



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему **Оценка изменений**
минимального стока в бассейне
Верхнего Дона

Исполнитель Чеснокова Арина Игоревна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)
(подпись)

К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«03» марта 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

	Стр.
Список используемых сокращений	3
Введение.....	4
1.Физико–географическая характеристика района исследования.....	7
1.1 Рельеф.....	21
1.1.1 Общая характеристика рельефа	21
1.2 Геологические условия (тектоника и стратиграфия).....	22
1.3 Гидрогеологические условия	22
1.4 Гидрография. Исходные данные.....	23
1.5 Гидрологический режим.....	26
1.6 Современный взгляд на формирование низкого стока на европейской части России.....	39
2.Алгоритм исследования низкой водности в бассейне верхнего Дона	45
2.1 Методика оценки статистических характеристик.....	46
2.2.Оценка стационарности	52
1.1 Оценка параметров распределения	65
2.3.Восстановление данных наблюдений	69
3 Оценка изменений минимального стока	74
3.1 Исходные данные	74
3.2. Основные характеристики.....	78
3.1 Оценка изменений климатических параметров	92
3.1.1.Исходные данные	92
3.1.2 Климатические сценарии.....	93
4 Испарение.....	98
5 Прогноз математического ожидания и коэффициента вариации	107
Заключение	109
Приложение А. Хронологические и интегральные графики минимальных расходов воды	121
Приложение Б. Кривые распределения максимальных расходов воды.....	126
Приложение В. Анализ межгодовых изменений	134
Приложение Д. Параметра расчета испаряемости и прогнозного коэффициента вариации для рядов минимального стока.....	157

Список используемых сокращений

ВКМ	–	Воронежский кристаллический массив
МНК	–	Метод наименьших квадратов
ЦЧР	–	Центрально-Черноземный регион

Введение

Изучение минимального стока под влиянием климатических факторов является актуальной задачей. Большую востребованность имеют исследования минимального стока, так как именно его характеристики являются определяющими при проектировании гидротехнических сооружений, строительстве, эксплуатации сетей водоснабжения, развития водохозяйственных систем, проектирования линейных и площадных сооружений, а также оценке влияния климатических факторов на речной сток.

Речной сток имеет высокую чувствительность к внешним факторам проявляется прежде всего в нарушении однородности и стационарности рядов стока, что влияет на применяемые к таким рядам методы расчетов и итоговые обеспеченные характеристики.

Река Дон – одна из крупных рек в европейской части материка, проходящее расстояние в 1870 км от истока до устья по Восточно-Европейской равнине до впадения в Таганрогский залив Азовского моря. В бассейне реки, на площади в 422 000 км², разместились 15 административных субъектов Российской Федерации и 3 области сопредельной Украины. Водные ресурсы реки используются для разнообразных целей, и, прежде всего, для сельскохозяйственного водоснабжения практически по всей длине реки, рыболовства и рыбозаводства, рекреационных и иных целей, а Нижнего Дона – для заполнения искусственного водоема – Цимлянского водохранилища, речного судоходства и решения иных практических задач.

Стабильность и надежность функционирования отраслей экономики, в большем или меньшем объеме эксплуатирующие водные ресурсы, в большей степени испытывают зависимость от запасов водных ресурсов, равномерности или неравномерности объемов воды, протекающих в главной реке и ее притоках в течение года и многолетнем периоде.

Речной сток – мера водных ресурсов – многофакторный природный процесс, определяемый комплексом факторов окружающей среды, среди которых климатические факторы имеют основополагающее влияние и на формирование гидрологического режима.

В текущий период общепланетарный климатический цикл отличается ростом турбулентностью, изменчивостью. Обновляющие климатические параметры вызывают реактивные изменения в северном и южном полушариях, захватывая крупные территории, в том числе и на территории России. Масштабность современных климатических изменений и глубина ожидаемых последствий вызывают озабоченность о будущем человечества и на государственном уровне нашли отражение в ряде документов: «Климатической доктрине Российской Федерации» (2009) (Климатическая доктрина...2009), «Стратегии экологической безопасности России до 2025 г.» (2017) (Стратегии экологической безопасности...2017), «Плане мероприятий по реализации Стратегии экологической безопасности России» (План мероприятий

по реализации...2019), а также в Докладе «Управление рисками экстремальных явлений и стихийных бедствий в целях содействия адаптации к изменениям климата» (2012) (Управление рисками экстремальных явлений....2012).

Речной сток, как сложный многофакторный процесс, реагирует на внешние воздействия природного и антропогенного происхождения. В связи с этим в многолетней динамике водных ресурсов отмечаются как периоды повышенной, так и периоды пониженной водности. В исследованиях водного режима Дона (Дмитриева, 2015; Дмитриева, Бучик, 2016; Киреева, Фролова, 2013; Джамалов и др., 2017; и др.) указывается на глубокие и разнонаправленные тенденции в фазах водного режима. При этом остается недостаточно изученным генезис низкой водности в бассейне Верхнего Дона, в период летне-осеннюю и зимней межени. Формирование низкой водности рек, продолжительность и глубина имеют исключительную социально-экономическую и экологическую значимость и с позиций водопользования, и с позиций качественного состояния воды в реках, что и определяет новизну исследовательской работы.

Основной целью исследования являлся анализ изменений минимального стока расходов воды и разработка методических подходов, позволяющие проследить динамику распределения минимального стока, сделать оценку тенденций продолжительности и характера межени, чтобы оценить риски водопользователей в дефицитный период в районе исследования.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) собрать исходную гидрологическую информацию – сведения о минимальные расходы воды (период зимней и летне-осенней межени);
- 2) выявить характер природного и антропогенного влияния при оценке генезиса низкой водности в речных бассейнах Верхнего Дона;
- 3) систематизировать исходную метеорологическую информацию – сведения об атмосферных осадках, температуре воздуха;
- 4) выполнить анализ наличия трендов в рядах минимального стока; за многолетний период;
- 5) установить современные границы водохозяйственного года и периода низкой водности;
- 6) выполнить расчет основных статистических характеристик минимального стока.
- 7) выявить динамику изменений, сделать анализ изменения стока, с учетом генезиса водности летне-осенней и зимней межени при современном климатическом режиме;
- 8) предложить рекомендации по сохранению качественного состояния воды в водных объектах на изучаемой территории.

Методической основой являлись статистические методы, а также методы гидрологической аналогии и пространственной интерполяции.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

- впервые установлено изменение границ летне-осенней и зимней межени;
- выявлено увеличение продолжительности периода низкого стока;
- на основе расчленения гидрографов выделены составляющие грунтового и дождевого речного стока, а также оценка водности рек в период межени;
- путем расчленения гидрографов определена доля дождевого стока в период межени;
- обоснованы экологические риски водопользования при современных климатических вызовах;

-проведен выбор методики расчета испарения и суммарного испарения с водосборов бассейна Верхнего Дона, а также расчет прогнозного коэффициента вариации при различных климатических сценариях:

Теоретическая значимость исследования заключается в выявлении современных характерных черт генезиса низкой водности в бассейне Верхнего Дона, определении границ и продолжительности меженного периода и современных тенденций в минимальном стоке, оценке составляющих речного стока в маловодный период года, установлении особенностей формы гидрографа в разные по водности годы, адаптации модели расчленения гидрографа.

Практическая значимость работы состоит в фактическом определении объемов речного стока в меженный период, выделении границ и продолжительности периода низкой водности, оценке составляющих речного стока в различные по водности годы, установлении сроков наступления минимумов стока, определении последствий динамики меженного стока для отраслей водохозяйственного комплекса. Результаты могут быть использованы при обосновании проектных решений для различного рода сооружений на исследуемой территории.

Апробация работы и публикации. Отдельные фрагменты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: Эколого-географические исследования в речных бассейнах. Воронеж, 2018; «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2017); Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Материалы междунар. науч.-практич. конф. (г. Воронеж, 2019 г.), конференции «Ломоносов 2019» (г. Москва, 2019 г.), «Третьи Виноградовские чтения.» (Санкт-Петербург, 2020), а также ежегодно на отчетных научных конференциях кафедры природопользования Воронежского государственного университета (ВГУ).

По материалам диссертационного исследования опубликовано 3 научные статьи, индексируемые в РИНЦ.

1. Физико–географическая характеристика района исследования

Район исследования охватывает бассейн рек Верхнего Дона и расположен в южной части Русской равнины, и имеет наибольшую напряженность в меридиональном направлении 386 км, в широтном – 315 км.

Изучаемая территория включает в себя большую часть Воронежской и Липецкой области, значительную часть Тамбовской области и небольшие части Орловской, Белгородской и Курской областей.

Бассейн Верхнего Дона в значительной своей части представляет собой возвышенную волнистую равнину, изрезанную долинами рек и частой сетью глубоких и широких оврагов и балок (Мишон, Михайлов, Смольянинов, 1978).

Район исследований включает в себя районы низменных и возвышенных Волго-Донских равнин, среди которых выделяются следующие геоморфологические области: Среднерусская возвышенность, Окско-Донская равнина, Приволжская и Ергенинская возвышенности, Донецкий кряж, Приазовская равнина, Азово-Кубанская низменность, долины рек Дона, Воронежа и Западного Маныча (рис.1.1).

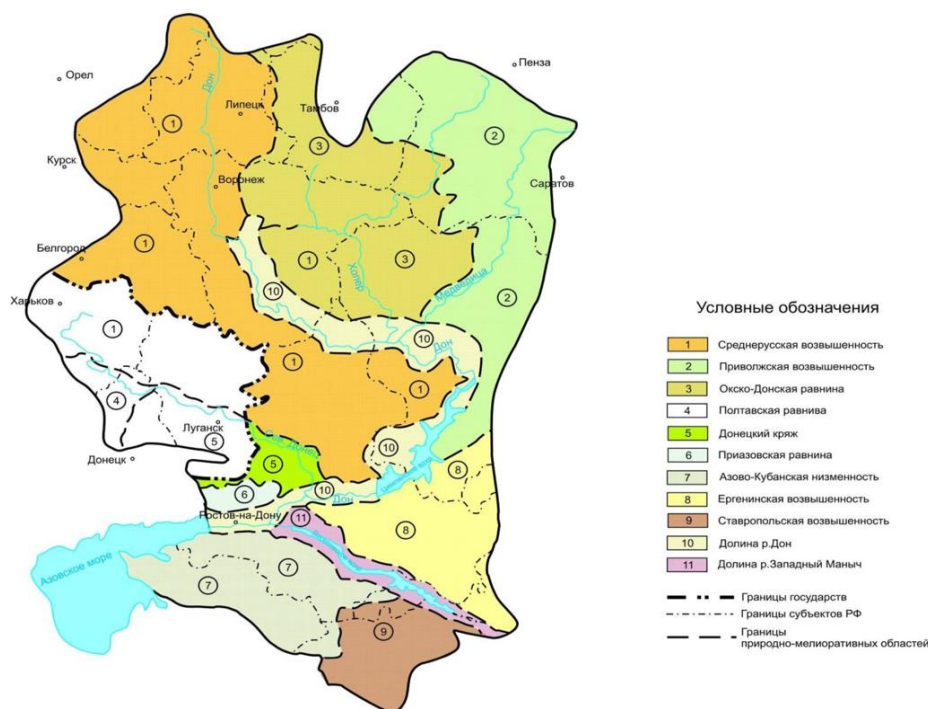


Рис.1.1. Геоморфологические области в бассейне р. Дон
(Схема комплексного использованияр. Дон, 2019)

Исследуемая территория включает в себя Тульскую, Воронежскую, Липецкую области, значительную часть Тамбовской области небольшие части Орловской, Белгородской и Курской областей и находится в пределах лесостепной и степной зоны. Лесостепная зона подразделяется на две провинции Среднерусскую возвышенность и провинцию Окско-Донской равнины.

Почвообразующими породами на изучаемой территории являются лессовидные суглинки тяжелосуглинистого и глинистого механического состава, реже покровные суглинки, подстилаемые супесями, песками, и плотными коренными породами, преимущественно карбонатными. Почвенный покров Среднерусской равнины представлен тремя подзонами: и северной лесостепи на серых лесных почвах и оподзоленных черноземах, подзона типичной лесостепи на выщелоченных и типичных черноземах и подзона южной лесостепи на обыкновенных (среднегумусных) черноземах. Большая часть территории бассейна расположена в зоне лесостепи.

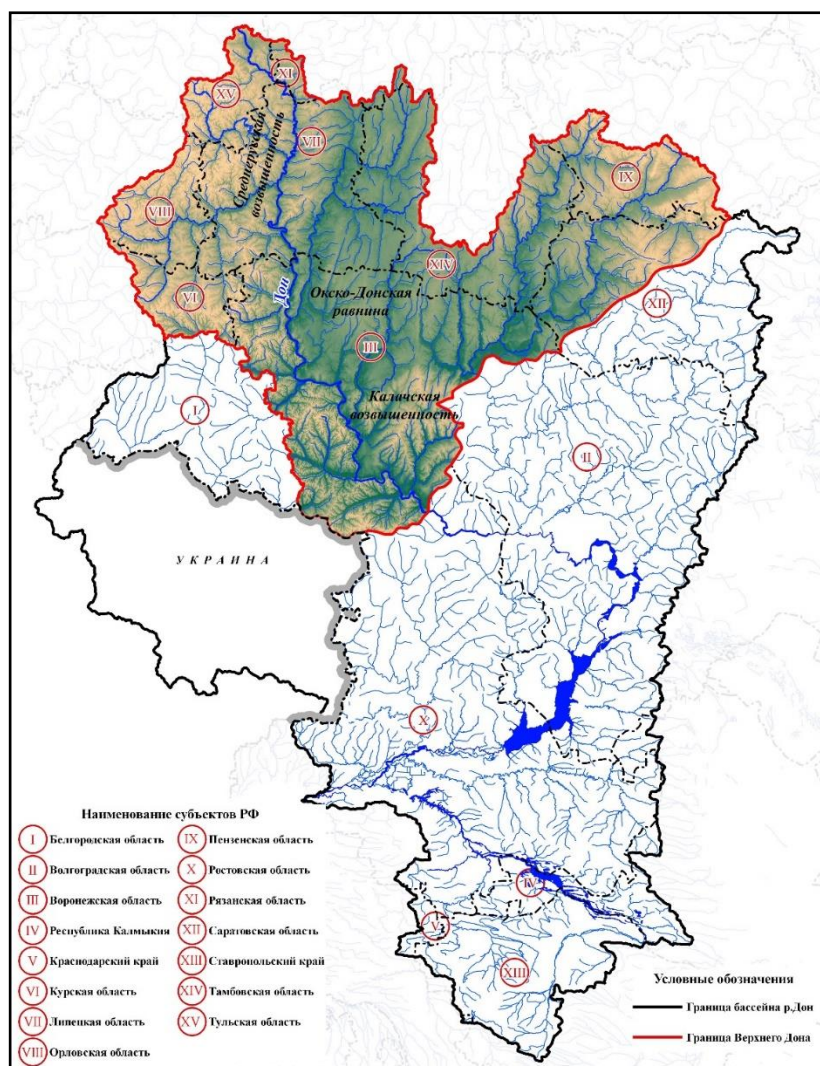


Рис.1.2. Бассейн Верхнего Дона

Бассейн Дона расположен в пределах Восточно-Европейской или Русской плиты, которая в своем основании сложена докембрийскими породами, которые подходят близко к древней платформе, а именно к Воронежскому кристаллическому массиву. Фундамент пород воронежского кристаллического массива сформирован сложно дислоцированными образованиями архейского и раннепротерозойского возраста. Северо-Западная часть бассейна располагается на территории Среднерусской возвышенности. Верховья бассейна сложены каменноугольными породами. Местность характеризуется как ровная и слабоволнистая. Долины рек характеризуются большой шириной и отлогими низкими берегами. В западной части бассейна – на южных склонах Среднерусской возвышенности распространены меловые породы, которые вскрываются глубокими речными долинами. В центре северной части бассейна расположена Тамбовская равнина, представляющая часть Окско-Донской равнины, сложенной четвертичными отложениями.

Дон берет свое начало в северной части Среднерусской возвышенности, на Окско-Донском водоразделе, на высоте 179-180 м над уровнем моря, у г. Новомосковска Тульской области. Область долины от истоков до устья р. Воронеж принято считать Верхним Доном. В некоторых источниках граница Верхнего Дона заканчивается устьем р. Тихая Сосна.

В структурно-тектоническом плане долина Верхнего Дона проходит по стыку Воронежской антеклизы и Окско-Донской синеклизы. Водоразделом между бассейнами Дона и притоков Оки является Окско-Упинское поднятие, состоящее из цепи платообразных возвышенностей.

Таким образом, верховья Дона расположены на пологоволнистой равнине разделенной плоскостным водоразделом. Западные отроги водораздела сильно сужены, изрезаны густой сетью оврагов, балок, суходолов. Восточные отроги ниже западных и имеют более ровную поверхность.

В архейской и протерозойской эрах территория Верхнего Дона находилась в пределах геосинклинальной области. Осадки, накопившиеся на дне древних морей сжимались в складки. Проходили вулканические процессы. В конце протерозойской эры сформировались равнины, сложенные из смятых в складки кристаллических пород: гранитов, гнейсов, кварцитов. Таким образом, геосинклиналь преобразовалась в платформу, получившую название Восточноевропейской, или Русской. Древнейший докембрийский кристаллический гранитогнейсовый фундамент скрыт под мощной толщей более молодых палеозойских отложений и на поверхность, в пределах Верхнего Дона, не выходит, располагаясь на глубинах 0.4-1.0 км. Лишь в области Павловского поднятия граниты выходят на поверхность небольшими пятнами по берегам реки Дон.

В палеозойский и мезозойский периоды территория бассейна Верхнего Дона была покрыта мелководными морями, что связано с глобальными колебаниями земной поверхности, сопровождавшимися разломами и проявлениями вулканизма.

