,8
			1920–1939	8	16,9
			1940–1976	33	12,7
			1948–1974	4	12,7
Западная Двина – г. Полоцк	3,11–24,50	21,39	1900–1914	11	18,4
			1916–1920	5	24,5
			1922–1930	9	21,5
			1946–1972	4	18,4
			1951–1968	25	21,5
			1970–1974	25	17,2
Дисна – пгт Шарковщина	0,34–2,60	2,26	1888–1918	6	2,28
			1914–1964	3	2,6
			1940–1968	33	2,28
			1966–1982	6	2,28
			1976–1982	8	2,28
Неман – г. Гродно	2,25–17,50	15,25	1916–1950	33	15,3–17,5
			1947–1978	3	
			1936–1958	13	13,2
Щара – г. Слоним	0,41–3,24	2,83	1902–1918	33	1,63
			1916–1948	3	2,03
			1954–1982	3	2,03
			1954–1978	5	2,03
			1953–1976	4	3,24
			1960–1980	25	2,44–3,24
Виля – с. Миха-лишки	0,79–6,20	5,41	1902–1918	3	1,95
			1910–1921	5	3,88
			1910–1950	33	4,65–6,20
			1936–1950	11	4,65
			1951–1959	5	3,88
			1952–1978	3	3,88
			1954–1972	17	4,65–5,43
Мухавец – г. Брест	0,70–5,58	4,88	1902–1920	33	2,09
			1958–1982	33	2,09
			1954–1982	4	5,58
			1958–1982	3	3,49

Продолжение таблицы Б 1

Днепр – г. Орша	0,96–7,68	6,72	1915–1920	5	
			1915–1948	10	6,72–7,68
			1924–1950	5	
			1940–1982	33	5,76–7,68
			1950–1970	4	5,76
			1974–1982	7	4,80
			1974–1982	3	4,8
Днепр – г. Речица	3,97–31,30	27,33	1902–1924	33	23,5
			1916–1950	5	27,4–31,3
			1916–1950	3	15,7–19,6
			1926–1938	17	19,6
			1962–1982	4	19,6
Сож – г. Гомель	3,17–25,30	22,13	1900–1916	11	15,8
			1916–1950	17	22,1
			1916–1950	10	19,0
			1916–1950	5	19,0–25,3
			1952–1982	2	12,7
Березина – г. Бобруйск	1,61–12,0	10,39	1910–1945	5	7,54–12,0
			1920–1934	9	10,5
			1948–1956	17	9,02
			1963–1970	17	7,54
			1966–1980	4	9,02
			1972–1982	3	9,02
Припять – г. Мозырь	8,93–69,60	60,67	1888–1922	5	60,9
			1920–1970	2	
			1934–1962	20	52,3
			1934–1967	3	69,6
			1934–1950	9	60,9
			1964–1982	25	52,3
Птичь – с. Лучицы	1,03–7,80	6,77	1902–1936	5	4,9–5,87
			1946–1980	2	5,87
			1963–1982	3,3	4,90
			1964–1982	6,7	4,9
Зимний минимальный сток					
Западная Двина – г. Витебск	2,06–15,20	13,14	1904–1916	5	14,3
			1914–1940	3	17,2
			1938–1958	33	20,1
			1942–1976	2	22,9
			1958–1982	3	20,1
Западная Двина – г. Полоцк	2,92–22,90	19,98	1900–1918	5	14,3
			1914–1940	3	11,5
			1940–1976	20	15,2
			1946–1972	2	13,3
			1966–1976	4	13,3
			1976–1982	10	20,1