Девонские отложения в виде мощной толщи (свыше 100 м) известняков, глинистых сланцев и песчаников, залегающих на кристаллическом основании, образуют «девонское поле», покрывающее значительные площади бассейна Верхнего Дона, имеющего слабый наклон в сторону Подмосковной котловины. В верховьях Дона девонские отложения залегают под породами каменноугольной системы, также имеющими наклон к северу.

Отложения каменноугольной системы представлены известняками, доломитами, мергелями, глинами и песками. Наиболее значимым полезным ископаемым являются бурые угли в отложениях нижнего карбона. Одно из таких месторождений разрабатывалось шахтным способом в пределах Новомосковска, что значительно повлияло на повышение водности в восточной части Дона. Ранее каменноугольные породы были развиты намного шире, воды визейского моря покрывали всю территорию долины Верхнего Дона. Однако в пермское время территория была поднята и подвергалась денудации, в результате чего часть каменноугольных отложений была разрушена.

Для рельефа бассейна Верхнего Дона характерны карстовые образования. Карстовые процессы обусловлены наличием легкорастворимых карбонатных и девонских известняков, гипса и карбонатных лессовидных пород. Карстовые явления вызваны действием подземных вод преимущественно на известняки нижнего карбона и гипсы верхнего девона, а в южной части бассейна (Липецкая область) на известняки девона. Современный карст распространяется растворением этих горных пород циркулирующими в их толще подземными водами.

Девонские отложения наиболее ярко представлены в долине Дона в пределах Липецкой области. Скальные выходы девонских известняков расположены в долине Дона, Быстрой Сосны и её притоков Пальны, Воргола и Ельчика. Обнажения пород девонской системы, вскрытые реками, придают равнинному ландшафту Липецкой области, вид предгорий Урала и частично Северного Кавказа. Например, долины Ельчика и Воргола, имеют вид каньонообразных ущелий, с глубокими, скальными обрывами известняковых скал.

В долине Дона в пределах Воронежской области девонские отложения выклиниваются, сменяясь на меловые обрывы Донского Белогорья. Эти отложения сформировались в мезозое, когда на территории Верхнего Дона находилось спокойное глубокое море. Наиболее представительными являются отложения туронского, коньякского и сантонского ярусов состоящие из песчаного и писчего мела. Мощность меловых отложений выходящих по правобережью Дона достигает 150-170 м.

В начале кайнозоя, в результате регрессии море постепенно отступает к югу и уже к концу палеогена, на территории Верхнего Дона, возникают континентальные условия. После отступления олигоценового моря на плоской равнине, имеющей наклон к югу, образовались первые реки, отличавшиеся малыми размерами и непостоянным руслом.

На возникшей холмистой равнине начали формироваться долины древних рек: Ергень-река, Андрей-река, Усмань-река и др., составлявших бассейн Палео-Дона.

Долина Палео-Дона окончательно сформировалась в среднем миоцене. Начинаясь она в Подмоскovie и в субмеридиональном простираии доходило к Прикаспию в области современной Ергенинской возвышенности. Ширина долины достигала 50 километров, а дельта реки у Яшкуля имела ширину до 60 километров. Глубина долины составляла 80-120 метров в пределах Окско-Донской низменности, и до 300 метров ближе к устью.

Море, в которое впадал Палео-Дон, в периоды трансгрессий наступало на сушу, превращая долину реки в мелководный морской лиман, достигающий иногда до истоков, до района современной средней Оки.

В процессе постепенного отступления Южно-русского моря, отошедшего в начале миоцена до линии современного Маныча, началось заложение протяженной долины Палео-Дона.

В целом, долина Пра-Дона была заложена значительно восточнее современного русла реки. Речная долина заполнялась аллювиальными отложениями, при этом река мигрировала вправо и так сформировалась Окско-Донская аллювиальная равнина. Примерно в то же время происходило заложение долины Палео-Волги (Кинель-реки), разделенной от Окско-Донской низменности Приволжской и Белебеевской возвышенностями.

На развитие гидрографической сети Среднерусской возвышенности большое влияние оказал ледник. Основная роль ледника сказалась на перестройке гидрографической сети. Произошло подпруживание рек, стекавших с возвышенности на север, восток и запад. Так реки, стекающие в Донскую низину были подпружены и потекли в меридиональном направлении вдоль края ледника (Тихая Сосна, Девица, Потудань).

Крупное раннеплейстоценовое оледенение – донское, 670 - 620 тысяч лет назад – существенно перестроило русло Дона в среднем и верхнем течении. Ледниковая лопасть донского оледенения дошла до устья Хопра. Границами ледника были склоны среднерусской и калачской возвышенностей. При таянии ледника, русло Дона стало проходить вдоль западного края ледника. Река Дон стала протекать между Калачской и Среднерусской возвышенностями, используя свой уже существовавший ранее боковой приток.

Устье Дона в четвертичном периоде мигрировало в соответствии с колебаниями уровня азово-черноморского бассейна. Иногда Дон «впадал» в Манычский пролив, или сливался с

ним, когда тот существовал. В ледниковые эпохи Азовское море исчезало, Дон (или Доно-Маныч) выдвигался в акваторию Черного моря. Так, при максимальном падении уровня азово-черноморского бассейна 14-12 тысяч лет назад, в новоэвксинский этап, когда уровень понизился на 90-110 метров относительно современного, Азовское море полностью высохло. По плоской оставшейся от него равнине тек Дон в то время, образуя устье километрах в 50 южнее современного Керченского пролива.

Неоплейстоцен (с 800 до 10 тыс. лет назад) оставил аллювиальные, ледниковые и лесово-почвенные отложения. В нем чередовались ледниковые и межледниковые эпохи. Из ледников самым значительным был Донской, которой доходил до устья Медведицы. Не покрыта льдом была только южная часть области, где в это время откладывался перегляциальный аллювий и лессы. Ледник оставил морены, зандры и другие водно-ледниковые образования. Самое масштабное из них – Воронежская флювиогляциальная гряда, слагающая междуречье Дона и Воронежа, и далее на север левобережье Дона вплоть до устья Икорца.

После ухода ледника северная часть Среднерусской возвышенности, так же как и южная, подверглась интенсивному эрозионному размыву. Благодаря этому современный рельеф Среднерусской возвышенности - прежде всего эрозионный рельеф на водоразделах, с выходами материнских пород и аккумулятивный в речных долинах

Преобладающее направление Верхнего Дона с Севера на Юг. Верховья реки характерны незначительной шириной, извилистым, с перекатами руслом и небольшой поймой. В своих верховьях, т. е. в пределах Тульской, Рязанской и в начале Липецкой области течет по местности представляющей широкую, слабо всхолмленную равнину.

Ниже Задонска Дон протекает в толще песчаных отложений водно-ледникового происхождения. Высота берегов достигает местами до 180 м. Ниже устья реки Воронеж на поверхность выступают отложения мела, сопровождающего большую часть среднего течения Дона. Эту часть Дона называют Донским Белогорьем.

По характеру геоморфологических особенностей Дон является типичной равнинной рекой. Средний уклон его равен 0,1 ‰. Общее падение Дона от истока до впадения Воронежа составляет 94 м. Почти на всем протяжении Дон имеет разработанную долину с широкой поймой, с рукавами и староречьями. Русло реки извилистое и изобилует многочисленными песчаными мелководными перекатами.



Рис.1.3. Природные зоны в бассейне Дона (География, 2006).

Для Дона характерно асимметричное строение долины: правый коренной берег ее почти на всем протяжении высокий и крутой, тогда как левый - пологий и низменный. По склонам долины отчетливо прослеживаются три террасы.

Климатические факторы является главным фактором формирования минимального стока. В зависимости от географического расположения района зависит приход и распределение солнечной радиации, значения которой изменяются с севера на юг, а так же в течение года (Дмитриева, 2015).

Средняя годовая температура воздуха изменяется от 4.8° на севере до 9.4° на юге бассейна Дона. Самые низкие температуры наблюдаются в январе (минус 11.0°С - минус 4.9°С). Абсолютный минимум достигает минус 33°С - минус 40°С. Наиболее теплым является июль месяц, средние температуры которого изменяются от 19.4° на севере, до 23.8° на юге.

Абсолютный максимум температуры достигает 38° на севере и 42° на юге Донского бассейна. Первые заморозки наблюдаются с конца сентября до конца октября. Устойчивые морозы с конца ноября на севере до середины февраля на юге. Последние заморозки отмечаются в 3-й декаде апреля, а на севере и востоке бассейна - в начале мая. Продолжительность безморозного периода в среднем составляет 150-190 дней. Средняя глубина промерзания почвы достигает 33-79 см, максимальная 54-145 см.

В докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации в 2018 году (Доклад об особенностях климата...2018), было отмечено продолжение потепления, темп роста которого превышает среднее по Земному шару. Средняя скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории России в 1976-2018 гг. составила по данным ФГБУ "ИГКЭ" 0.47°С/10 лет.

Это в 2.5 раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период: $0.17-0.18^{\circ}\text{C}/10$ лет, и более чем в 1.5 раза больше средней скорости потепления приземного воздуха над сушей Земного шара: $0.28-0.29^{\circ}\text{C}/10$ лет (оценки по данным Центра Хэдли и Университета Восточной Англии: Had-CRU UEA, NOAA).

В течение 20-ого века глобальная температура воздуха у поверхности увеличилась на $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Однако во временном ряду температуры воздуха у поверхности обнаруживается значительная неоднородность во времени и пространстве. В периодов наибольшего потепления в 20-м столетии были с 1910 по 1945 гг. и с 1976 по 2000 гг./, а между ними наблюдалось некоторое похолодание (Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, 2019). Для России в 2018 году средняя температура за год на 1.58°C превысила норму 1961-1990 гг. (Доклад об особенностях климата за 2018 год).

В качестве эталонного периода для оценки параметров климата, характеризующие текущий или современный климат, в соответствии требованиями Всемирной Организации (ВМО) используется период 30 лет.

На текущий период — это 1961-1990 годы. Понятие "норма" понимают среднее значение переменной величины именно за указанный период, а отклонение от этой величины считается "аномалией". Климатические нормы вычисляются для различных метеорологических величин, которые включаются в специализированные издания.

На рисунках 1.2 приведены карты климатических норм для: температуры воздуха и атмосферных осадков. На рисунке 3 показаны температурные аномалии по участкам поверхности. Указанные картографические данные созданы в Исследовательской группе Университета Восточной Англии под руководством Ф. Джонса и находиться в свободном доступе (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>).

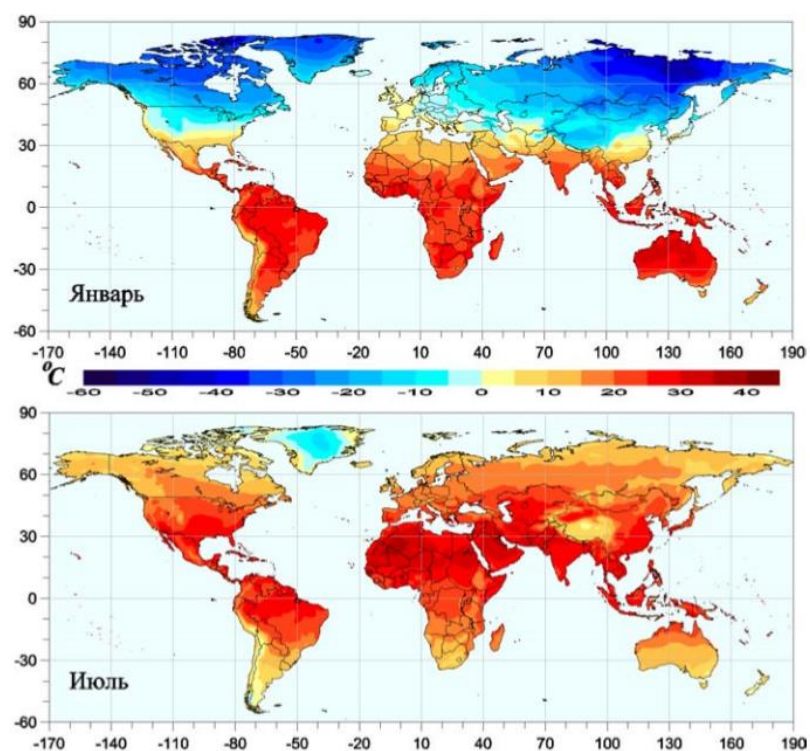


Рис.1.4. Многолетняя средняя месячная температура воздуха в январе и в июле ($^{\circ}\text{C}$) за 1961-1990 гг. [<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>].

В этом же источнике приводятся карты распределения атмосферных осадков (рис 2.6.)

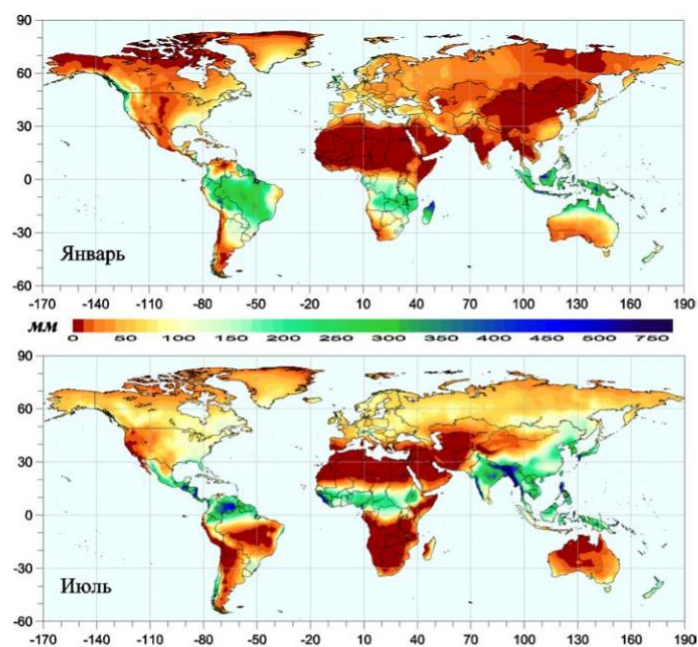


Рис.1.5. Многолетние месячные суммы атмосферных осадков в январе и июле (мм/мес.) за 1961-1990 гг.

Актуальность для исследования имеет анализ метеоэлементов за период 90-х годов прошедшего века и начала XXI века (Акимов..2017), по сравнению с характеристиками за период 1961-1990 гг., которыми пользуются все члены ВМО (всемирной метеорологической организации). В таблицах 2.2..1 представлены данные по отклонению температуры воздуха и атмосферных осадков от климатической нормы.

На рис.2.7 представлена схема, иллюстрирующая версию 4 многомерного набора климатических данных CRU TS, опубликована в журнале Nature's Scientific Data. Набор данных CRU TS является одним из наиболее распространенных наборов данных о наблюдаемом климате и ведется Национальным центром атмосферных исследований Великобритании (NCAS) при отделе климатических исследований Университета Восточной Англии (CRU). Он представляет ежемесячные данные по сетке $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, охватывающей поверхность суши (за исключением Антарктиды) с 1901 по 2018 год). Существует десять переменных величин, все они основаны на поверхностных измерениях: температура (средний, минимальный, максимальный и суточный диапазон), осадки (общее количество, а также количество дождевых дней), влажность (как давление пара), количество (2020; Sci. Данные) (рис.1.6).

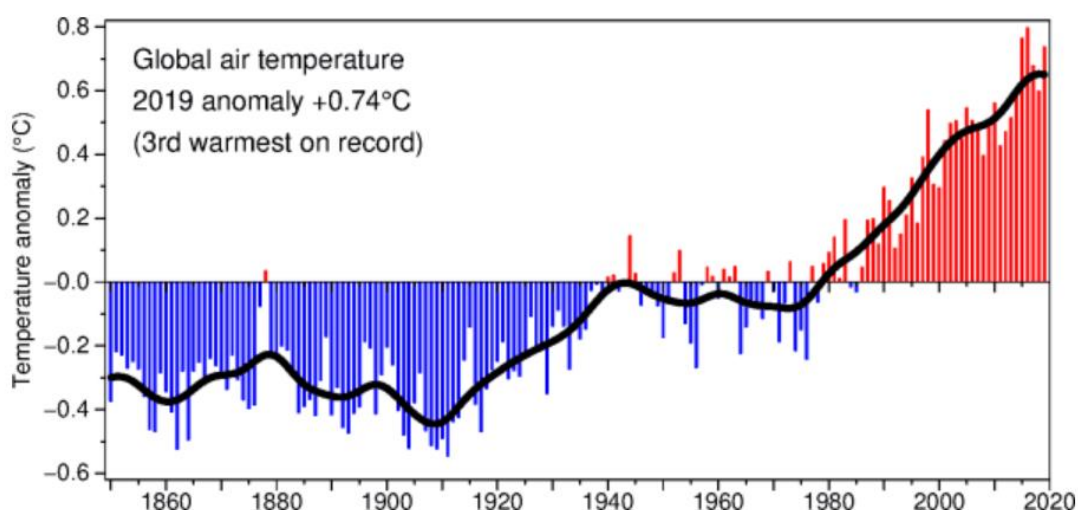


Рис.1.6. Температурные аномалии по поверхности суши (<http://www.cru.uea.ac.uk/>)

Климат бассейна Верхнего Дона определяется как умеренно-континентальный. Лето достаточно жаркое, зима умеренно-холодная. Ярко выражена сезонность. Он характеризуется холодной зимой со средними месячными температурами воздуха до -10°C , постоянным снежным покровом и теплым продолжительным летом с температурами июля от 18° до 21°C .

Климат района исследования формируется под влиянием умеренных, тропических и арктических воздушных масс. Равнинный рельеф области изучения не является преобладающим

щим фактором и не имеет существенного влияния на климатическую систему. Небольшие различия проявляется только в несколько повышенном, относительно общего уровня, количеством осадков на наветренных склонах возвышенностей.

Область имеет три климатических района: теплый, умеренно жаркий и жаркий. На севере Воронежской области угол падения солнечных лучей изменяется от $61^{\circ}50'$ в июле до $14^{\circ}50'$ в январе. На юге области изменяется соответственно от $63^{\circ}30'$ до $16^{\circ}30'$.

Среднегодовая температура воздуха составляет $+5^{\circ}\text{C}$ на севере области и $+7^{\circ}\text{C}$ — на юге (южнее г. Богучара).

Самым теплым месяцем для Воронежской области является июль. Среднеиюльская температура составляет $+19,6^{\circ}\text{C}$ на севере и $+22^{\circ}\text{C}$ на юге (в бассейне Богучарки). В отдельные годы она превышает среднемноголетние показатели, увеличивая свое влияние на обмеление родников. Так, в июле 1938 г. были зафиксированы следующие высокие средние значения температуры: в г. Воронеже $+24,7^{\circ}\text{C}$, в г. Богучаре $+27,4^{\circ}\text{C}$. В источниках в 1938 г. и особенно в следующем, 1939 г., наблюдались очень низкие дебиты воды. К тому же в летний период 1938 и 1939 гг. выпало мало атмосферных осадков. Абсолютный максимум температуры в г. Богучаре в июле достигал $+43^{\circ}\text{C}$, в г. Воронеже $+41^{\circ}\text{C}$. Высокие температуры воздуха наблюдались также летом 1972, 1981, 1995, 1998 гг. В августе 1972 г., например, в г. Воронеже отмечена средняя температура $+25^{\circ}\text{C}$ (7 августа термометр показывал $+37,5^{\circ}\text{C}$). В 1981 г. максимумы среднемесячных температур отмечены в июле: в г. Воронеже $+22,6^{\circ}\text{C}$, в г. Богучаре $+22,9^{\circ}\text{C}$. Максимумы в конце месяца доходили до 36°C . А 1998 г. был самым теплым на всей планете за 150 лет.

В бассейне Верхнего Дона продолжительность солнечного сияния увеличивается с северо-запада на юго-восток от 1830 до 1990 ч. Это существенное значение. Максимум солнечного сияния приходится на июнь-июль и составляет 270-280 ч на северо-западе, до 420 ч на юго-востоке. Минимум отмечается в декабре.

Территория области находится под влиянием умеренных воздушных масс и западного переноса. Климат формируется в результате вмешательства умеренных, тропических и арктических воздушных масс.

Среднегодовое количество осадков в области уменьшается с северо-запада на восток и юго-восток от 560 до 450 мм (рис. 1.7).

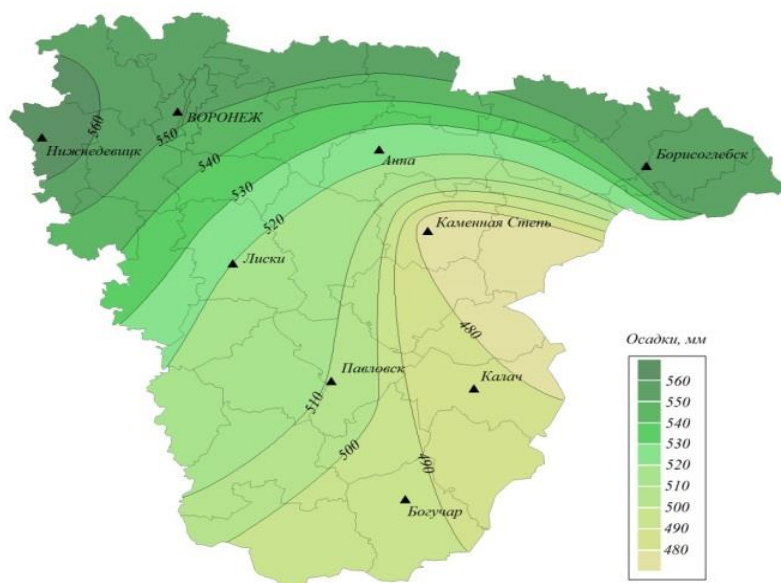


Рис.1.7. Годовая сумма осадков за период мониторинга (Дмитриева, 2015)

Зима в районе исследования, как правило, умеренно холодная. Наблюдаются частые оттепели. Активный западный перенос воздушных масс способствует тому, что в декабре и первой половине января вместо снега часто наблюдаются дожди. Зимний период в Воронеже продолжается в среднем 127 дней.

В весенний период - апрель характеризуется неустойчивой погодой. В отдельные дни месяца температура может достигать 20 °С и выше, однако в некоторые дни может наблюдаться резкое похолодание.

Лето на территории тёплое. Июнь бывает, дождлив и прохладен, но июньские заморозки в окрестностях города Воронеж случаются не чаще чем раз в столетие. В июле-августе устанавливается жаркая и сухая погода. Это связано с формированием антициклона. Средняя продолжительность климатического лета (с периодом среднесуточных температур выше +15 градусов) составляет 114 дней (Курдов, 2000).

Осень тёплая, устойчивые заморозки начинаются в среднем лишь после 10 ноября. Среднесуточная температура опускается ниже +10 °С в среднем 3 октября и ниже +5 °С — 25 октября. В северо-западных районах среднегодовая температура области составляет +3.50 +4.50; в южных и юго-восточных +4.50 +5.50. В отдельные годы средняя годовая температура воздуха может колебаться в значительных пределах (от +2.3⁰ градуса до +7.3⁰).

Вследствие закономерного увеличения континентальности климата с запада на восток, климат Окско-Донской низменности более континентальный, чем климат Среднерусской возвышенности. Это проявляется в относительно пониженных температурах зимних месяцев и несколько повышенных летних, в более высокой амплитуде средних температур (табл.1.1.1).

Таблица 1.1. Температура воздуха по метеостанциям Липецкой и Воронежской, Тамбовской, Орловской, Белгородской и Курской областям по периодам за год

Название метеостанции	Среднегодовая температура воздуха			Холодный период (XI-III)			Теплый период (IX-X)		
	1991-2020 гг.	норма	отклонения	1991-2020гг.	норма	отклонения	1991-2020 гг.	норма	отклонения
Липецк	6.2	5.5	0.7	-5.4	-5.7	-0.3	13.4	13.4	0.0
Лев-Толстой	5.15	4.7	0.45	-5.6	-6.5	-0.9	13.1	12.7	0.4
Елец	6.7	5.5	1.2	-4.4	-5.5	-1.1	13.8	13.3	0.5
Конь-Колодезь	6.9	5.6	1.3	-4.6	-5.4	-0.8	14.3	13.7	0.6
Воронеж	7.5	5.8	1.7	-4.2	-5.7	-1.5	15	13.5	1.5
Тамбов	6.4	5.6	0.8	-5.7	-5.4	0.3	15.1	13.7	1.4
Курск	7.0	5.5	1.5	-4.0	-5.7	-1.7	15.1	13.7	1.4

Как видно из таблицы 1.1, среднегодовая температура воздуха и средняя температура по периодам (теплый и холодный) на большинстве метеостанций повысилась на 0.5 0-1.5.

Количество атмосферных осадков по областям Верхнего Дона приводится в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Количество выпадающих атмосферных осадков (мм) по периодам за год, холодный и теплый периоды.

Название метеостанции	Среднегодовое количество осадков (мм)			Холодный период (XI-III)			Теплый период (IX-X)		
	1991-2019 гг.	норма	% от нормы	1991-2019 гг.	норма	% от нормы	1991-2019 гг.	норма	% от нормы
Липецк	513	567	90	145	200	73	368	367	100
Лев-Толстой	547	587	93	186	201	93	361	381	94
Елец	600	581	103	189	192	98	411	389	106
Конь-Колодезь	534	531	101	160	171	94	374	360	104
Воронеж	587	567	96	176	191	92	420	388	108
Среднее	558	561	98	181	196	92	393	379	103

Областное среднегодовое количество осадков и количество осадков в теплый период соответствует климатической норме. Несколько меньше осадков за последние годы выпадает в холодный период – 90 % от многолетней нормы.

Режима выпадения осадков по областям за период осреднения 1991-2020 гг.:

-среднегодовое количество осадков колеблется от 513 до 608 мм и соответствует многолетней норме;

-меньшее количество осадков выпадает за холодный период года (при осреднении за последние 12 лет) при средней сумме 170 мм - 90% от многолетней нормы;

-увеличение нормы осадков зафиксировано (1991-2020 гг.) в феврале, сентябре и октябре - 120-140% от месячной многолетней нормы.

Таким образом, повышенный годовой температурный фон и среднемноголетний уровень годовых атмосферных осадков не способствуют возрастанию минимального стока. Очевидно, что наблюдающиеся изменения в минимальном стоке связаны с внутригодовым перераспределением осадков, температуры воздуха и изменением генезиса весеннего стока (Дмитриева, Бучик, 2016).

1.1 Рельеф

1.1.1 Общая характеристика рельефа

Окско-Донская низменность – это слегка волнистая, местами плоская, слабо расчлененная оврагами и балками низменная равнина, абсолютная высота которой редко превышает 180 м. Она занимает значительную северо-восточную часть территории изучения. Долины, как правило, врезаны незначительно. В рельефе нередко ведущую роль играют широкие песчаные террасы. [1].

Исследуемая территория включает в себя Тульскую, Воронежскую, Липецкую области, значительную часть Тамбовской области, небольшие части Орловской, Белгородской и Курской областей и находится в пределах лесостепной и степной зоны. Лесостепная зона подразделяется на две провинции Среднерусскую возвышенность и провинцию Окско-Донской равнины.

В структурно-геоморфологическом отношении район работ относится к Окско-Донской флювиогляциальной равнине и приурочен к Воронежскому геоморфологическому району. Основные формы рельефа – долинно-балочная сеть и водоразделы. Долины рек имеют четко выраженное асимметричное строение, получившее отражение в крутых склонах на правобережьях и террасированных левобережьях.

Почвообразующими породами на изучаемой территории являются лессовидные суглинки тяжелосуглинистого и глинистого механического состава, реже покровные суглинки, подстилаемые супесями, песками, и плотными коренными породами, преимущественно карбонатными. Почвенный покров Среднерусской равнины представлен тремя подзонами: и северной лесостепи на серых лесных почвах и оподзоленных черноземах, подзона типичной лесостепи на выщелоченных и типичных черноземах и подзона южной лесостепи на обыкновенных (среднегумусных) черноземах. Большая часть территории бассейна расположена в лесостепной зоне.

Исследуемая территория находится в Верхнедонской лесостепной подпровинции в западном лесостепном районе, восточно-европейской лесостепной провинции Евразийской степной области.

1.2 Геологические условия (тектоника и стратиграфия)

В этом разделе описано геологическое строение образований кристаллического фундамента и осадочного чехла, вскрывающихся на изучаемой территории современным эрозионным врезом.

1.3 Гидрогеологические условия

В гидрогеологическом плане, исследуемая территория располагается на стыке Московского, Донецко-Донского и Приволжско-Хоперского артезианских бассейнов в пределах сводовой части Воронежского кристаллического массива. Особенности геологического строения, рельеф, гидрография и климат создают сложные и разнообразные гидрогеологические условия.

Водоносный современный аллювиальный горизонт – (*a IV*) распространен повсеместно в долинах рек и балок. Водовмещающими являются отложения пойм и балочного аллювия, представленные обычно песками и суглинками. Мощность горизонта изменяется от долей метра в долинах оврагов и балок до 20 м в поймах крупных рек. Глубина залегания подземных вод горизонта не превышает 1 – 3 м. Горизонт имеет тесную гидравлическую связь с поверхностными водотоками и подстилающими водоносными подразделениями дочетвертичных отложений, часто составляя с последними единый комплекс. По всей площади распространения современный аллювиальный горизонт, вследствие низкой защищенности, является наиболее уязвимым для поверхностного загрязнения.

Водоносный верхне-среднечетвертичный аллювиальный комплекс – (*a II – III*) распространен в долинах рек и включает подземные воды, приуроченные к отложениям надпойменных террас. Водовмещающие отложения представлены песками различного гранулометрического состава с прослоями суглинков и глин, в основании отмечается базальный гравийно-галечниковый горизонт мощностью от первых сантиметров до 3.5 м.

1.4 Гидрография. Исходные данные

Объектом исследования является минимальные расходы воды рек Бассейна Верхнего Дона. Для анализа использовались данные наименьших среднесуточных расходов воды, средний расход воды за 30 суток за зимний период и летне-осенний период среднего расхода воды за 30 суток.

Низкий сток, определяющий водные ресурсы рек в период маловодья, представляет большой научный и практический интерес.

Объем низкого стока определяется по данным меженных расходов воды (средних многолетних и вероятностных) по их продолжительности по времени. За время малой водности часто принимают полную межень, летне-осенний и зимние сезоны, лимитирующие (маловодные) периоды лета, осени, зимы, а также продолжительные интервалы времени-месяц, сутки.

Гидрологический режим рек определяется природными условиями, такими как климатические факторы, геологическое строение территории, географическое положение, морфометрия водосбора и другими. Одни из них воздействуют прямо (климатические), другие - опосредованно (геологическое строение, морфометрия бассейна и др.).

Начиная с 1970-х годов XX в, на Европейской территории России происходят значимые изменения во внутригодовом распределении стока большинства рек, ввиду активной антропогенной деятельности в частности и высокой степени урбанизации территории в Советский период из нарастающих производственных мощностей. Минимальный сток рек, формирующийся в бассейне Верхнего Дона в летне-осеннюю и зимнюю межень, трансформируется в соответствии с меняющимися природными условиями. Вследствие увеличения среднегодовой и сезонной температуры воздуха фиксируется возрастание абсолютных минимумов межени, особенно зимней межени. Повышение абсолютных минимумов зимней межени происходит на фоне увеличения зимнего стока, являющегося откликом на февральские оттепели, образование паводочного стока и претерпевший изменения генезис зимнего стока. Летне-осенний сток также имеет тенденцию роста. Это может происходить из-за увеличения доли подземного питания рек, характерного особенно для правобережных притоков Верхнего Дона.

Первые наблюдения за стоком воды рек бассейна Дона относятся к 1876-78 гг., когда было открыто 16 пунктов на Дону и один на Хопре. Несколько позже (1881-90 гг.) было открыто еще 6 пунктов: на Дону - г. Лиски, ст. Казанская, х. Хованский, ст. Раздорская; на Хопре - ст. Поворино и на Северском Донце - г. Лисичанск. В этих пунктах в 1917-28 гг. и в 1941-44 гг. наблюдения прерывали. Наиболее полный ряд наблюдений (с 1876 г.) сохранился на Дону

у г. Калача, но начиная с 1952 года. гидропост находился в подпоре из-за сооружения Цимлянского водохранилища.

Наиболее активно гидрометрическая сеть в бассейне Дона начала наращивать потенциал в 30-е годы, когда были открыты посты на реках Сосна, Воронеж, Битюг, Хопер, Ворона, Медведица, Иловля, Северский Донец и др.

В работе, в качестве исходных данных использовались ряды минимальных расходов воды зимнего и летне-осеннего периода рек бассейна Верхнего Дона на период с 1940-50-х годов по 2018-2022 г. по 16 пунктам стационарной сети наблюдений, представлены в таблице 2.2.

Использовались посты с диапазоном площадей от 452 до 44 900 км² сводные данные по которым представлены в таблице 2.2.

Таблица 1.4.1 – Распределение постов по продолжительности рядов наблюдений

Продолжительность рядов, лет	n<30	30<n≤40	40<n≤50	50<n≤60	n<60	Всего
Количество лет ряды среднесуточные минимальные расходы воды	1	-	1	-	14	16

Таблица 1.4.2 – Сведения о гидрологических постах, используемых для исследования низкого стока

№	Код поста	Река - Пост	Площадь, км ²	координаты		Период действия, число месяц, год		Отметки нуля поста
				долгота	широта	от	до	высота, м БС
1	78004	р. Дон- г. Задонск	31100	38.55	52.24	14.01.1890	Действ.	98.09
2	78078	р. Девица – с. Девица	1490	51.38	38.57	15.09.1955	Действ.	92.38
3	78111	р. Битюг - г. Бобров	7340	51.05	40.05	01.02.1928	Действ	82.75
4	78109	Р .Битюг- пгт. Мордово	903	52.05	40.45	20.07.1932	Действ.	123.53
5	78144	р. Хопер – х. Бесплемяновский	44900	50.45	41.54	20.08.1929	Действ	69.11
6	78054	р. Сосна – г. Елец	16300	52.38	38.31	14.03.1927	Действ	106.93
7	78050	р. Красивая Меча – г. Ефремов	3240	52.27	37.36	01.08.1944	Действ	143.33
8	78106	р. Тихая Сосна- с. Алексеевка	2060	50.38	38.42	15.07.1941	Действ	89.93
9	78082	р. Воронеж-г. Липецк 2	15300	52.34	39.34	11.07.1975	Действ.	99.67
10	78087	р. Воронеж- с. Чертовицкое	21000	51.49	39.17	26.11.1928	Действ.	90.10
11	78092	р.Лесной Воронеж-сл. За- воронежская	2000	52.53	40.29	20.12.1931	Действ.	114.66
12	78125	р.Россошь- пгт Подгоренский	452	50.24	39.38	01.11.1952	Действ.	87.67
13	78130	р. Подгорная-г.Калач	1790	50.25	41.03	01.09.1932	Действ.	80.49
14	78164	р. Ворона- с.Уварово	9890	51.58	42.16	30.09.1954	Действ.	103.91
15	78163	р.Воронеж-с. Чутовновка	5560	52.36	42.45	14.05.1914	Действ.	121.14
16	78142	р.Хопер- г.Новохоперск	34800	51.05	41.39	04.04.1932	Действ.	76.21

Как следует из таблицы 2.1, продолжительность гидрологических наблюдений на постах варьирует от 135 (р. Дон-г. Задонск) до 70 (р. Девица – с. Девица) лет, что позволяет сформировать ряды минимального стока

1.5 Гидрологический режим

Реки района исследования по типу гидрологического режима относятся к восточно-европейскому. В гидрографе отчетливо выражено весеннее половодье, в период которого проходит 40% – 90% годового стока. Водные ресурсы в значительной степени пополняются за счет таяния снега. При сильном промерзании почвы почти вся талая вода приводит к высоким и длительным паводкам.