Продолжение таблицы Б 1

Дисна – пгт Шарковщина	0,21–1,62	1,41	1898–1916	11	1,22–1,42
			1916–1920	5	1,62
			1920–1934	8	1,42
			1938–1960	3	1,42
			1966–1980	3	1,01–1,22
			1976–1982	10	1,01–1,22
Неман – г. Гродно	2,1–16,10	14,00	1900–1926	33	8,1–10,1
			1914–1952	3	12,1
			1952–1978	4	16,1
			1954–1982	33	12,1
Щара – г. Слоним	0,37–2,86	2,49	1904–1940	5	1,08–1,79
			1910–1982	33	2,51–2,86
			1940–1982	3	1,79
Виля – с. Михалишки	0,95–7,33	6,38	1901–1920	33	2,77
			1906–1940	3	3,68–4,59
			1956–1972	6	5,51
			1956–1982	4	6,42
Днепр – г. Орша	1,01–7,90	6,89	1900–1924	6	4,95–6,92
			1920–1930	4	4,95
			1930–1940	5	3,96
			1944–1958	8	3,96
			1956–1970	33	4,95
			1956–1982	4	5,93
Днепр – г. Речица	4,35–33,70	29,35	1900–1916	2	21,1–25,5
			1918–1944	6	25,3
			1922–1940	17	33,7
			1940–1952	3	29,5
			1958–1976	5	29,5
Мухавец – г. Брест	0,51–3,95	3,44	1910–1980	33	3,46–3,95
			1950–1982	3	2,48
			1904–1940	5	1,50–2,48
Березина – г. Боб- руйск	1,53–12,2	10,67	1888–1933	6	6,09–7,61
			1925–1940	17	6,09
			1940–1978	2	10,7–12,2
			1958–1982	3	6,09–7,61
Сож – г. Гомель	2,39–19,10	16,71	1888–1916	33	19,1
			1906–1922	11	19,1
			1920–1934	8	19,1
			1942–1952	13	9,57
			1952–1960	6	9,57
			1958–1980	4	14,3
			1964–1982	6	14,3

Продолжение таблицы Б 1

Припять – г. Мозырь	11,2–84,6	73,4	1902–1930	5	42,7
			1944–1958	2	42,7
			1958–1982	4	84,6
			1958–1982	25	53,1
			1958–1982	2	84,6
Птичь – с. Лучицы	0,60–4,47	3,87	1898–1910	11	3,92
			1898–1920	5	3,92
			1898–1920	3	3,92
			1920–1946	10	3,92–4,47
			1962–1982	2,5	4,47
			1960–1982	17	3,92

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Результаты количественной оценки изменений минимального стока
Таблица В 1 – Параметры линейных трендов минимальных расходов воды рек Беларуси

Река – пост	Минимальный сток			
	Летне-осенний		Зимний	
	Градиент изменения стока a , $m^3/c/10 лет$	Коэффициент корреляции, r	Градиент изменения стока a , $m^3/c/10 лет$	Коэффициент корреляции, r
Западная Двина – г. Витебск	0,35	0,06	1,08	0,17
Западная Двина – г. Полоцк	2,11	0,12	9,74	0,45
Овсянка – с. Веречье	-1,99	0,14	0,02	0,07
Лужесянка – с. Борково	-0,06	0,17	-0,02	0,04
Лучоса – с. Кузьменцы	0,02	0,03	1,65	0,13
Улла – Лепельская ГЭС	1,94	0,54	5,09	0,58
Улла – с. Промыслы	0,35	0,30	0,52	0,29
Эсса – с. Гадивля	0,18	0,48	0,10	0,28
Оболь – г. Оболь	-0,06	0,06	1,14	0,52
Усыса – с. Казиново	0,07	0,45	0,10	0,40
Полота – с. Янково 1-е	0,09	0,23	0,11	0,26
Ушача – с. Толкача	0,13	0,19	0,25	0,25
Нача – с. Городовцы	0,02	0,22	0,04	0,25
Дисна – пгт Шарковщина	-0,29	0,06	1,06	0,21
Дисна – с. Козяны	0,17	0,13	0,54	0,21
Мяделка – с. Русаки	0,08	0,33	0,11	0,24
Березовка – с. Саутки	0,07	0,37	0,21	0,60
Дрысса – с. Демехи	0,32	0,24	0,68	0,34
Дрысса – с. Дерновичи	1,14	0,22	3,15	0,50
Нища – с. Соколище	-0,22	0,22	0,56	0,39
Свольно – с. Пользино	-0,18	0,16	-0,05	0,03
Неман – г. Столбцы	0,20	0,21	0,66	0,31
Неман – с. Белица	0,27	0,06	-2,61	0,35
Неман – г. Мосты	1,47	0,15	0,87	0,05
Неман – г. Гродно	0,86	0,18	-0,55	0,10
Перепуть – с. Городище	0,14	0,75	0,17	0,60
Уша – с. Большие Жуховичи	0,25	0,44	0,10	0,07
Березина – с. Неровы	0,02	0,03	-0,05	0,06
Ольшанка – с. Богданово	0,15	0,21	0,21	0,24
Ислочь – с. Боровиковщина	0,24	0,61	0,17	0,30
Гавья – с. Лубинята	0,02	0,04	-0,12	0,17
Жижма – с. Гельвинцы	0,13	0,37	0,38	0,57
Дитва – с. Поречаны	-0,14	0,25	0,18	0,35