Продолжительность половодья зависит от размера водотока, на крупных реках оно может продолжаться до 1,5 месяцев, а на малых – 2 – 3 недели. Половодье характеризуется довольно значительным подъемом уровней воды, на р. Дон и других крупных реках оно может достигать 9 м.

Исследуемая область реки относится к гидрологическому режиму Восточноевропейского типа. В её гидрограмме ярко выделяется весенний паводок, в течение которого проходит 40-90% годового стока. Водные ресурсы в значительной степени формируются за счет таяния снега. При аномальном промерзании почвы по глубине практически вся талая вода приводит к увеличению длительности и объема стока.

Паводки характеризуются значительными подъемами уровня воды. На крупных реках, таких как река Дон, максимальный уровень воды может достигать 9 метров выше уреза воды.

Минимальные расходы и уровни воды наблюдаются в период низкой воды летом-осенью (могут прерываться дождевыми паводками). Таким образом расходы и уровни этих паводков ниже, чем у весенних. На больших и малых водотоках подъем уровня воды во время дождевых паводков и обычно не увеличиваются больше чем на 2 метра.

Зимний период низкой воды в реках региона длится 110-120 дней.

Минимальные расходы и уровни воды наблюдаются в период летне-осенней межени, прерываемой дождевыми паводками. Но по своей величине расходы и уровни в период паводков меньше, чем в период весеннего половодья. Подъем уровней во время дождевых паводков как на крупных, так и на мелких водотоках, обычно не превышает 2 метров.

Продолжительность зимней межени на реках района составляет 110 – 120 дней.

Исследование минимальных расходов воды особенно необходимо в наше время и представляет большой научный и практический интерес для реализации различных технических задач.

”Минимальные расходы воды” определяются за период наименьшего стока длительностью от 1 до 30 дней, который приурочен к маловодному времени года (межени). Для рек Европейской части России маловодье наблюдается в зимний, летний и осенний сезоны года.

Маловодная фаза наступает на реках в результате резкого сокращения притока поверхностных вод в речную сеть и перехода водотоков на подземное (грунтовое) питание.

Исследования генезиса низкой водности и определяющих его факторов стали проводиться с начала XX века. Первооткрывателем в истории изучения маловодных периодов стал Д.И. Кочерин, который провел сбор и анализ обширной базы натурных наблюдений на водомерных постах. Главным его достижением стал научный труд, где он собрал многолетние исследования за низкими и наименьшими расходами воды рек Европейской части СССР (Труды Московского ин-та, 1927).

Позже, была опубликована работа Л.А Сибирцевой (1937), в исследовании которой было сделано районирование на реках территории СССР (Европейской части). Всего в ее работе были проанализированы сведения по минимальным расходам воды по 280 пунктам наблюдений.

Также известны работы Одноворецева (1938), который в отличие от работ Д.И. Кочерина, не учитывал генезис связей минимального стока с гидрогеологическими условиями рельефа и районированием территории.

В этот период времени японские ученые Ишихара и Токаге рассмотрели динамику межженного стока и для условий Японии предложили дифференциальные уравнения, выражающие изменения минимального стока при наличии или отсутствии осадков для водосборов с площадью до 2000 км² (Ishihara T, Tokage E.A, 1965).

В исследовании М.Э. Шевелева (1937) рассматривается процесс наступления минимального стока в результате истощения подземных запасов влаги и потерь стока летом на испарение, а зимой на ледообразование. В своей работе он рассматривает сам генезис процесса формирования минимального стока как совокупность факторов, которые обуславливают величину минимального стока (осадки, гидрогеологическое строение бассейна, озерность, ледники, температура воздуха, испарение и т.д.).

Главным фактором, влияющим на образование минимального стока, автор считает площадь водосбора и величину среднего годового стока и предлагает эмпирическую формулу для расчета минимального стока рек ЕТР:

$$m=aFb*M0n, \quad (1)$$

где a - постоянный коэффициент ($a=0,155$), b и n -показатель степени ($b=0,034$, $n=0,94$).

В дальнейшем Шевелев добавляет третий аргумент в виде коэффициента (λ'), зависящего от толщины льда на реках к концу зимы.

Именно М.Э. Шевелев первый применил косвенный метод расчета статистических характеристик (C_v и C_s) рядов минимального стока, что дает возможность рассчитать вероятностные характеристики минимального стока.

Большой вклад в изучение формирования меженного стока внес Н.Д. Антонов (1941). В своих трудах ученый выделял климат как главный формирующий фактор. Изучая факторы, приводящие к истощению расходов воды во время периодов межени, исследователь выводит зависимость минимального стока от среднего годового стока. В его работах приводятся выводы о формировании меженной водности за счет притока грунтовых вод в русла рек, дренирующих водоносные горизонты.

Исследуя частные стокообразующие характеристики минимального стока, автор разработал оптимальную расчетную формулу.

Формула Н.Д. Антонова имеет вид (2):

$$m = M_0^n (aF^b - \frac{t}{\sqrt[4]{\omega + 1}}) \quad (2)$$

Как главные факторы Антонов принимает размер водосбора (F) и норму годового стока (M_0). Кроме того, в работах вводится поправка на озерность (ω) и географический параметр (f), где $b=0,035$; $n=1,32$ для летнего суточного минимума, а для зимнего суточного и низкого месячного (за год) $n=0.82$.

На основании натурных данных наблюдений, для рек Европейской части России, были выявлены эмпирические зависимости для расчета минимальных среднесуточных модулей стока отдельно за зимней и летний период (Попенко, 1959).

В.А. Урываев в 1941 году, при анализе обеспеченности расходов внутригодового распределения стока на территории ЕТС, пришел к выводу, что влияние водосборной площади на минимальный сток можно признать несущественным, а в качестве основных факторов при формировании минимального стока рек будет целесообразно выделять степень водности района, а также его положение на местности. Кроме того, для озерных рек, обладающих повышенным минимумом стока, автор вывел эмпирическое уравнение для расчета модульного коэффициента минимального стока.

В работах М.П. Распопова (1950 года), рассматривается районирование Европейской части России по условиям стекания подземных вод в реки. Районирование территории приводится, исходя из схожих условий формирования и разгрузки подземных вод в русла и водоемы в зависимости от воздействия на них физико-географических и геологических факторов.

Данная типизация позволила А.М. Норватову (1950) провести генетический анализ условий формирования минимального стока рек в различных физико-географических зонах. Автор представляет собственную типизацию схемы выделения районов с однотипными условиями формирования минимального стока, по генезису питания малых рек подземными водонесными горизонтами в период межени (Владимиров, 1970).

Значимыми в области изучения генезиса гидрологических процессов стали работы Н.П. Чеботарева: «Вариации стока и его факторов», «Учение о стоке», «Сток и гидрологические расчеты», «Гидрология суши», а также ряд публикаций, которые нашли практическое применение.

Автором была разработана схема, в основе которой лежит модель изохрон, которая включала площадь водной поверхности речных русел, потери на испарение и ледообразование. Для их количественного определения были предложены эмпирические зависимости. Также автором были проведены исследования по долгосрочным прогнозам минимального стока для нужд водного транспорта.

Н. П. Чеботаревым были привнесены схемы расчета вариации минимального стока, исследования по которым были продолжены и развиты доктором географических наук, профессором А.Г. Курдовым для определения минимальных расходов воды на реках Центрального Черноземья.

В монографии А.Г. Курдова (1970) были проанализированы существующие методы расчета минимального стока и был обоснован новый метод расчета с учетом гидрологического районирования территории Центрально-Черноземных областей. В 1951-1954 годы в научных публикациях А.Г. Курдова была обоснована локальная формула для расчета минимального стока малых рек, объединенных в обособленные гидрологические районы центрально-черноземных областей. Формула имеет вид (3):

$$Q_{min} = A_0 (F - F_0) n \quad (3)$$

Данная формула отражает общую закономерность формирования стока малых рек гидрологического района.

Из публикации следует, что структура данной формулы вытекает из уравнения водного баланса и уравнений движения, составленных для руслового потока по методу изохрон. Величина A_0 отражает составляющие воднобалансового уравнения (подземное питание $\bar{x}$, атмосферные осадки- $\bar{x}^-$, испарение с водной поверхности Z , транспирация с водной растительности t , потребление воды на хозяйственные нужды P : $A_0 = f(\bar{x}, \bar{x}^-, Z, t, P)$. Вторым параметром

F_0 представляет собой единичную площадь ежегодного нулевого стока в бассейне реки. Величина третьего параметра—среднерайонного показателя степени n —всегда превышает единицу, поскольку она характеризует в пределах района более быстрое увеличение максимальных расходов воды малых рек с ростом их активной площади водосбора $F - F_0$.

Согласно полученным данным выявлено, что площади нулевого стока в период маловодья (водосборы сухих балок, оврагов, суходолов, лощин), которые вычитаются из общей площади водосбора реки, имеются в каждом гидрологическом районе и речном бассейне.

В своей монографии А.Г. Курдов (1970) на примере бассейнов рек центрально-черноземных областей, среднего Дона установил основные закономерности формирования минимального стока, акцентировав особое внимание на малых реках, площадью водосбора до 2000 км².

Автор применяет уравнение водного баланса для русел рек, подчеркивая, что это позволяет переосмыслить некоторые составляющие процесса формирования стока и оценить составляющие стока, особенно его подземную часть. В своей работе А.Г.Курдов, в целях повышения точности расчета, вводит гидрологическое районирование территории по признаку однородности формирования минимумов.

В монографии А.Г. Курдова "Минимальный сток" (1970), рассматривается такое понятие как "район-эталон", которое используется для обоснования величины суммарного коэффициента природных условий, определяющих минимальный сток малых и больших рек ($K_0 = K_{\Sigma}$), позволяют получить обобщенную формулу минимального стока:

а) для нормы равнинных рек (4):

$$\frac{\bar{Q}_{\min}}{K_0(H_{cp})} = 0,002 \cdot (F - F_0)^{1,2} \dots \dots \dots (4)$$

Горных (полугорных) рек (5):

$$\frac{\bar{Q}_{\min}}{K_{0,p}(H_{cp})} = 0,002 \cdot (F - F_0)^{1,2}, \quad (5)$$

где $K_0(H_{cp})$ – функция от средней высоты водосбора;

б) для вероятностных максимумов равнинных рек (6):

$$\frac{\bar{Q}_{\min}}{K_{0,p}(H_{cp})} = 0,002 \cdot (F - F_0, p)^{1,2}, \quad (6)$$

Ученый рассматривает методику определения вероятностных минимумов для малых и эпизодически пересыхающих водотоков.

В работах хорошо изучены погрешности расчета переходных коэффициентов для постоянных и эпизодически пересыхающих рек Центрально-Черноземного региона. А.Г. Курдов приводит расчеты мутности и модуля стока взвешенных наносов, нормы и изменчивости стока рек Центрально-Черноземного региона.

Особое внимание уделяется гидрологическому районированию, в основе которого лежит закон мировой географической зональности. Выделение сетки районов базируется на учете общих генетических признаков, определяющих речной сток, а также главных его факторов, входящих в уравнение водного баланса, с учетом климатических факторов. В расчетной формуле, были учтены рельеф, почвенные разности, пруды, озера, болота, лесистость и хозяйственная деятельность человека. В работе также учтены геологические и гидрогеологические факторы, которые влияют на качество и особенности подземных горизонтов. В пределах Центрально-Черноземных областей (ЦЧО) А.Г. Курдовым выделено 9 гидрологических районов.

В пределах Воронежской области А.Г. Курдов (1984) выделяет пять гидрологических районов: Девицкий, Чернокалитвинский, Подгоренский (расположены на Среднерусской и Калачской возвышенностях), Воронежский, Битюго-Хоперский (расположены на Окско-Донской равнине) (рис. 1.1).

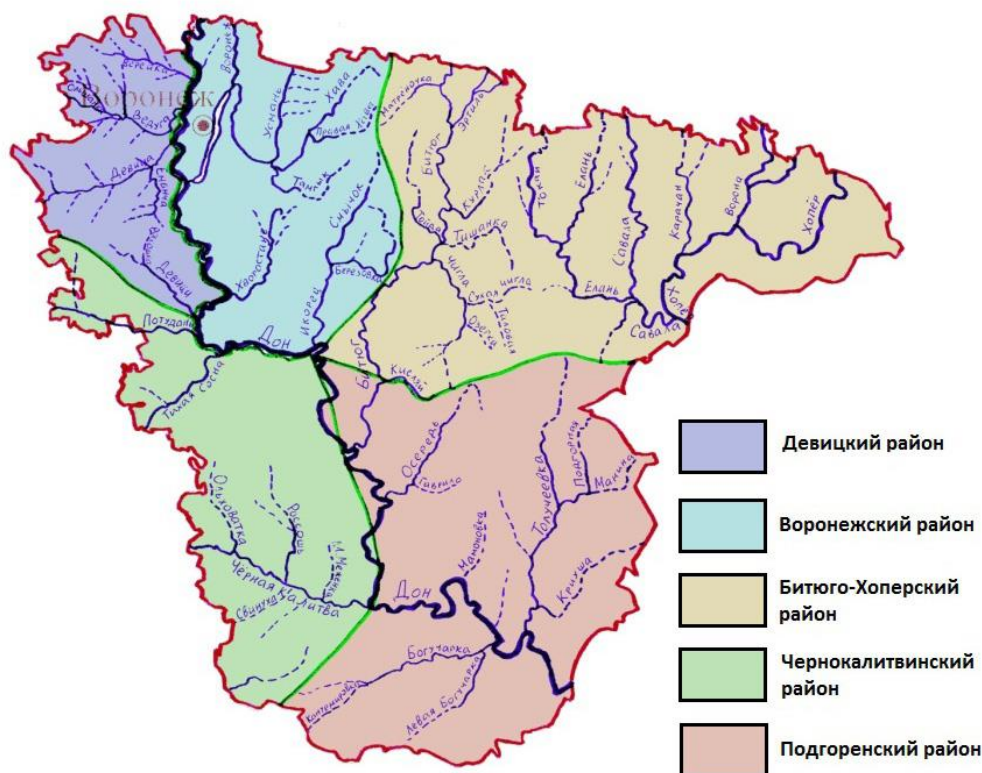


Рис.1.5.1 Гидрологическое районирование Воронежской области (Курдов, 1984)

Девицкий гидрологический район занимает северо-западную, наиболее возвышенную часть Воронежской области и представляет собой платформенную равнину, с полого-холмистым рельефом, с развитой овражно-балочной сетью. Его площадь равна 3300 км², средняя высота 190 м. В него входят бассейны рек Девица, Ведуга, Большая Верейка. Густота речной сети составляет 0.28 км на 1 км² площади водосбора, без учета малых водотоков длиной до 10 км – 0.17 км/ км². Площадь оврагов и балок находится в пределах 9-10%. В районе наблюдаются высокие значения поверхностного и подземного стока.

Основные водоносные горизонты находятся в верхнедевонских отложениях, в которых распространены карстовые явления. Меженный сток рек имеет высокие уровни. Показатель районирования К составляет 1.60 м³/с на км² площади речного зеркала. Реки пересыхают ежегодно при небольшой площади водосбора (15 км²). В наиболее засушливые годы площадь пересыхания достигает 85 км² (Курдов, 1970).

Чернокалитвинский гидрологический район располагается на юго-западе Воронежской области. Водная сеть района представлена бассейнами рек: Потудани, Тихой Сосны, Черной Калитвы с Россошью и Ольховаткой. Густота речной сети составляет 0,16 км на км². Площадь оврагов – до 20 %.

Густота речной сети не превышает 0,16 км/км², а для рек, имеющих длину более 10 км. Гидрологическая сеть дренирует четвертичные, палеогеновые и меловые водоносные горизонты. Реки в меженный период в основном питаются подземными водами меловых отложений. Поверхность района представляет собой возвышенную равнину, расчлененную долинами, балками и оврагами. Область характеризуется значительной расчлененностью рельефа, которая достигает 100-150 м и сравнительно небольшой мощностью четвертичных отложений. Основными материнскими породами являются палеогеновые пески, песчаники и глины на водоразделах и породы меловой системы по бортам речных долин.

В бассейне рек Черная Калитва и Ольховатка отмечены проявления мелового карста, который хорошо заметен в понижениях, области которого хорошо просматриваются на спутниковых снимках.

Бассейн реки Черная Калитва и её притоков расчленен глубокими длинными и симметричными балками, которые сложены мелом и мелоподобными мергелями.

Питание грунтовыми водами умеренное и происходит в основном водоносными горизонтами мергельно-меловой толщи, позднемелового возраста. Ежегодно пересыхают малые реки с площадью водосбора до 350 км² и длиной суходола 30 км. Годовых осадков 500 мм. Годовой сток составляет 80 мм.

Воронежский гидрологический район располагается в северной части Воронежской области. В границах района располагаются бассейны рек Икорец и Хворостань, а также бассейн реки Усмань. Гидрологическая сеть дренирует четвертичные, палеогеновые водоносные горизонты. Поверхностный и подземный сток умеренные, максимальные снегозапасы равны 101 мм. Меженный сток умеренный.

В геоморфологическом отношении это слабо расчлененная равнина с распространенным пойменно-террасовым типом местности. Растущие балки и овраги врезаны слабо, неглубокие и довольно ветвящиеся.

Реки получают питание из флювиогляциального неогенового водоносного комплекса. Этот комплекс недостаточно водообилен. Неогеновые пески, содержащие воду, имеют мощность от 30 до 100 м. Водоносные горизонты питают крупные реки – Дон и Воронеж, мелкие речки – в меньшей степени.

Месячный слой низкого стока 2,5 мм. Ежегодно пересыхают и перемерзают реки при площади водосбора менее 100—120 км². Это соответствует длине сухого водотока от водораздела — 25 км. В катастрофически засушливое лето соответственно 330—480 км² и 55 км. Годовых осадков около 525 мм. Годовой сток равен 114 мм.