Продолжение таблицы В 1

Щара – с. Залужье	0,22	0,34	0,81	0,55
Щара – с. Доманово	-2,10	0,20	0,73	0,38
Щара – г. Слоним	0,34	0,15	0,03	0,00
Щара – с. Великая Воля	1,20	0,38	0,17	0,03
Мышанка – с. Березки	0,81	0,79	0,94	0,58
Гривда – г. Ивацевичи	0,24	0,59	0,07	0,19
Зельвянка – с. Пески	0,54	0,36	0,62	0,35
Россь – с. Студенец	0,23	0,33	0,40	0,36
Котра – Сахкомбинат	1,12	0,58	0,24	0,06
Невиша – с. Пиловня	-0,01	0,03	0,14	0,39
Скиделька – г. Скидель	-0,09	0,16	0,22	0,44
Вилия – с. Стешницы	0,19	0,30	0,42	0,44
Вилия – с. Залесье	0,19	0,07	-0,18	0,06
Вилия – с. Михалишки	-0,17	0,04	0,08	0,01
Сервечь – с. Кривичи	0,11	0,26	0,05	0,10
Илия – с. Владыки	0,02	0,05	-0,02	0,04
Илия – с. Шуки	-0,19	0,16	-0,22	0,09
Рыбчанка – пгт Радошковичи	0,10	0,47	0,16	0,64
Нарочь – с. Черемшицы	-0,47	0,42	-0,39	0,31
Нарочь – с. Нарочь	0,18	0,30	0,39	0,45
Узлянка – с. Узла	0,02	0,04	0,67	0,60
Уша – г. Молодечно	-0,05	0,12	0,02	0,04
Ошмянка – с. Солы	0,26	0,54	0,07	0,10
Ошмянка – с. Великие Яцны	0,74	0,68	0,70	0,55
Копаявка – с. Черск	0,03	0,17	0,07	0,28
Мухавец – г. Брест	-0,53	0,16	-0,30	0,04
кан. Ореховский – с. Меленково	-0,07	0,10	2,39	0,15
Жабинка – с. Малая Жабинка	0,06	0,57	0,06	0,56
Осиповка – с. Петровичи	0,25	0,39	0,25	0,25
Рыта – с. Малые Радваничи	-0,03	0,08	0,04	0,05
Малорита – г. Малорита	-0,12	0,39	0,03	0,03
Лесная – г. Каменец	0,29	0,43	0,37	0,41
Пульва – г. Высокое	0,03	0,34	0,05	0,29
Нарев – ур. Немержа	-0,04	0,22	-0,06	0,19
Днепр – Орша	1,34	0,42	2,40	0,64
Днепр – г. Могилев	0,93	0,13	5,01	0,61
Днепр – г. Жлобин	4,86	0,44	7,51	0,61
Днепр – г. Речица	3,45	0,30	11,62	0,63
Ухлясть – пос. Радьков	0,03	0,35	0,02	0,26
Друть – с. Городище	-0,06	0,07	0,17	0,22
Добысна – с. Рудня Малевичская	0,18	0,37	0,09	0,11
Березина – с. Березино-Липское	0,27	0,27	0,39	0,30
Березина – г. Борисов	0,27	0,13	0,56	0,26
Березина – г. Березино	0,04	0,01	-2,95	0,43
Березина – г. Бобруйск	0,23	0,06	1,25	0,34

Продолжение таблицы В 1

Сха – с. Житьково	-0,12	0,60	0,03	0,10
Плисса – с. Трубенки	-0,13	0,44	-0,06	0,16
Плисса – с. Залесье	0,42	0,19	-0,03	0,05
Бобр – с. Куты	0,13	0,76	0,16	0,70
Бобр – с. Клыпенка	0,18	0,28	0,58	0,54
Вяча – с. Паперня	-0,07	0,68	-0,03	0,18
Волма – с. Корзуны	-0,30	0,70	-0,27	0,48
Волма – с. Заберезняки	-1,16	0,88	-0,68	0,51
Сушанка – с. Суша	0,03	0,33	0,04	0,35
Несета – с. Красный берег	0,23	0,52	0,37	0,63
Ола – с. Михалево	-0,04	0,21	0,04	0,17
Ведрич – с. Бабичи	0,03	0,30	0,03	0,23
Ведрич – с. Демехи	0,04	0,14	0,04	0,09
Сож – г. Кричев	1,36	0,18	4,56	0,46
Сож – г. Славгород	0,99	0,26	2,12	0,56
Сож – г. Гомель	1,51	0,16	3,11	0,35
Остер – с. Ходунь	0,49	0,36	0,95	0,52
Сенна – с. Пильня	0,03	0,16	-0,02	0,03
Проня – с. Будино	-0,31	0,54	-0,16	0,21
Проня – с. Летяги	0,29	0,29	0,72	0,54
Бася – с. Хильковичи	0,17	0,46	-0,23	0,40
Реста – с. Сухари	0,00	0,36	0,00	0,05
Чечера – с. Дербичи	-0,03	0,25	-0,10	0,44
Покоть – с. Красный Дубок	0,07	0,24	0,05	0,12
Беседь – г. Бельнковичи	0,27	0,43	0,41	0,37
Беседь – с. Светиловичи	0,29	0,25	0,57	0,42
Жадунька – г. Костюковичи	0,07	0,76	0,09	0,60
Уза – с. Прибор	0,02	0,13	0,05	0,27
Уть – с. Прибытки	-0,03	0,29	-0,03	0,42
Терюха – с. Грабовка	0,05	0,25	0,05	0,21
Верхняя Брагинка – с. Рудня	0,02	0,08	0,03	0,10
Припять – с. Коробы	-0,75	0,06	4,77	0,18
Припять – г. Туров	8,52	0,34	12,10	0,27
Припять – г. Мозырь	4,49	0,18	10,78	0,36
Ясельда – с. Хорево	-0,25	0,32	0,08	0,06
Ясельда – г. Береза	0,33	0,65	0,46	0,61
Ясельда – с. Сенин	0,95	0,44	1,94	0,34
кан. Винец – с. Рыгали	0,00	0,05	0,07	0,51
Меречанка – с. Красеево	0,01	0,17	0,06	0,76
Бобрик – с. Парахонск	0,08	0,14	0,25	0,23
Цна – с. Дятловичи	0,20	0,43	0,42	0,38
Горынь – пос. Речица	2,84	0,49	6,49	0,33