Подгоренский гидрологический район занимает юго-восточную часть Воронежской области. Гидрологическая сеть дренирует четвертичные, палеогеновые и меловые водоносные горизонты. Поверхностный и подземный сток района низкий. Район характеризуется низкими значениями летних и зимних расходов воды. Густота речной сети не превышает 0.10 км/км², а для рек длиной более 10 км - около 0.08 км/км². Площадь оврагов и балок составляет 14%. Поверхностный и подземный сток рек района низкие. Снегозапасы составляют 65 мм, количество осадков около 590 мм, суммарное испарение с водной поверхности самое высокое – 650-725 мм.

Водоносные горизонты, гидравлически связанные с поверхностными водотоками, залегают в породах меловой системы. Интенсивность подземного питания умеренная. Район характеризуются низкими значениями летних и зимних расходов воды. Критерий районирования К очень низкий – 0.35. Ежегодно пересыхают реки с площадью водосбора 550 км² и длиной суходола 40 км. Осадков выпадает около 580 мм в год, среднегодовой сток равен 55 мм.

Битюго-Хоперский гидрологический район находится в северо-восточной части области. Занимает южную окраину Окско-Донской низменности, имеет вид широкой полосы, протянувшейся от среднего течения Икорца на западе до Хопра и Вороны на востоке.

Площадь района 16300 км². Средняя высота 162 м. В район входят бассейны следующих рек: Битюг с Чиглой, Савала с Еланью и Токаем, Карачан, низовья Вороны, средняя часть Хопра. Густота речной сети составляет 0,27 км на км². Площадь оврагов и балок – 10 %.

В этом районе питание рек грунтовыми водами очень незначительно. Водоносные горизонты также относятся к неогеновому комплексу, но мощность их значительно меньше, чем в Воронежском районе. Ежегодно пересыхают реки с площадью водосбора до 460 км². Длина суходола 83 км. Количество осадков составляет 470 мм в год. Годовой сток рек – 88 м.

Район характеризуется значительным развитием долинно-балочного рельефа с отдельными участками овражно-балочного. Основной морфоструктурой рельефа является Калачская возвышенность. Основными рельефообразующими породами являются мощные рыхлые песчано-глинистые отложения неогенового возраста и перекрывающие их флювиогляциальные пески, валунные и лессовидные суглинки.

Водоносные горизонты маломощные, соответственно их роль в питании рек небольшая. В пределах изучаемого района Дон протекает в Подгоренском и по границе Воронежского и Чернокалитвинского гидрологических районов. Наиболее крупные притоки Дона на этом участке – Хворостань, Потудань, Тихая Сосна, Икорец, Девица.

Низкий сток в работах А.М. Владимирова (1970, 1976) рассматривается как маловодная фаза в результате резкого сокращения притока поверхностных вод в речную сеть. Отмечается связь маловодных периодов непосредственно с явлениями пересыхания и замерзания рек.

Практический интерес к данной теме возникает вследствие возрастания дефицита водных ресурсов и ухудшения качества воды. Проводится оценка использования малых рек в качестве источника водоснабжения. При этом отмечается актуальность изучения маловодных периодов для малых рек, которые являются наиболее чувствительными к данным периодам водности. А.М. Владимиров не разделяет понятие меженный сток и минимальный, поскольку считает, что период наименьшего стока — это часть межени, главным условием здесь выступает отсутствие значительных паводков. В частности, автор внес ясность в определение меженного периода, который он характеризует как «речной сток, наблюдающийся в маловодные сезоны при отсутствии значительных паводков». Основные принципы выделения меженных периодов на гидрографах были представлены А.М. Владимиром в 1962 г. в работе «Методические рекомендации к составлению справочника по водным ресурсам СССР», материалы которых были опубликованы в серии монографий «Ресурсы поверхностных вод СССР». Научно-методический подход А.М. Владимирова принципиально отличался от ранее выполненных работ (З.В. Джорджио, Г.В. Петров, Б.И. Быдин, А.М. Комлев, Б.В. Зонов, А.М. Норватов).

В его публикациях, были опробированы методы расчета минимального стока при наличии и отсутствии данных наблюдений.

В 1966 году А.М. Владимиров предложил схему расчета не только нормы минимального стока, но и коэффициента вариации (C_v) и асимметрии (C_s). В основу расчета положена зависимость расхода минимального стока воды от глубины эрозионного вреза русла, но так как эту величину сложно определить, то ее можно заменить тождественной площадью водосбора. В схеме четко различается минимальный сток холодного и теплого периодов (Владимиров, 1966). Для расчета коэффициента вариации разработана карта, а коэффициент асимметрии предлагает принимать для увлажненных районов $C_s=2 C_v$, а для засушливых $C_s=C_v$ или $C_s=1,5C_v$.

Недостатком данной работы является недоучет площадей рек с нулевым уклоном ($C<0$), который встречается, как и у временных водотоков, так и у рек с постоянным течением (например, Дон, Хопер, Сосна, Белая и т.д.), рек горных областей (Урал, Башкирия), а также у рек всех карстовых бассейнов (ЦЧО, Башкирия, Урал), и для озерных водосборов (Курдов, 1972 г.).

Все разработки были использованы в трудах государственного гидрологического института (ГГИ) в 1960-1966 гг.

По результатам исследования сотрудниками ГГИ, МГУ и ВСЕГИНГЕО были разработаны карты подземного стока с учетом данных наблюдений на территории Европейской части России, в которых были учтены особенности формирования подземного стока (обводненность пород, условия питания и разгрузки подземных вод, режим подземного стока).

Кроме того используются карты изолиний среднемноголетнего слоя сезонного стока за летне-осенний и зимний сезоны для рек ЕТС, причем сроки сезонов изменялись в соответствии с чередованием климатических сезонов, разработанные В.Г. Андреяновым. Автор разработал схему определения сезонного стока различной обеспеченности для неизученных рек. При ее построении используются параметры кривой обеспеченности годового стока и переходных коэффициентов от этих параметров к соответствующим параметрам сезонного стока (Андреянов, 1970).

Для изучения закономерностей формирования минимального стока актуальны исследования подземного стока, выполненные Б.И. Куделиным (1959,1961,1966), и оценка подземной составляющей речного стока по предложенной им методике расчленения гидрографа стока. Данный метод позволяет получить суммарные или средние (на единицу площади) величины подземного стока, вырабатывающегося суммарно во всем речном бассейне выше за-

мыкающегося створа, для которого были произведены измерения. Непосредственно расчленение гидрографа реки заключается в выделении в нем подземной составляющей с учетом закономерностей динамики подземного стока.

Одним из первых документов регламентирующий расчет минимального стока был принят в 1966 году «Указания по определению расчетных минимальных расходов воды при строительном проектировании СН 346-66».

Гидрологи США рассматривают проблему формирования и расчетов минимального стока (также и меженного), как правило, для отдельных бассейнов или достаточно крупных регионов. Их разработки осуществляются, главным образом, в двух направлениях: эмпирическое изучение фактического стока с получением отдельных графических зависимостей и использование статистических методов обобщения (Владимиров, 1970).

Основные модели расчета минимальных расходов воды сведены в таблицу 1.5.2

Таблица 1.5.2 – Модели расчета минимальных расходов воды при отсутствии данных наблюдений

Автор	Год	Модель
М.Э. Шевелев	1937	$q = a \cdot A^n \cdot M_0^m$
Н.Д. Антонов	1941	$q = M_0(\alpha \cdot A^b); C_v = a \cdot -0,131 \cdot \lg A$
А.М. Сотченко	1947	$q = \alpha (M_0 - 0,2) \cdot d^n$
Д.А. Данович	1950	$q = a + 0,51 \cdot \lg A; C_{v,a} = a \cdot 0,131 \cdot \lg A$
А.М. Норватов	1950	$q = f(A)$
Н.П. Чеботарев	1954	$M = \alpha \cdot M_0^m \cdot A^r \cdot \underline{P}_1$ A^n
К.А. Ключева	1961	$M_l = b \cdot \lg A \pm a$
А.М. Владимиров	1966	$Q = a \cdot (A \pm c)^n$
К.А. Лысенко	1966	$q = f(H_{вр})$
А.Г. Курдов	1970	$Q = A_0(A - A_{ое})^n$
Р.Г. Задорожная	1975	$q = f(\Delta h_{вр})$

В конце 1980-х годов, стало развиваться новое направление- стохастическое моделирование, разработанное на основе трудов С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (Крицкий, Менкель, 1981, 1982).

В трудах зарубежных ученых также были исследован генезис формирования минимального расхода воды в нелимитирующий период (Shaake и Chunzhen, 1988).

Известны работы, Либхера который выделил эффект климатической нестабильности проявляющийся в изменениях максимального и минимального стока (Liebsher, 1983), на реке Рейн, где были выделены региональные вариации этого влияния на низкий сток в различных частях бассейна.

В работах Вуда, показано изменение климатического режима в Великобритании и выявил тенденцию тяготения к более сухому лету и более влажной осени, что оказывает влияние на характеристики низкого стока. При этом ученый подчеркивает, что эта тенденция наблюдалась только в последнее десятилетие и, вероятно, является частью многолетнего цикла климатических изменений.

Автор предложил использовать в инженерных расчетах палеогидрологические данные для улучшения точности оценки наводнений и засух (Wood, 1987).

Следует упомянуть исследования Арнелла, который изучил возможные изменения в частоте гидрологических экстремумов в Европе. Автор отметил низкий маловодный период в Европе в середине 1970-х, а в Дании и на севере Британии очень низкие значения были зафиксированы только местами в 1980-х (Arnell, 1989).

В 1994 году Уилби разработал модель, связывающую прогнозы климатических изменений, получаемые из моделей общей циркуляции в макромасштабе, и прогнозы гидрологических компонент в масштабе водосборов. Им был использован целый ряд климатических сценариев, и влияние этих сценариев на квантили низкого стока показано на реках Великобритании. (W2ilby, 1994).

Группой американских ученых Куорнер и др. (Querner et al., 1997) посредством физико-математических моделей с шагом сутки и месяц было изучено антропогенное и климатическое влияние на модель речного стока в период межени. На моделях пяти европейских водосборов было использовано несколько климатических сценариев (увеличение температуры на 2 и 4 градуса в сочетании с увеличением или уменьшением осадков на 10 %), в результате чего, установлена связь между увеличением длительности маловодных периодов, тенденции к потеплению климата.

Необходимость моделирования рядов наблюдений вызвана недостаточной степенью репрезентативности имеющихся данных, большой степенью антропогенного вмешательства на естественные условия формирования стока, которые не поддаются естественной ретрансформации (Блохинов, Сарманов, 1968).

Основная задача при использовании в гидрологических расчетах математических моделей - это необходимость совмещения детерминированной модели (описание гидрологического цикла) и стохастической модели погоды. Использование стохастических моделей стока открыло новое направление в моделировании гидрологических процессов.

Целый ряд ученых, которые занимались изучением процесса формирования речного стока в начале 1940-х годов, данное направление представлено отечественными работами Г.А. Алексеева, М.А. Великанова, Г.П. Калинина, Е.Г. Попова, Н.А. Багрова, М.И. Будыко, А.Н. Бефани и других.

Большое внимание методам расчета минимального стока, основанных на моделировании рядов, уделяется М.В. Болговым (1966). Им описано использование стохастической модели периодически коррелированных внутригодовых колебаний речного стока. Отличие в использовании данной модели от других состоит в разнице выбора типа функций безусловного распределения, в том числе автокорреляционной функции.

На основе методов модификаций Марковского процесса, Д.Я. Ратковичем (1976, 1977, 2007) было выполнено моделирование рядов речного стока на примерах притоков к Аральскому и Азовскому морям, а также им была разработана методология водохозяйственных расчетов и управления большими водохозяйственными системами. Также известны работы по математическому моделированию гидрологических рядов для водно-энергетических и водохозяйственных расчетов Сванидзе Г.Г. (1977).

В работах зарубежных специалистов данная тема освещена такими авторами, как Р.Е. Хортон, В. Клемеша, Р.К. Линслей, М.А. Колер и другими учеными.

Использование методов математического моделирования позволило повысить степень достоверности водохозяйственных расчетов, а также позволяет применить разработку моделей для неизученных водотоков, даже при отсутствии рядов наблюдений.

Однако, использование математического моделирования, при расчете гидрологических характеристик, не включено в нормативные документы, а следовательно, не может служить обоснованием при проектировании инженерных сооружений и разработке инженерно-гидрологических проектов при строительстве линейных и площадных сооружений.

В настоящее время на основе этих методов уже разработано большое количество схем моделирования гидрологических процессов, в которые внедрены методы компьютерной обработки и графики, благодаря чему можно учитывать большое количество факторов и оперативно получать прогноз развития тех или иных гидрологических процессов.

1.6 Современный взгляд на формирование низкого стока на европейской части России

Современный период характеризуется изменением метеорологических характеристик, таких как среднегодовая температура воздуха, количество атмосферных осадков, влажность воздуха и скорость ветра, которые в свою очередь проявляются через меняющиеся параметры, формирующие водный режим водотоков (Дмитриева, 2013).

В настоящее время расчет гидрологических характеристик регламентируется нормативными документами, в частности: СП 33-101-2003 Инженерно-гидрометеорологические изыскания (СП 33...2003). При расчете минимально стока рек используются данные минимальных 30-суточных или среднемесячных расходов воды, в зимний и (или) летне-осенний сезоны водохозяйственного года.

Согласно п. 7.56 Метод определения минимального 30-суточного расхода воды зависит от категории реки: малая, средняя или большая. В зависимости от района к малым относят реки с верхним пределом площади водосбора от 1000 до 5000 км². Наименьшие значения отмечены в зонах избыточного и достаточного увлажнения, наибольшие - в районах с наличием пересыхающих или перемерзающих рек. К средним относят реки с площадью водосбора от вышеуказанных до 50000-75000 км². Реки с большей площадью считают большими.

Также обязательным к применению считается свод правил СП 11-103-97. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства (СП 11...2003), который был разработан для выполнения инженерно-гидрометеорологических изысканий при проектировании и строительства линейных и площадных сооружений. Данный нормативный документ, используется для комплексного изучения гидрологических условий, для обоснования проектных решений и обеспечения надежности проектируемых сооружений, для обеспечения надежности конструкций и сооружений, а также для разработки природоохранных мероприятий (СП 11....1997).

Региональные особенности гидрологического режима и соответствующие методы определения расчетных характеристик должны учитываться и регламентироваться территориальными строительными нормами (ТСН), имеющими статус нормативного документа субъекта Российской Федерации (СП 33...2003).

Обобщение данные наблюдений за гидрологическим режимом рек, в том числе и рек бассейна Дона на 2005 г. приводится в монографии ГГИ ‘‘Водные ресурсы России и их использование’’ (Водные ресурсы..., 2008). Коллектив ученых государственного гидрологического института под руководством И.А. Шикломанова на основе полученных оценок динамики годового и сезонного стока европейских рек делает вывод, что увеличение меженного,

особенно зимнего стока, является выраженной реакцией водосборов на потепление последних лет (Водные ресурсы, 2008, Георгиевский и др., 2012).

В Воронежском государственном университете изучение гидрологического режима рек Донского бассейна представлено трудами В.А. Дмитриевой (Дмитриева, 2007, 2015 и 2019), В.М. Мишона (Мишон, 2000).

Изучение низкого стока представлено многочисленными региональными исследованиями для Центрально-Черноземного региона, авторами которых являются А.Г. Курдов (1970, 1987, 1997, Проблемы Воронежского водохр.), М.П. Колпачева (1975). В 1975 году на кафедре гидрологии суши Воронежского государственного университета была опубликована монография "Карты стока рек и временных водотоков". Данная научная работа посвящена изучению основных закономерностей формирования речного стока и методов его расчета, одно из главных достоинств издания - это ее прикладное значение. Гидрологическое картирование речного стока имеет практическое применение при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений на территории Центрального Черноземья. Издание включает в себя теоретическую основу и методику построения карт, а также обзорные карты стока рек и временных водотоков, в виде изолиний речного стока. Массив данных, используемый в монографии, позволяет оценить не только характеристики речного стока для среднегодового, весеннего, меженного (летне-осеннего и зимнего), минимального среднемесячного (летнего и зимнего), а также стока взвешенных и растворенных в воде химических веществ. На основе карт стока, составленных для различных категорий стока, в том числе и минимального, рассчитаны территориальные водные ресурсы всех административных единиц, входящих в состав Центральных Черноземных областей. Подобной практики расчетов водных ресурсов не существует до настоящего времени.

Картографирование речного стока – один из методов, позволяющий гидрологической интерполяцией получать характеристику стока для неизученных водосборов. Последней картой для территории бывшего СССР является карта «Среднегодовое стока рек» (1980), которая является приложением к нормативному документу СНиП 2.01.14-83, разработанная коллективом авторов под руководством А.В. Рождественского в государственном гидрологическом институте, которая используется при выполнении инженерно-гидрологических изысканий. Серия карт к указанному, упраздненному нормативному документу, в том числе карт 30- дневного минимального стока летней межени, зимней межени разрешены к использованию и в настоящее время.

Государственный гидрологический институт в 2015 году выпустил справочник по основным гидрологическим характеристикам для бассейна Верхней и Нижней Волги, а также

для бассейна реки Камы, под редакцией В.Ю. Георгиевского. В справочнике представлены результаты расчетов основных гидрологических характеристик для бассейна рек Волги, Камы за период наблюдений по 2010 год. Для бассейна реки Дон пока такой справочник не выпущен.

Результаты работ по теории построения и надежности карт изолиний представлены в трудах А.В. Христофорова (1983), рекомендовавшим учитывать соотношения погрешностей аппроксимации и статистической неустойчивости карт изолиний относительно исходных данных.

Современные исследования водных ресурсов Воронежской области за период наблюдений до 2012 года представлены в монографии В.А. Дмитриевой. Были рассмотрены условия формирования водных ресурсов, современное количественное и качественное состояние на фоне регионального изменения климата и хозяйственной деятельности в бассейне Верхнего Дона. Приведена полномасштабная концепция гидрологической оценки водных ресурсов для территории Воронежской области. Теоретическим положением концепции является единство бассейнового и административного принципов исследования. Данная концепция оценки является мерой отображения взаимосвязанных, взаимозависимых, взаимообусловленных физико-географических процессов, явлений, формирующих речной сток и водные ресурсы на фоне хозяйственной деятельности в пределах речного водосбора (Дмитриева, 2015).