Окончание таблицы В 1

Лань – с. Локтыши	0,41	0,82	0,51	0,66
Лань – с. Мокрово	-0,93	0,43	0,57	0,22
Случь – с. Новодворцы	0,12	0,43	0,16	0,35
Случь – с. Клепчаны	-0,01	0,01	-0,35	0,24
Случь – г. Старобин	-0,14	0,30	0,43	0,32
Случь – с. Ленин	-0,27	0,13	0,43	0,11
Морочь – с. Мацкевичи	0,04	0,47	0,02	0,16
кан. Бычок – с. Озераны	0,02	0,10	-0,04	0,12
Уборть – с. Краснобережье	0,09	0,60	0,06	0,45
Свиновод – с. Симоничи	0,48	0,27	0,42	0,08
Птичь – с. Лецковщина	-0,25	0,81	-0,19	0,79
Птичь – с. Русаковщина	0,08	0,28	0,12	0,32
Сколодино – с. Сколодино	0,01	0,15	-0,04	0,16
Птичь – с. Комарино	0,10	0,19	0,27	0,32
Птичь – с. Холопеничи	-0,29	0,07	-0,55	0,16
Птичь – с. Лучицы	0,82	0,38	1,20	0,38
Шать – с. Шацк	-0,02	0,16	0,05	0,28
Доколька – с. Бояново	0,18	0,16	0,44	0,36
Оресса – с. Вертухино	0,21	0,72	0,25	0,62
Оресса – г. Любань	0,26	0,39	1,30	0,66
Оресса – с. Анреевка	0,47	0,35	1,01	0,50
Тремля – с. Дуброва	-0,10	0,23	-0,27	0,30
Вить – с. Борисовщина	0,21	0,69	0,32	0,54
Словечна – с. Кузьмичи	0,16	0,60	0,19	0,56
Чертедь – с. Некрашевка	0,05	0,59	0,07	0,35

Примечание: Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции на 5% уровне значимости

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты прогнозной оценки минимального стока

Таблица Г 1 – Величины изменения минимального стока по *варианту 1*, в % к существующему

Река – створ	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Вымнянка – с. Пивовары	-0,3	0,0	7,2	1,5	0,0	0,5
Усыса – с. Казиново	-0,1	-3,9	0,7	0,0	0,0	0,0
Полота – с. Янково 1-ое	49,4	7,9	0,5	0,0	-3,4	-0,5
Мяделка – с. Русаки	24,4	-1,1	7,8	0,0	0,7	2,4
Янка – с. Кушталы	15,3	0,0	1,7	0,7	43,7	16,9
Березовка – с. Саутки	-42,8	-0,2	-0,5	-0,3	0,1	42,9
Исlochь – с. Боровиковщина	75,2	-1,7	-0,8	4,3	12,1	-14,6
Гавья – с. Лубинята	-4,3	1,0	-12,7	-13,5	-8,5	-6,0
Жижма – с. Гельвинцы	-0,1	30,8	19,8	22,0	16,5	14,3
Дитва – с. Поречаны	-0,8	-0,5	-0,6	-0,4	3,4	-5,6
Мышанка – с. Березки	0,0	1,0	0,1	1,0	-1,0	-8,4
Гривда – г. Ивацевичи	-49,4	0,0	-0,9	0,2	-11,0	28,0
Илия – с. Владыки	-3,4	-0,4	-0,9	0,0	0,0	-11,8
Уша – г. Молодечно	-18,5	-7,1	-5,1	-5,7	-2,8	-1,7
Ошмянка – с. Солы	7,1	5,6	13,4	9,3	13,2	25,6
Пульва – г. Высокое	1,0	0,9	-1,1	0,0	-0,8	11,1
Россасенка – с. Козяны	-0,4	0,4	-0,6	0,0	-0,2	6,6
Ухлясть – пос. Радьков	-7,1	-1,0	-0,9	0,4	-8,5	-14,3
Орлянка – с. Хоново	-7,7	-8,5	0,2	0,3	0,2	-0,2
Ржавка – с. Черная Вирня	2,7	0,0	0,0	0,0	-1,8	-11,9
Гайна – с. Гайна	0,7	0,0	-3,9	-6,6	-0,9	26,8
Плисса – с. Залесье	0,0	3,7	-0,9	1,8	-2,8	-8,3
Бобр – с. Куты	0,2	-12,7	-0,9	0,2	1,9	65,3
Уша – с. Слобода	-19,9	0,0	-0,8	-13,3	3,3	19,9
Грава – с. Аминовичи	-12,5	0,5	0,3	0,3	0,3	20,6
Сушанка – с. Суша	55,2	-1,3	-0,1	0,2	-0,2	-54,8
Ола – с. Михалево	120,8	-2,0	0,0	0,1	-12,0	-52,0
Ведрич – с. Бабичи	35,0	0,4	-1,1	-0,2	0,6	5,2
Сенна – с. Пильня	1,0	-0,4	0,2	0,0	0,1	-2,1
Проня – г. Горки	12,5	-0,1	0,0	-0,8	0,1	2,1
Поросица – г. Горки	0,7	-0,4	0,7	-0,2	0,0	21,2
Реста – с. Сухари	5,0	2,3	-9,9	1,9	-19,6	-3,5
Покоть – с. Красный Дубок	60,6	1,5	0,8	-2,2	-1,3	-16,9
Жадунька – г. Костюковичи	47,3	1,3	-0,4	-0,1	0,6	4,9
Уза – с. Прибор	-4,2	-16,6	0,0	0,0	0,0	-5,2
Уть – с. Прибытки	21,6	48,6	4,7	1,0	-0,8	0,2
Ясельда – г. Береза	-0,7	-0,3	-0,3	0,0	0,7	3,2