Представленная в монографии концепция имеет прикладной характер и применима для любого субъекта Российской Федерации, с вычленением для каждого из них своего уникального процесса формирования водных ресурсов. Основу комплексной оценки составляет анализ природной водообеспеченности района, режима подземных вод, оценка изменения гидрологического режима, а также антропогенной деятельности.

В работе С.В. Бучик, В.А. Дмитриевой (2019) на примере р. Битюг – г. Бобров (Верхний Дон, Воронежская область) анализируется динамика абсолютных минимумов стока межени. Установлено, что в текущем столетии на фоне современных климатических флуктуаций истощение поверхностного стока в летне-осеннюю межень происходит позже среднемноголетних сроков.

Характеристика маловодных периодов в бассейне реки Дон было описано в трудах В.Д. Красова. Например, в работах указано, что средний годовой сток рек у ст. Казанская с 1818 по 1914 год (17 лет) был равен 287 м³/с или 87,7 % нормы. Но сток за пятилетие 1972-76 гг. по данному пункту составлял лишь 184 м³/с (57,1 %).

Теоретические и методические основы для количественной оценки распределения снежных ресурсов на основных элементах ландшафта: в поле, в лесу, лесных полосах, в

овражно-балочной сети, разработка системы поправок к зональной величине местного стока на азональные условия его формирования; разработка нового метода расчета подземного стока в период весеннего половодья; разработка метода совместного картирования динамических и статических водных ресурсов, представлены в диссертации В.М. Мишона ''Теоретические и методические основы оценки ресурсов поверхностных вод в зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения Европейской части России '' (Мишон , 2007).

Современные проблемы водопользования и оценка водных ресурсов изучались группой ученых из Института водных проблем РАН, а проблемы формирования низкого стока рассматриваются (на примере бассейна Верхнего Дона) в работах М.В. Болгова (Болгов и др. 2005).

В диссертационном труде Филипповой И.А. (Филиппова, 2014) был проведен анализ минимального стока рек Европейской территории России и его оценка в условиях изменения климата. В качестве объекта исследования в работе рассматривались бассейны рек на территории Центрально-Черноземных областей и всей ЕТР, а также реки бассейна Волги.

В работе И.А. Филипповой приводятся исследования маловодного периода. В качестве нормируемой характеристики рассматривается продолжительность дефицитных периодов стока, которые получены с помощью порогового подхода. При этом автор рекомендует аппроксимировать ряды продолжительности дефицитных периодов с помощью распределения Вейбула. Непосредственно для расчета минимального стока в нестационарных условиях автор предлагает использовать метод расчета в виде ''суммы распределений''. В качестве теоретической кривой распределения для описания минимального стока рек этого региона предлагается возможным использовать распределение Гумбольдта, дающее наилучшую аппроксимацию исходных данных.

Региональные исследования минимального стока рек, на основе климатических изменений рассматриваются группой ученых из Московского государственного университета (Н.Л. Фролова, М.Б. Киреева, Е.П. Рец, Т.Е. Самсонов и др., 2016,2018,2019). Авторы проанализировали многолетние колебания водности в верхнем, среднем и нижнем частях бассейна реки Дон. В результате был выявлен маловодный период 2007-2015 гг., как наиболее характерный, рекордный по продолжительности. Его особенностью является пространственная неоднородность. Несмотря на это, в верховьях бассейна последнее десятилетие можно считать близким по водности к среднемноголетним значениям.

В исследовании М.Б. Киреевой приведены результаты анализа пространственно-временной изменчивости колебания речного стока. Особое внимание было уделено цикличности

стока в Донском бассейне после 1970-го года. Синхронность колебания стока рассматривалась как при внутригодовом изменении, так и за маловодные периоды года. Маловодные периоды в цикле исторического периода гидрологических наблюдений, как явления носят периодический характер.

В своих исследованиях ученые отмечают такую особенность маловодья 2007-2015 гг., как пространственную неоднородность, которая проявляется в территориальном дисбалансе.

В рамках исследований бассейна Дона был проведен анализ многолетних характеристик минимального стока, который показал наличие возрастающих трендов для абсолютно всех исследуемых рек бассейна. Был сделан вывод об общем увеличении водности межени, изменения минимальных месячных расходов воды носят наиболее очевидный и резкий характер (Киреева, 2017).

В бассейне Верхнего Дона, по мнению ученых (Дмитриева, 2015; Джамалов и др., 2017) гидрологические показатели близки к среднемноголетним значениям, в то время как в бассейне Нижнего Дона, наблюдается дефицит водных ресурсов (Н.Л. Фролова, М.Б. Киреева, В.П. Илич, 2018).

В диссертационной работе М.Б. Киреевой было отмечено, увеличение меженного модуля стока в 1,5-2 раза. Особенно это характерно для северной и западной частей Донского бассейна, наименьшие для южных районов. Выводы об увеличении уровня грунтовых вод, а вместе с ним и подземной составляющей речного стока, были подтверждены наблюдениями за уровнями грунтовых вод в Докучаевском колодце Каменно-степной обсерватории (Дмитриева, 2012).

На гидрологических постах р. Дон в верхнем течении, прослеживается изменчивость в разрезе среднемноголетних значений, водоносность реки снизилась менее существенно и составляет 85-90% от многолетней величины, что подтверждается в исследовании В.А. Дмитриевой (Дмитриева, 2013).

В работах М.В. Болгова (Болгов, 2005) были рассмотрены современные проблемы водопользования, методы оценки минимального стока рек в условиях меняющегося климата (на примере бассейна Верхнего Дона). Исследованиям гидрологического режима рек в условиях меняющегося климата посвящены работы П.М. Лурье и В.Д. Панова [Лурье, Панов, 1999; 2018], а также труды А.Г. Георгиади и И.П. Милюковой (Георгиади, Милюкова 2006, Георгиади и др., 2014).

В аспекте исследования механизмы увлажнения Русской равнины и изменения динамики стока рек исследуются в работе В.И. Бабкина (Бабкин, 2004, 2005, 2007).

Один из методов представлен работами В.В. Коваленко (Санкт-Петербург, РГГМУ, 2007), который называется частично инфинитным моделированием. Сама природа процесса частично инфинитного моделирования базируется на основании инфинитной (бесконечной) реальности.

Математическое моделирование гидрологических процессов основывается на возможности описывать неустойчивые, саморазвивающиеся системы.

Данное научное направление получил свое развитие через развитие синергетики как подхода к познанию сложных систем, к которым нельзя применить классические приемы рационального подхода, ввиду их неустойчивости. По словам Коваленко В.В. любой прогноз “во времени”, оказывается полностью инфинитин (полностью невыразим в рациональных структурах), только настоящее, как единство финитного (прошлого) и инфинитного (рационального и иррационального) частично инфинитно, а значит, допускает частичное прогнозирование (выраженное в рациональных структурах) (В.В. Коваленко, 1998). В частности, для прогноза гидрологической ситуации, применяется стохастическая модель Фоккера-Планка—Колмогорова (ФПК).

В Санкт-Петербургском государственном университете с начала 70-х под руководством Ю.Б. Виноградова была разработана детерминированная гидрологическая модель “Гидрограф”, которая описывает все процессы формирования стока и широко используется в современном гидрологическом моделировании.

Вывод. Теоретический обзор исследований категорий речного стока указывает на недостаточную изученность современной трансформации минимального стока, происходящей на фоне климатических изменений, в частности, глобального и регионального повышения температуры воздуха и других составляющих климата. Лишь в небольшой части работ, посвященных исследованию речного стока Дона (Джамалов и др., 2017; Болгов, Филиппова, 2014; Киреева, 2013), нашла отражение пространственно-временная изменчивость минимального стока. При этом фактически не рассматривается объем минимального стока в различные по водности годы и сроки (даты) наступления минимальных расходов воды в связи со сменой условий формирования.

Неоднородность природно-климатических условий формирования стока в бассейне Дона предопределяет особенности генезиса минимального стока в верхней части бассейна и стимулирует его изучение в пределах рассматриваемой части бассейна Дона.

2. Алгоритм исследования низкой водности в бассейне верхнего Дона

Предметом исследования в настоящей работе являются минимальные расходы воды за зимний и летне-осенний сезоны. Под летне-осенним сезоном понимается период от конца весеннего половодья до начала ледовых явлений на реках рассматриваемой территории; за зимний сезон принимается период от начала появления ледовых явлений на реках до начала весеннего половодья. При отсутствии ледовых явлений за зимний сезон принимается период от средней даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C в сторону понижения до начала весеннего половодья.

Если меженный период длится короткое время (меньше двух месяцев) или прерывается (состоит из нескольких периодов, разделенных паводками), то вместо среднемесячного расхода воды используется средний расход воды за 30 суток с наименьшим стоком (имеется в виду не календарный месяц). Он определяется при построении гидрографов стока исследуемой реки за каждый год за весь период наблюдений (необходимость построения определяется в зависимости особенностей гидрологического режима рек, устанавливается путем анализа таблиц ежедневных расходов воды).

Характеристики минимального стока различной обеспеченности при наличии продолжительных рядов наблюдений за стоком, определяется с помощью статистической обработки данных на основе вероятностно-статистических методов.

Минимальные расходы воды расчетной обеспеченности определяются при помощи построения кривых обеспеченности, которые строятся отдельно для зимнего и летне-осеннего периодов. Если в составе ряда минимальных расходов воды имеются нулевые значения вследствие пересыхания или промерзания реки, величина C_v определяется графоаналитическим способом (по способу Г.А. Алексеева) по эмпирической кривой обеспеченности.

При наличии гидрологических наблюдений исследования низкого стока включают в себя анализ кривых продолжительности, расчет статистических параметров рядов (коэффициент асимметрии, коэффициент вариации, определение среднеквадратичного отклонения и др.) (Владимиров, 1976).

Кривые обеспеченности определяют вероятность появления расхода заданной величины. Для анализа используются многолетние данные о ежегодных минимумах (суточный или месячный расход). В работе рассматриваются минимальные значения отдельно для каждого сезона: зимней или летней межени. Алгоритм исследования низкой водности состоит из нескольких стадий и представлен на схеме 2.1.

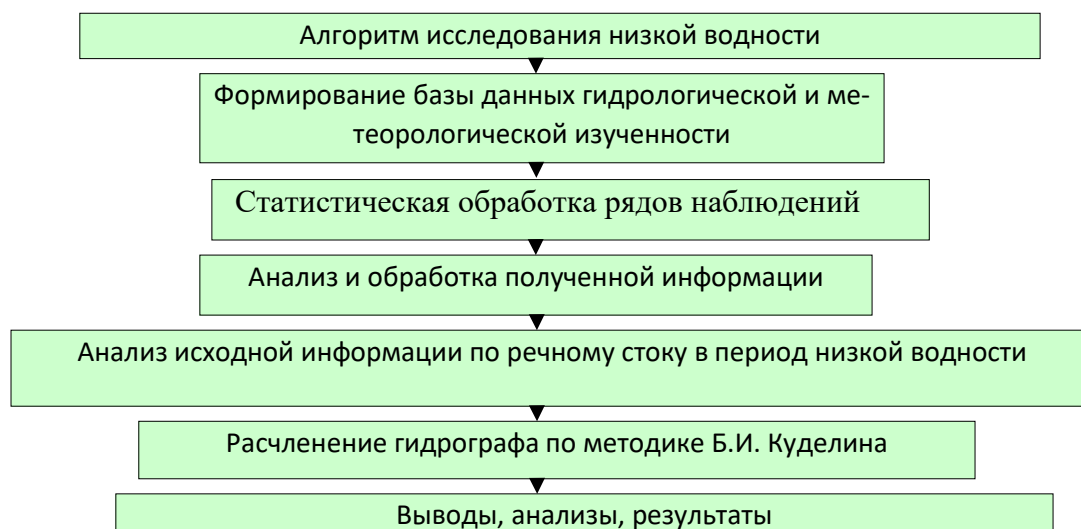


Рис. 2.1. Алгоритм исследования низкой водности.

2.1 Методика оценки статистических характеристик

Для анализа генезиса низкой водности были использованы ряды многолетних измерений расходов воды за летне-осенний и зимний периоды. Исследуемые ряды фактических наблюдений были проверены на предмет соответствия статистическим гипотезам.

В задачи исследования входило:

- построение хронологического графика многолетних колебаний минимального стока и построение интегральной разностной кривой;
- проверка ряда на нарушение однородности (стационарности).
- оценка параметров распределения случайных величин.
- вычисление статистических характеристик стока по имеющимся рядам данных

В первую очередь для рядов данных были определены параметры, характеризующие степень рассеяния случайной величины относительно центра. В частности для каждого ряда были определены дисперсия, среднеквадратичное отклонение, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии.

На первоначальном этапе в рядах, имеющих пропуски в наблюдениях (Битюг - Бобров), восстановлены расходы воды методом гидрологической аналогии, методы пространственной корреляции и линейной регрессии. Метод линейной регрессии позволяет выявить зависимость и исследовать влияние независимых переменных на зависимую переменную для восстановления пропущенных значений.

Реконструированные ряды проверялись на однородность. Однородность (стационарность) ряда проверяется с привлечением критерия Стьюдента (t) и критерия Фишера, рекомендуемые действующим нормативным документом (СП- 33..., 2004).

Анализ по критерию Стьюдента (t-критерий) используется для проверки однородности гидрологических рядов (двух выборок объемом n и m, или двух частей одной выборки) по среднему значению. Данный метод основан на предположении о нормальности и равенстве.

Критерий Фишера применяется при проверке гипотезы о равенстве двух генеральных совокупностей, распределенных по нормальному закону. Суть теории Фишера основана на том факте, что меру изменчивости изучаемой величины можно разложить на части, соответствующие влияющим на эту величину факторам и случайным отклонениям. F-критерий Фишера называется дисперсионным отношением, так как он формируется как отношение двух сравниваемых несмещенных оценок дисперсий.

Дисперсия - наиболее часто используемая мера изменчивости (вариации) данных. Дисперсия вычисляется как сумма квадратов отклонений значений от выборочного среднего.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (1)$$

где S_1^2 и S_2^2 -дисперсия двух выборок, на которые разбит исходный ряд.

При использовании критериев Стьюдента и Фишера имеющийся ряд исходных данных разбивается на две части, в том месте, с которого предположительно произошло изменение характера случайных колебаний (Сикан).

Для анализа рядов данных используются методы теории вероятности и математической статистики. При отсутствии возможности проследить влияние, оказываемое аномальными климатическими и антропогенными изменениями, процесс считается стационарным, условно подчиняющийся закону нормального распределения.

В общем виде сама по себе регрессия представляет собой зависимость значения случайной величины от другой случайной величины или нескольких. В практическом значении при анализе рядов данных в основном используется линейная и множественная виды регрессии. Регрессия позволяет проводить оценку параметров уравнения, а также проводить регрессионный анализ для случаев нескольких предикторов, которые представляют собой множественную линейную регрессию. Для решения задач восстановления величин стока регрессия используется в виде регрессионного уравнения.

Для оценки корреляции было использовано уравнение связи между данными изучаемой реки и реки аналога. В качестве этого уравнения применяется линейное уравнение регрессии. Линию, относительно которой наблюдается минимальный разброс точек, называют линией регрессии, а соответствующее ей аналитическое выражение – уравнением регрессии [А.В. Сикан].

При восстановлении данных в данной работе использовалась однофакторная и двухфакторная модель анализа данных. По методу линейной корреляции устанавливается уравнение, отвечающее этой прямой, а по уравнению устанавливается ряд-аналог изучаемой реки.

Для этого проводился анализ связи между расходами на водотоке-аналоге и ряде с пропусками данных. Выделялся совместный репрезентативный период наблюдения, по которому выводилось уравнение регрессии. Качество связи между двумя рядами данных оценивалась по величине коэффициента корреляции, с помощью которого определялась теснота связи, рассеивание значений переменных относительно линии тренда.

Коэффициентом корреляции r переменных x и y называется среднее геометрическое коэффициента регрессии, имеющее их знак (Карасев, 1979).

$$r_{xy} = \sqrt{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}') \cdot (Q_{ai} - \bar{Q}'_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}')^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{ai} - \bar{Q}'_a)^2}} \quad (2)$$

Физический смысл коэффициента корреляции заключается в оценивании корреляционной связи. Коэффициент корреляции может принимать значения от -1 до +1. Положительное значение указывает на то, что зависимость прямая, отрицательная на обратную зависимость. Чем ближе абсолютное значение к нулю, тем слабее зависимость между x и y . (Сикан, 2007).

Формулы для определения квадратичных ошибок:

$$\delta' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}')^2}{n' - 1}} \quad (3)$$

$$\delta'_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ia} - \bar{Q}'_a)^2}{n' - 1}} \quad (4)$$

δ' и $\delta'a$ – среднее квадратичные ошибки для исследуемой реки и реки – аналога для совместных лет наблюдений.

Репрезентативность выбора реки - аналога оценивается условием: $a^2/\delta a^2 \geq 2$.

При наличии нескольких репрезентативных аналогов может быть использована множественная регрессия. Так как мы имеем большой набор переменных, мы имеем возможность использовать многофакторную модель анализа, называемую множественной регрессией. При многофакторном анализе оценивается зависимость предиктанта (зависимой, искомой переменной) от значений предикторов (в нашем случае четырех).

Для реализации данного анализа было выбрано четыре предиктора, затем выделялся совместный период наблюдения, затем проводился регрессионный анализ, затем проводим анализ предикторов по критерию Стьюдента, сокращаем незначимые предикторы в уравнении, и в результате остается наиболее значимый предиктор, для которого выводится уравнение и восстанавливаются пропуски в предиктанте.