Продолжение таблицы Г 1

Цна – с. Дятловичи	38,6	-3,1	2,8	-7,3	-2,7	-0,5
Случь – с. Новодворцы	-0,1	0,4	-1,3	0,3	-0,1	-7,5
Морочь – с. Мацкевичи	-48,9	0,5	-0,5	0,5	-0,4	15,1
Лань – с. Локтыши	-8,3	-16,8	-9,6	1,2	-0,2	-3,4
Птичь – с. Русаковичи	-0,8	0,4	-0,7	-0,3	-0,9	4,3
Оресса – с. Вертухино	-0,7	0,8	-20,8	-0,3	0,1	24,6
Иппа – с. Рыловичи	0,0	-0,2	-0,3	4,2	0,0	-1,9
Вить – с. Борисовщина	9,5	4,3	7,5	6,2	2,3	-0,2
Словечна – с. Кузьмичи	0,0	-1,3	-0,8	0,0	0,2	0,1

Таблица Г 2 – Величины изменения минимального стока по *варианту 2*, в % к существующему

Река – створ	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Вымнянка – с. Пивовары	0,2	2,4	-5,4	-14,4	-50,2	16,7
Усыса – с. Казиново	-29,7	-21,3	1,6	1,8	-6,1	-19,7
Полота – с. Янково 1-ое	-10,2	-16,0	1,2	-2,6	-27,5	-36,5
Мяделка – с. Русаки	-14,0	-1,6	-6,3	0,0	-18,5	-29,3
Янка – с. Кушталы	-14,3	-1,2	2,0	-20,0	-16,3	-17,6
Березовка – с. Саутки	-67,8	-0,2	-0,7	0,2	0,3	1,9
Ислочь – с. Боровиковщина	-17,0	-15,0	-17,1	-18,2	-2,1	19,8
Гавья – с. Лубинята	-17,8	-24,1	-24,9	-23,5	-22,2	-18,9
Жижма – с. Гельвинцы	-21,6	-39,4	-36,0	-30,7	-29,1	-24,6
Дитва – с. Поречаны	-52,5	-43,0	-38,6	-38,6	-45,0	-36,8
Мышанка – с. Березки	-24,1	-7,5	-7,1	-24,5	-19,9	3,8
Гривда – г. Ивацевичи	-49,3	-0,3	-0,2	0,2	1,8	35,3
Илия – с. Владыки	-15,3	-1,3	-17,0	-0,2	-27,7	-46,2
Уша – г. Молодечно	-23,0	-23,8	-26,3	-25,0	-21,2	-27,8
Ошмянка – с. Солы	-32,2	-26,4	-24,8	-24,7	-24,0	-21,2
Пульва – г. Высокое	0,3	0,4	0,0	0,4	-1,9	24,4
Россасенка – с. Козяны	0,3	1,3	-0,4	0,6	-0,4	20,4
Ухлясть – пос. Радьков	-45,5	-0,5	-0,2	-0,2	-11,5	-26,8
Орлянка – с. Хоново	-74,5	-4,7	0,8	-1,3	-0,5	-22,7
Ржавка – с. Черная Вирня	-54,6	0,0	0,5	-0,4	-0,5	12,6
Гайна – с. Гайна	-19,6	-28,8	-27,3	-19,0	-11,2	-6,3
Плисса – с. Залесье	-6,7	-18,7	-18,4	-16,1	-4,4	17,9
Бобр – с. Куты	-7,9	-11,9	-2,8	-2,6	-10,8	9,7
Уша – с. Слобода	-22,5	-24,1	-28,4	-27,8	5,5	52,6
Грава – с. Аминовичи	-16,2	0,5	0,2	0,0	0,3	65,2
Сушанка – с. Суша	-21,4	-13,7	-1,3	0,0	-1,9	18,4
Ола – с. Михалево	-0,8	1,6	0,9	-3,4	-6,2	16,3
Ведрич – с. Бабичи	-37,0	-0,4	-1,4	-0,7	-0,6	44,0
Сенна – с. Пильня	0,6	0,2	-0,2	-0,4	-0,6	24,4

Продолжение таблицы Г 2

Проня – г. Горки	-53,8	-0,4	0,7	-0,6	-0,9	-0,8
Поросица – г. Горки	-0,2	0,3	0,4	-0,4	0,0	12,7
Реста – с. Сухари	-73,2	-0,4	-15,5	-0,3	-20,4	-20,1
Покоть – с. Красный Дубок	1,4	-41,0	2,1	-2,0	-1,5	28,2
Жадунька – г. Костюковичи	-7,2	1,8	-0,4	0,0	-0,1	42,3
Уза – с. Прибор	-59,5	-27,8	0,5	0,3	0,0	-18,4
Уть – с. Прибытки	-10,4	-16,4	1,2	1,3	0,3	-2,8
Ясельда – г. Береза	1,4	0,0	0,0	0,2	-0,7	-17,2
Цна – с. Дятловичи	-21,6	0,3	-20,2	-9,5	1,0	-0,2
Случь – с. Новодворцы	-4,2	-0,4	-1,0	-0,2	-13,8	-32,8
Морочь – с. Мацкевичи	-56,6	0,5	-0,3	0,2	0,0	66,7
Лань – с. Локтыши	-61,7	-22,6	-16,1	1,0	-0,6	-22,1
Птичь – с. Русаковичи	-7,8	0,4	0,2	-21,1	-28,3	-10,7
Оресса – с. Вертухино	-0,7	-1,2	-20,8	-0,2	0,0	-17,9
Иппа – с. Рыловичи	-1,3	0,4	-0,8	-25,9	-19,8	-12,1
Вить – с. Борисовщина	-50,4	-8,9	-39,0	-15,2	-0,3	-0,4
Словечна – с. Кузьмичи	-27,2	-22,2	-2,5	0,0	0,6	-18,4

Таблица Г 3 – Величины изменения минимального стока по *варианту 3*, в % к существующему