На данном этапе проводится дисперсионный анализ, который отображает итоги проверки значимости уравнения регрессии, оценивается коэффициент множественной корреляции, также эмпирические оценки параметров уравнения регрессии, значение среднеквадратичных погрешностей, итоги анализа статистической значимости коэффициентов уравнения, границы доверительного интервала коэффициентов.

При реализации модели многофакторного анализа строится регрессионная модель по уравнению линейной регрессии. Для получения результата, то есть для получения уравнения регрессии, нам необходимо оценить параметры уравнения, в гидрологии самым распространенным методом является метод наименьших квадратов.

Суть метода наименьших квадратов (МНК), состоит в том, чтобы определить такие расчетные параметры a и b , при которых сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений y_i от рассчитанного (формула 4) будет иметь минимальное значение (Сикан, 2007).

Уравнение линейной регрессии в случае линейной зависимости:

$$\hat{y}_i = ax_i + b \quad (5.1) \quad (5)$$

Данный метод является одним из базовых методов регрессионного анализа для оценки неизвестных параметров регрессионных моделей по выборочным данным. Задача метода в подборе таких значений x , чтобы значения этих функций были максимально близки к некоторым значениям y_i .

«Определение расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности осуществляется путем применения аналитических и эмпирических функций распределения ежегодных вероятностей превышения – кривых обеспеченностей. При этом должны выполняться следующие условия:

1) Продолжительность периода наблюдений считается достаточной, если рассматриваемый период репрезентативен (представителен), а относительная средняя квадратическая погрешность расчетного значения исследуемой гидрологической характеристики не превышает 10% для годового и сезонного стока и 20% для максимального и минимального стока. Средние квадратические погрешности расчетного значения исследуемой гидрологической характеристики устанавливаются по специальным таблицам, полученным методом статистических испытаний или по формулам. Рассчитанные значения погрешностей, как правило, будут больше приведенных выше значений. Поэтому прямой расчет кривой обеспеченности, целесообразно осуществлять только по наиболее продолжительным рядам наблюдений в рассматриваемом однородном в гидрологическом отношении районе исследования, т.е. по рядам, которые привести к более длительному периоду невозможно из-за отсутствия более продолжительных наблюдений на реках-аналогах.

2) Оценка репрезентативности ряда наблюдений за n лет производится по рекам-аналогам с числом лет наблюдений $N > n$, при $N > 50$ лет. Репрезентативность ряда наблюдений за гидрологической характеристикой может также определяться по разностным интегральным кривым речного стока или сопоставлением кривых распределения речного стока по реке-аналогу за периоды n и N лет.

3) Если относительные средние квадратические погрешности превышают указанные в пункте 1 пределы и период наблюдений нерепрезентативен, необходимо осуществить приведение рассматриваемой гидрологической характеристики к многолетнему периоду согласно рекомендациям по приведению гидрологических характеристик и их параметров к многолетнему периоду. С практической точки зрения, когда имеется возможность приведения данных наблюдений к более длительному периоду, эту операцию всегда надо осуществлять, т.к. при этом повышается точность инженерно- гидрологических расчетов.

4) Прежде чем приступить к расчету аналитической кривой распределения рассматриваемой гидрологической характеристики необходимо произвести оценку однородности и стационарности исходных данных наблюдений в соответствии с рекомендациями по статистическим методам анализа однородности многолетних колебаний данного гидрологического явления.

5) В сомнительных случаях необходимо произвести оценку качества исходной информации в соответствии официальными документами Росгидромета.

6) Исходная гидрометрическая информация, подлежащая дальнейшей обработке и обобщению, должна быть занесена в базу данных в соответствии с Рекомендациями по подготовке базы данных. В эту базу данных должны быть занесены приведенные к многолетнему периоду данные (в соответствии с Рекомендациями по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных наблюдений) и другая информация, необходимая при дальнейших расчетах и обобщениях. По мере накопления исходной гидрологической информации она должна заносится в базу данных. На основании пополненной гидрологической информации следует производить ее обобщение один раз в пять лет в соответствии с настоящими Рекомендациями. Если в течение ближайшего пятилетнего периода произойдет катастрофическое экстремальное явление, то следует сразу осуществить обобщение гидрологической информации за многолетний период, включая экстремальное катастрофическое гидрологическое явление» [10].

В данной работе часть данных по гидрологическим постам имеет не полный ряд наблюдений за максимальным стоком в силу частичного закрытия постов в 90-е гг. XX века. Соответственно, перед восстановлением данных наблюдений был проведен анализ данных по подбору рек-аналогов для приведения гидрологических рядов и их параметров к многолетнему периоду.

При выборе рек-аналогов прежде всего рассматривались те водные объекты, которые расположены достаточно близко к постам, имеющим короткие ряды наблюдений, а также сходные физико-географические условия (степень заболоченности, заозеренности и залесенности водосборов, состав почв и т.д.).

При выборе постов проводился также анализ синхронности колебаний стока, однотипность стока. Из рассмотрения исключались водотоки, сток которых зарегулирован (кроме р. Дон).

2.2. Оценка стационарности

Объектом исследования в прикладной статистике являются статистические данные, полученные в результате наблюдений на гидропостах.

Математические модели рассматривают колебания стока рек как случайных процесс происходящий в определенный период времени, который выбран для исследования в качестве объекта.

Основной задачей статистического является совместный анализ нескольких выборок с помощью параметрические и не параметрических критериев.

Поскольку вид и функция распределения выборки заданы, для анализа были использованы параметрические критерии: критерии Стьюдента (t) для сравнения выборок по средним значениям, критерии Фишера (F) для сравнения выборок по дисперсиям.

Также данные были для анализа были использованы непараметрические критерии статистики, в которых существует допущение о законе распределения выборок, данный критерий базируется на предположении о независимости наблюдений, такие критерии знаков, в частности двухпараметрический критерий Вилкоксона.

Структура временного ряда которая используется в качестве объекта для исследования может быть представлена в виде стационарной и нестационарной моделью. В стационарной модели параметры ряда (дисперсия и среднее значение) неизменны во времени или стационарны.

Однако, в работах Н.Л. Фроловой, М.В. Болгова [2,3], Н.И. Сенцовой [3], Г.Х. Исмаилова [22], В.А. Дмитриева [18, 19], М.Б. Киреевой [25], В.Д. Красова [23] в рядах минимального стока рек бассейна р.Дон выявлена нестационарность.

Первым этапом перед проведением статистических расчетов необходимо провести проверку на однородность.

Для оценки однородности стационарности рядов минимального стока использовались параметрические и непараметрические критерии.

Проверка рядов на однородность проводилась с использованием параметрических критериев Фишера и Стьюдента.

Критерий Стьюдента

«Выборочные средние значения распределены по нормальному закону, если исходные данные также распределены по нормальному закону или исходные данные имеют продолжительные наблюдения. Следовательно, можно утверждать, что распределение выборочных средних значений приблизительно подчиняется нормальному закону. После процедуры восстановления данных наблюдений за более ранние годы, в годы пропуска наблюдений и за более поздние годы для закрытых постов, то есть после осуществления процедуры приведения непродолжительных рядов наблюдений к многолетнему периоду, обычно гидрологические характеристики имеют достаточную продолжительность, чтобы выборочные средние были распределены приблизительно по нормальному закону. Это обстоятельство привело к тому, что в курсах математической статистики обычно приводится много критериев однородности выборочных средних значений. В инженерных гидрологических расчетах, как правило, применяется статистический критерий Стьюдента» [11].

Расчетное значение статистики критерия Стьюдента определяется по формуле

$$t = \frac{y_{cpI} - y_{cpII}}{\sqrt{n_1 \sigma_I^2 + n_2 \sigma_{II}^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 2)}{n_1 + n_2}} \quad (2.1)$$

где y_{cpI}, y_{cpII} — средние значения двух последовательных выборок;

$\sigma_I^2, \sigma_{II}^2$ — дисперсии двух последовательных выборок;

n_1, n_2 — объемы выборок.

Критические значения обобщенных статистик Стьюдента определяются при равных объемах выборок из таблицы Б.15 Приложения Б Методических рекомендаций [11] или рассчитываются по уравнению

$$t'_{\alpha} = C_t \ t_{\alpha} \quad (2.2)$$

где t'_{α} — критическое значение статистики Стьюдента при наличии автокорреляции;

t_{α} — критическое значение статистики Стьюдента для случайной совокупности при том же числе степеней свободы $k = n_1 + n_2 - 2$;

C_t — переходный коэффициент, определяемый в зависимости от коэффициента автокорреляции, определяемый по таблице Б.16 Приложения Б [11].

Критерий Стьюдента используется для проверки рядов данных по среднему значению.

При использовании данного критерия было учтено недостаточность рядов данных, поскольку в теории статистики заложена значительная большая выборка, чем имеющийся ряд наблюдений. Перед использованием критерия Стьюдента была проведена однородность ряда по дисперсии (поскольку данный критерий предполагает что исследуемые ряды имеют одинаковую дисперсию. Данный критерий базируется на том факте, что выборки относятся к нормальным совокупностям.

Критерий Фишера

«В практике гидрологических расчетов для анализа многолетних колебаний гидрологических характеристик наибольшее применение нашел критерий однородности выборочных дисперсий Фишера.

При оценке стационарности дисперсий для последовательных частей ряда применяется критерий Фишера, также обобщенный для особенностей гидрологической информации. Анализ по критериям Стьюдента и Фишера осуществляется после того, как проведена оценка на отсутствие резко отклоняющихся экстремумов существенно влияющих на значения средних значений и особенно дисперсий. Для оценки стационарности дисперсий (критерий Фишера) и средних значений (критерий Стьюдента) временной ряд разбивается на две или несколько выборок. Причем границы разбиения желательно связать с датами предполагаемого нарушения стационарности. Если такие даты установить не представилось возможным, то деления ряда производится по равному количеству всех частей. Расчетные значения статистики Фишера определяются по формуле:

$$F = \sigma_j^2 / \sigma_{j+1}^2, \quad (2.3)$$

при $\sigma_j^2 > \sigma_{j+1}^2$, где σ_j^2 , σ_{j+1}^2 — соответственно дисперсии двух следующих друг за другом частей выборок (j и $j+1$) объемом n_1 и n_2 .

Гипотеза о стационарности дисперсий принимается при заданном уровне значимости α (%) если расчетное значение статистики критерия меньше критического ($F < F^*$) при заданных степенях свободы, соответствующих объемам выборок (n_1 и n_2).

Критические значения статистики Фишера (F^*) в зависимости от уровня значимости α (%), коэффициентов внутрирядной ($r(1)$) и межрядной корреляции (R) и коэффициентах асимметрии при равных объемах двух выборок ($n_x = n_y$) приведены в таблице Б.13 Приложения Б» [11].

Как видно из таблиц гипотеза об однородности опровергается по одному из критериев. Статистическая обработка временных рядов на изучаемых пунктах выявила существенные нарушения однородности по критериям Фишера и Стьюдента. Годы перелома или нарушение стационарности в исследуемых гидрологических рядах в рядах минимального стока за зимний период 1978 год, минимальный среднемесячный расход за летне-осенний период.

Критерий Вилкоксона

В качестве дополнительного критерия к анализу однородности авто коррелированных рядов стока был использован критерий Вилкоксона.

Критерий Вилкоксона (Манна-Уитни) является одним из самых распространенных непараметрических ранговых критериев, используемых для проверки однородности двух выборок. Его достоинство заключается в том, что он позволяет использовать нервную длину сравниваемых отрезков. Значение статистики критерия Вилкоксона не меняется при любом монотонном преобразовании шкалы измерения (т.е. он пригоден для статистического анализа данных, измеренных в порядковой шкале).

Ранговый критерий Вилкоксона используется для проверки равенства средних значений двух независимых выборок. Этот тест базируется на рангах, которые присваиваются значениям из 16 обоих выборок и позволяют учитывать только относительное значение их порядка. Тест начинается с объединения двух выборок в одну рядом, затем значения ранжируются по возрастанию и присваиваются ранги. Далее рассчитывается сумма рангов каждой из выборок, после чего производится сравнительный анализ. Если сумма рангов одной выборки значительно больше, чем другой, то можно сделать вывод о значимой разнице в средних значениях выборок.

Критерий Вилкоксона может быть применен для малых выборок с размером от 5 до 20 наблюдений. Он также не требует предположений об нормальном распределении данных, что делает его полезным для анализа данных с нарушениями нормальности. Критерий Вилкоксона относится к маломощным критериям. Под мощностью критерий принято понимать его способность выявлять различия между признаками, если они есть. Чем мощнее критерий, тем лучше он отвергает нулевую гипотезу и подтверждает альтернативную. Маломощные критерии обладают рядом достоинств: простота; широкий диапазон, по отношению к самым разным

данным; применимость к неравным по объём выборкам; большая информативность результатов.

Критерий Вилкоксона – Манна – Уитни (или просто критерий Манна Уитни) – непараметрический статистический критерий, используемый для сравнения двух независимых выборок. Он основан на ранговом анализе данных и позволяет проверить гипотезу о равенстве средних значений двух выборок. В отличие от критерия Стьюдента, который предполагает нормальность распределения, критерий Манна-Уитни не требует предположения о распределении выборки и может быть использован в случае, если данные не соответствуют нормальному закону распределения. Принцип работы критерия состоит в следующем. Сначала объединяются значения выборок, затем каждому значению присваивается ранг. Затем рассчитывается сумма рангов для каждой выборки (или одной из них), и на основе этих сумм рассчитывается статистика U , на которую опирается критерий. Если значение статистики U оказывается меньше критического значения (определяется из таблиц статистических значений), то гипотеза о равенстве средних значений отвергается на заданном уровне значимости. Если же значение U больше или равно критическому значению, то гипотеза не отвергается и можно сделать вывод о том, что нет статистически значимых различий между выборками.

Требование для возможности применения критерия Вилкоксона – Манна – Уитни: 1) Каждая из двух выборок случайны

2) Каждая из двух выборок независимы. Члены выборок независимы между собой.

3) Свойство, изучаемое для данного объекта, распределено непрерывно в каждой из двух совокупностей из которых сделаны выборки

4) Шкала измерений не должна быть ниже порядковой.

При использовании критерия Вилкоксона статистикой является число инверсий U , получаемое ранжированному ряду, который предварительно объединен. Теоретическое распределение U близко к нормальному и имеет математическое ожидание

$$M_U = \frac{n_1 n_2}{2} \quad (3)$$

и стандарт

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{12} (n_1 n_2 + 1)} . \quad (4)$$

Границы критической зоны критерия определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \text{правая } U_{np} &= M_U + \sigma_U t_q, \\ \text{левая } U_{л} &= M_U - \sigma_U t_q. \end{aligned} \quad (5)$$

В выражениях (3-5):

n1, n2- первая и вторая часть ряда,

tq-нормированное отклонение числа инверсий от M_U при принятом уровне значимости q, равном обычно 0,05 и 0,01 (при q=0,05 tq=1,96, при q=0,01, tq=2,58).

При попадании эмпирической статистики в критическую область нулевая гипотеза (отсутствие неоднородности) отвергается и признается вероятной альтернативная гипотеза.

Таблица 2.1. Границы критической области критерия Вилкоксона

q	n ₁	n ₂	M _u	σ _u	Ул	Упр
0,05	77	77	2965	277	2422	3508

Таблица 2.2. Эмпирическая статистика критерия Вилкоксона

λ	Константа			Прямая			Парабола-1			Парабола-2		
	– λφ	U	Рез-т	– λφ	U	Рез-т	– λφ	U	Рез-т	– λφ	U	Рез-т
0,05	0,05	3094	0	0,025	0	0	0,0175	3075	0	0,0335	3176	0
0,1	0,1	3498	0	0,05	0	0	0,035	3157	0	0,067	3290	0
0,15	0,15	3597	н/0	0,075	0	0	0,0525	3225	0	0,1005	3429	0
0,2	0,2	3919	н/0	0,1	н/0	н/0	0,07	3292	н/0	0,134	3576	н/0
0,3	0,3	4309	н/0	0,15	н/0	н/0	0,105	3420	н/0	0,201	3853	н/0
0,4	0,4	4658	н/0	0,2	н/0	н/0	0,14	3542	н/0	0,268	4099	н/0
0,5	0,5	4966	н/0	0,25	н/0	н/0	0,175	3670	н/0	0,335	4320	н/0

На основе критерия Вилкоксона был осуществлен анализ однородности рядов стока рек Верхнего Дона с разделением периода наблюдений на две выборки: до 1971 г. и после 1971 г. (начало длительного маловодья). При этом учтена автокорреляция в рядах стока. Границы критической зоны будут:

$$\begin{aligned} \text{правая } U_{\text{пр}} &= M_U + \gamma \sigma_U t_q, \\ \text{левая } U_{\text{л}} &= M_U - \gamma \sigma_U t_q, \end{aligned} \quad (8)$$

где γ – поправка на автокорреляцию ($\gamma > 1,0$).

Таблица 2.3. Результаты проверки на однородность рядов минимальных расходов воды рек бассейна Верхнего Дона на основе критерия Вилкоксона ($q=0,05$)

№	Река-створ	n_1	n_2	M_u	σ_u	r	γ	U	U1	U2
1.	р. Девица- с. Девица	32	32	512	74	0.15	1.10	888	366	657
2.	р. Битюг- г. Бобров	44	45	990	121	0.63	1.62	1882	751	1228
3.	р. Битюг- пгт. Мордово	35	35	612	85	0.72	1.62	1146	445	779
4.	р. Сосна- г. Елец	46	48	1104	132	0.68	1.68	1753	844	1363
5.	р. Красивая Меча-г. Ефремов	37	37	684	92	0.88	1.62	1192	503	865
6.	р. Тихая Сосна-с. Алексеевка	38	37	703	94	0.75	1.62	1188	518	887
7.	р. Россошь-пгт. Подгоренский	30	30	450	67	0.05	1.0	661	317	582
8.	р. Дон-г. Задонск	45	49	1102	132	0.77	1.62	1977	843	1361
9.	р. Ворона-г. Борисоглебск	41	41	84	107	0.74	1.62	1475	629	1051
10.	р. Воронеж- с. Чертовицкое	26	26	338	54	0.37	1.46	443	230	445
11.	р. Воронеж- ст. Запорожская	34	35	595	83	0.79	1.62	969	431	758
12.	р. Россошь-пгт. Подгоренский	30	31	465	69	0.05	1.0	661	317	582
13.	р. Подгорная-г. Калач	42	41	903	108	0.75	1.62	1586	645	1076
14.	р. Ворона-с. Чутановка	51	51	1300	149	0.73	1.62	1812	1007	1593
15.	р. Хопер-Новохоперск	41	41	840	170	0.68	1.62	1504	629	1051

Непараметрический критерий Вилкоксона был применен в исследованиях неоднородности, на основе использования длительных моделированных последовательностей.