Река – створ	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Вымнянка – с. Пивовары	-25,7	-1,5	-6,2	-13,8	-17,8	39,7
Эсса – с. Гадивля	-24,1	-5,9	-14,7	-29,5	-27,5	-9,4
Усыса – с. Казиново	-45,0	-40,1	-8,8	-30,0	-30,3	-36,9
Полота – с. Янково 1-ое	-31,3	-36,7	-10,9	-28,3	-44,0	-53,9
Мяделка – с. Русаки	-34,5	-12,7	-31,2	-16,9	-39,1	-49,2
Янка – с. Кушталы	-44,3	-0,7	2,9	-61,1	-42,0	-21,8
Березовка – с. Саутки	-51,5	1,3	-0,5	11,1	0,3	48,1
Ислочь – с. Боровиковщина	-51,7	-40,3	-38,3	-38,0	-24,2	-3,3
Гавья – с. Лубинята	-44,3	-44,6	-43,8	-42,0	-39,8	-34,7
Жижма – с. Гельвинцы	-36,1	-53,6	-51,5	-47,3	-45,3	-39,6
Дитва – с. Поречаны	-35,9	-23,6	-18,4	-19,2	-28,7	-21,1
Мышанка – с. Березки	-49,8	-32,9	-30,6	-42,8	-38,0	-16,8
Гривда – г. Ивацевичи	-49,4	-0,8	-0,9	-0,7	2,2	43,3
Илия – с. Владыки	-45,7	-21,4	-37,9	-24,0	-43,6	-56,5
Уша – г. Молодечно	-51,2	-45,2	-44,7	-43,0	-39,0	-41,9
Ошмянка – с. Солы	-44,3	-43,4	-42,6	-42,2	-40,8	-36,7
Пульва – г. Высокое	-4,0	-1,3	-0,6	-13,8	-27,3	-21,0
Россасенка – с. Козяны	-33,5	-25,4	0,0	2,0	-0,2	12,1
Ухлясть – пос. Радьков	-45,8	0,5	0,2	0,0	-0,1	-2,3
Орлянка – с. Хоново	-78,1	-4,2	1,4	3,8	2,8	-12,9
Ржавка – с. Черная Вирня	-54,8	-0,2	-0,5	-0,8	-1,2	15,8
Гайна – с. Гайна	-47,4	-48,5	-45,7	-38,2	-30,6	-23,9

Продолжение таблицы Г 3

Плисса – с. Залесье	-43,6	-42,4	-39,4	-36,2	-25,5	-5,0
Бобр – с. Куты	-40,2	-36,1	-27,2	-21,8	-32,3	-12,5
Уша – с. Слобода	-47,2	-44,6	-46,5	-45,0	-17,7	23,1
Грава – с. Аминовичи	-39,3	-1,5	-0,3	-2,0	2,1	17,9
Сушанка – с. Суша	-44,7	-36,4	-5,4	-9,1	-20,3	-9,3
Ола – с. Михалево	-27,7	-15,7	-28,8	-35,3	-27,4	1,4
Ведрич – с. Бабичи	-35,8	0,9	0,0	-2,2	0,0	15,7
Сенна – с. Пильня	-1,4	-24,9	-0,5	-16,9	-29,8	-9,3
Проня – г. Горки	-54,6	-10,0	1,1	-1,5	0,9	35,4
Поросица – г. Горки	0,5	1,4	0,9	-0,5	0,6	0,3
Реста – с. Сухари	-56,9	0,4	-15,3	0,0	-20,4	-20,1
Покоть – с. Красный Дубок	-30,9	-65,5	-26,4	-18,0	-3,4	10,0
Жадунька – г. Костюковичи	-21,2	-0,4	-0,4	-13,0	-13,8	15,6
Уза – с. Прибор	-76,7	-28,1	0,0	0,6	0,3	1,3
Уть – с. Прибытки	-74,3	-15,7	1,2	0,6	-1,1	-8,7
Ясельда – г. Береза	-6,3	-0,5	-1,0	0,6	-34,3	-38,9
Цна – с. Дятловичи	-21,6	0,9	-35,8	-24,2	-3,1	-0,3
Случь – с. Новодворцы	-34,2	-1,3	-0,8	-1,2	-35,3	-46,9
Морочь – с. Мацкевичи	-56,8	0,7	-0,3	0,2	0,2	57,1
Лань – с. Локтыши	-69,4	-23,4	-15,4	0,5	0,0	2,1
Птичь – с. Русаковичи	-26,0	-13,2	-16,9	-42,0	-45,6	-29,2
Оресса – с. Вертухино	-29,7	-0,4	-21,2	0,9	-28,4	-39,7
Иппа – с. Рыловичи	-1,3	0,4	-0,8	-25,9	-19,8	-12,1
Вить – с. Борисовщина	-50,4	-7,9	-39,6	-15,2	0,0	0,0
Словечна – с. Кузьмичи	0,3	-1,1	0,5	0,0	0,0	0,0
Чертедь – с. Некрашевка	-17,3	1,4	-1,2	-0,7	0,9	-15,8