Критерий Диксона и Смирнова-Граббса

В случаях когда ряд содержит значение редкой повторяемости, наблюдаются выбросы, точки резко отклоняющиеся от аналитической кривой в области больших и малых значений. Для анализа таких ситуаций в СП 33-101-2003 включены два дополнительных критерия однородности – критерий Диксона и критерий Смирнова – Граббса.

Критерий Диксона (или тест Диксона) — это статистический метод, используемый для выявления выбросов в наборе данных. Он позволяет определить, является ли наблюдение выбросом, основываясь на его расстоянии от других значений в выборке. Этот критерий особенно полезен для небольших выборок.

- Критерий Диксона лучше всего работает с небольшими выборками (обычно до 30 наблюдений).

- Он не является универсальным методом и может давать ложные срабатывания, если данные имеют сильные отклонения от нормального распределения.

Критерий Диксона — полезный инструмент для предварительного анализа данных и выявления аномалий, что важно в статистических исследованиях и анализе данных.

Требуется провести проверку ряда на однородность при уровне значимости $\bar{\alpha} = 5\%$ с использованием непараметрических критериев Диксона и Смирнова – Граббса.

Статистики критерия Диксона для максимального и минимального членов выборки имеют вид:

$$D_{\max}^* = \frac{Q_n - Q_{n-1}}{Q_n - Q_1}, \quad | \quad (3.6)$$

$$D_{\min}^* = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 - Q_n}. \quad (3.7)$$

Гипотеза об однородности ряда по критерию Диксона не опровергается, если

$$D^* < D_{\alpha}, \quad (3.8)$$

где D^* – эмпирическое значение статистики Диксона; $D_{\bar{\alpha}}$ – теоретическое значение статистики Диксона, определяемое в зависимости от уровня значимости $\bar{\alpha}\%$, коэффициента асимметрии C_s , длины выборки n и коэффициента автокорреляции $r(1)$

Статистики критерия Смирнова – Граббса для максимального и минимального членов выборки имеют вид:

$$G_{\max}^* = \frac{Q_n - \bar{Q}}{\sigma^*}, \quad (3.9)$$

$$G_{\min}^* = \frac{\bar{Q} - Q_1}{\sigma^*}, \quad (3.10)$$

где Q – среднее значение;

σ^* – выборочное среднеквадратическое отклонение.

Гипотеза об однородности ряда по критерию Смирнова-Граббса не опровергается, если

$$G^* < G_{\alpha}, \quad (3.11)$$

где G^* – эмпирическое значение статистики Смирнова – Граббса;

G_{α} – теоретическое значение статистики Смирнова – Граббса, определяемое в зависимости от уровня значимости α %, коэффициента асимметрии C_s , длины выборки n и коэффициента автокорреляции $r(1)$

(в данной работе принять: $r(1) = 0$)



Рисунок 2.1.График распределения минимального расхода воды на гидропосту р.Воронеж-сл.Заворонежская
прослеживается неоднородность по дисперсии.



Рисунок 2.2 График распределения минимального расхода воды на гидропосту р.Воронеж-с.Чертовицкое ряд
без видимых аномалий, однороден по дисперсии.

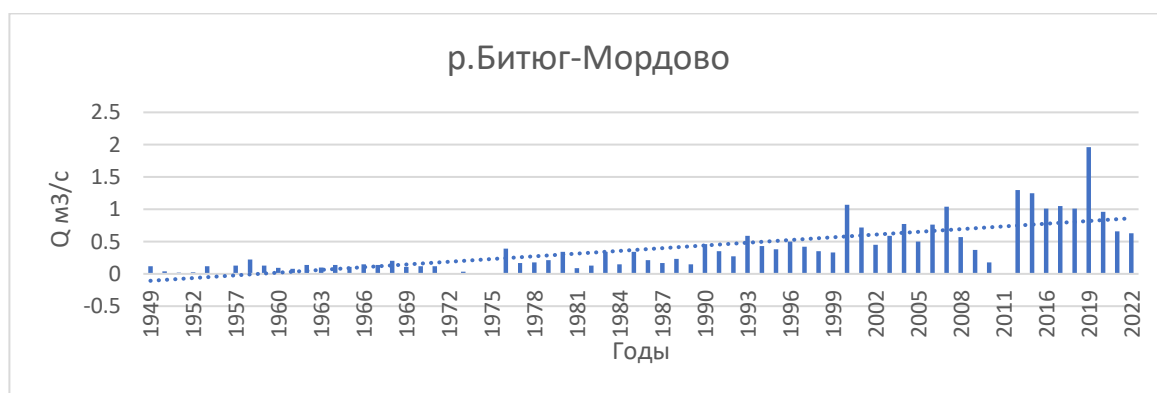


Рисунок 2.3.График распределения минимального расхода воды на гидропосту р.Битюг-с.Мордово, выделяется
тренд на повышение расходов, однороден по дисперсии.



Рисунок 2.4.График распределения минимального расхода воды на гидропосту р.Красивая Меча-г.Ефремов, выделяется тренд на повышение расходов, прослеживается неоднородность.



Рисунок 2.5.График распределения минимального расхода воды на гидропосту р.Россошь-пгт. Подгоренский, выделяется тренд на повышение расходов, прослеживается неоднородность.

Таблица 2.4. Результаты проверки на однородность рядов минимальных расходов воды рек бассейна Верхнего Дона

№	Река-створ	Среднесуточный (наименьший среднесуточный расход)				
		Критерий Фишера	Критерий Стьюдента	Критерий Вилкоксона	Диксона	Смирнова-Граббса
1.	р. Дон- г. Задонск	-	+	-	+	-
2.	р. Девица- с. Девица	+	-	-	+	+
					(аномальные точки 2006, 1975, 1872, 2006)	
3.	р. Битюг- г. Бобров	-	-	-	+	+
4.	р. Битюг- пгт. Мордово	-	-	-	+	+
5.	р. Хопер- х.Бесплемяновский	-	-	-	+	+
6.	р. Сосна- г. Елец	-	-	-	+	+
7.	р. Красивая Меча-г. Ефремов	+	+	-	+	+
8.	р. Тихая Сосна-с. Алексеевка	+	-	-	-	+
9.	р. Воронеж- г. Липецк 2					
10.	р. Воронеж- с. Чертовицкое	-	+	-	+	+
11.	р. Лесной Воронеж- сл. Заворонежская	-	-	-	+	+
12.	р. Россошь-пгт. Подгоренский	+	-	-	+	-
10.	р. Ворона-г. Борисоглебск	-	-	-	+	+
11.	р.Ворона-с. Чутановка	-	-	-	+	+
12.	р. Воронеж- с. Чертовицкое	-	+	-	+	+
13.	р. Подгорная-г. Калач	+	-	-	+	+
14.	р. Ворона- с.Уварово	-	-	-	-	+
15.	р.Ворона- с.Чутановка	+	-	-	+	-
16.	р. Хопер- г. Новохоперск	+	-	-	+	+
Примечание						
+ однороден						
- неоднороден						

Как видно из таблицы, гипотеза об однородности рядов расходов минимального стока ряды полностью однородны по критерию Фишера в 37%-ти процентах случаях, 18,7% случаев

не опровергается по критерию по критерию Стьюдента, 43,7% данных являются не однородными по двум критериям.

Проверка рядов на однородность по критериям Фишера и Стьюдента, показала, что большинство рядов расходов минимального стока для рек Бассейна Верхнего Дона являются неоднородными.

Дополнительная проверка рядов на однородность по постам показала, что гипотеза об однородности ряда не опровергается как по критерию Диксона, так и по критерию Смирнова-Граббса, следовательно ряды не содержит неоднородного минимального значения и для определения параметров эмпирического распределения могут быть использованы все данные.

1.1 Оценка параметров распределения

Оценка для однородных рядов

Для однородных рядов эмпирическую ежегодную вероятность превышения $P_{m,\%}$ гидрологических характеристик определяют по формуле:

$$P_{m,\%} = m/(n+1) * 100\% \quad (2.4)$$

где m — порядковый номер членов ряда гидрологической характеристики, расположенных в убывающем порядке;

n — общее число членов ряда.

Эмпирические кривые распределения ежегодных вероятностей превышения строят на клетчатках вероятностей. Тип клетчатки вероятностей выбирают в соответствии с принятой аналитической функцией распределения вероятностей и полученного отношения коэффициента асимметрии C_s к коэффициенту вариации C_v [12].

Наиболее часто применяется клетчатка вероятностей нормального закона распределения, на которой кривые обеспеченности нормального закона представляются в виде прямых линий. Эта клетчатка в технической литературе по гидрологии, как правило, называется клетчатка вероятностей для кривых распределения с умеренной асимметричностью. При по-

ложительной асимметрии на этой клетчатке эмпирические и аналитические кривые обеспеченности имеют вогнутую форму, при отрицательной асимметрии – выпуклую форму, а при отсутствии асимметрии – в виде прямой линии.

«Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения (кривых обеспеченностей), как правило, применяются трехпараметрические распределения: Крицкого-Менкеля при любом отношении C_s/C_v (Приложение Б, таблица 1), распределение Пирсона III типа (биномиальная кривая) при $C_s/C_v \geq 2$ (Приложение Б, таблица 2), лог-нормальное распределение при $C_s \geq 3C_v + C_v^3$ и другие распределения, имеющие предел простираения случайной переменной от нуля, или положительного значения, до бесконечности. При надлежащем обосновании допускается применять двухпараметрические распределения, если эмпирическое отношение C_s/C_v и аналитическое отношение C_s/C_v , свойственное данной функции распределения, приблизительно равны. При этом необходимо произвести анализ принимаемой функции распределения вероятностей с точки зрения ее пределов простираения. Необходимо также установить при каком соотношении параметров распределения кривая распределения уходит в отрицательную область с тем, чтобы исключить из дальнейшего применения эту область в практике гидрологических расчетов существенно положительных случайных величин (например, различные характеристики речного стока).

Оценки параметров аналитических кривых распределения: среднее многолетнее значение $Q_{ср}$, коэффициент вариации C_v и отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v , устанавливаются по рядам наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой методом приближенно наибольшего правдоподобия, методом моментов, а также графоаналитическим методом на начальных стадиях проектирования (метод квантилей) и по совокупности методов с учетом региональных зависимостей характеристик и параметров стока от основных стокоформирующих факторов» [10].

В данной работе для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения применено трехпараметрическое гамма-распределение Крицкого–Менкеля (п.5.3 [12]).

Коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s определялись методом моментов (п. 5.6 [12]) по формулам:

$$C_v = (a_1 + a_2 / n) + (a_3 + a_4 / n) \bar{C}_v + (a_5 + a_6 / n) \bar{C}_v^2 \quad (2.5)$$

$$C_s = (b_1 + b_2 / n) + (b_3 + b_4 / n) \bar{C}_s + (b_5 + b_6 / n) \bar{C}_s^2 \quad (2.6)$$

где $a_1, \dots, a_6$; – коэффициенты, определяемые по Приложению Б, таблица Б.1 [12],
 $b_1, \dots, b_6$ для распределения Пирсона III типа и с помощью таблицы из [13] –
 для распределения Крицкого-Менкеля;
 $\bar{C}_v$ и $\bar{C}_s$ – соответственно смещенные оценки коэффициентов вариации и асимметрии.

$\bar{C}_v$ и $\bar{C}_s$ определяются по формулам:

$$\bar{C}_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n - 1}}; \quad (2.7)$$

$$\bar{C}_s = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3 \right]}{\left[\bar{C}_v^3 (n - 1)(n - 2) \right]}. \quad (2.8)$$

Несмещенную оценку коэффициента автокорреляции между смежными членами ряда $r(1)$ определяют по формуле:

$$r(1) = -0,01 + 0,98\tilde{r}(1) - 0,06\tilde{r}(1)^2 + (1,66 + 6,46\tilde{r}(1) + 5,69\tilde{r}(1)^2) \frac{1}{n}, \quad (2.9)$$

где смещенную оценку определяют по формуле:

$$\tilde{r}(1) = \frac{\sum_{i=2}^n (Q_i - \bar{Q}_1)(Q_{i-1} - \bar{Q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=2}^n (Q_i - \bar{Q}_1)^2 \sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - \bar{Q}_2)^2}}, \quad (2.10)$$

$$\text{здесь } \bar{Q}_1 = \frac{\sum_{i=2}^n Q_i}{n - 1}; \bar{Q}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} Q_i}{n - 1}. \quad (2.11)$$

По значениям C_v и отношению C_s/C_v по таблицам [14] определены ординаты аналитических кривых и для каждой выделенной совокупности ряда построены аналитические кривые распределения.

Оценка для неоднородных рядов

В случае неоднородности исходных данных гидрометрических наблюдений, когда рассматриваемый ряд состоит из неоднородных элементов гидрологического режима, эмпирические и аналитические кривые распределения устанавливаются отдельно для каждой однородной совокупности.

Общая кривая распределения вероятностей превышения рассчитывается на основе кривых, установленных по однородным элементам. В данной работе учитывалось то, что в каждом году имеется лишь одно значение элемента рассматриваемой гидрологической характеристики, ежегодные вероятности превышения при любом ее значении определялись по формуле для двух генетически однородных элементов:

$$P = (n_1 P_1 + n_2 P_2) / (n_1 + n_2) \%, \quad (2.12)$$

где n_1, n_2 – числа членов однородных элементов

Вероятности ежегодного превышения (обеспеченности) в формуле (2.12) выражаются в процентах.

Таблица 2.5. Параметры распределения рядов минимальных расходов воды рек бассейна Верхнего Дона

№	Река-створ	Среднесуточный (наименьший среднесуточный расход)				
		Cv	Cs/Cv	R (1)	Q 1%	Средняя ошибка E1
1.	р. Девица- с. Девица	0.3	2.1	0.15	8.6	0.08
2.	р. Битюг- г. Бобров	0.46	1.11	0.63	8.8	0.13
3.	р. Битюг- пгт. Мордово	0.9	1.53	0.7	1.3	0.3
4.	р. Сосна- г. Елец	0.4	1.0	0.5	50.9	0.12
5.	р. Хопер- г. Новохоперск	0.5	1.5	0.68	71.0	0.13
6.	р. Красивая Меча-г.Ефремов	0.45	1.5	0.88	21.3	0.15
7.	р. Тихая Сосна-с. Алексеевка	0.74	0.16	0.75	5.0	0.25
8.	р. Россошь-пгт. Подгоренский	0.4	2.0	0.05	0.45	0.13
9.	р.Дон-г. Задонск	0.32	2.1	0.77	117	0.08
10.	р. Ворона-г. Борисоглебск	0.48	1.77	0.74	26.0	0.16
11.	р. Воронеж- с. Чертовицкое	0.3	2.8	0.37	42.6	0.1
12.	р. Воронеж- ст. Заворонежская	0.7	0.8	0.8	6.3	0.2
13.	р. Россошь-пгт. Подгоренский	0.4	2.0	0.05	2.3	0.13
14.	р. Подгорная-г. Калач	0.4	2.0	0.05	0.5	0.4
15.	р. Ворона-Чутановка	0.5	1.8	0.7	13.0	0.6

2.3.Восстановление данных наблюдений

В данной работе часть данных по гидрологическим постам имеет не полный ряд наблюдений за минимальным стоком в силу частичного закрытия постов в 90-е гг. XX века, а также ввиду пропусков наблюдений за характеристиками. Соответственно, перед восстановлением данных наблюдений был проведен анализ данных по подбору рек-аналогов для приведения гидрологических рядов и их параметров к многолетнему периоду.

При выборе рек-аналогов прежде всего рассматривались те водные объекты, которые расположены достаточно близко к постам, имеющим короткие ряды наблюдений, а также сходные физико-географические условия (степень заболоченности, заозеренности и залесенности водосборов, состав почв и т.д.).

При выборе постов проводился также анализ синхронности колебаний стока, однотипность стока. Из рассмотрения исключались водотоки, сток которых зарегулирован.

Для окончательного выбора аналогов проводилась проверка выполнения следующих равенств:

$$L / A^{0,56} \approx L_a / A_a^{0,56} ; \quad (2.13)$$

$$JA^{0,50} \approx J_a A_a^{0,50}, \quad (2.14)$$

где L и L_a — протяженность исходной реки и реки-аналога, км;

J и J_a — уклон воды исходной реки и реки-аналога, ‰;

A и A_a — водосборные площади исходной реки и реки-аналога, км².

Используемые в расчетах гидрографические характеристики изучаемых рек определялись в программе SAS.Планета (<http://saagis.org>).

Существует несколько способов приведения рядов к многолетнему периоду [15]. В работе использовался аналитический метод, в основе которого лежит регрессионный анализ с привлечением одного или нескольких пунктов — аналогов на различных временных этапах при соблюдении условий:

$$n \geq (6 - 10), R \geq R_{кр}; R/\sigma_R \geq A_{кр}; k/\sigma_k \geq B_{кр}; y/\sigma_y \geq C_{кр} \quad (2.15)$$

где n — продолжительность ряда совместных наблюдений;

R — коэффициент парной корреляции между значениями стока исследуемой реки и значениями стока в пунктах-аналогах;

k — коэффициент уравнения регрессии;

y — восстановленное значение рассматриваемой гидрологической характеристики;

σ_R — средняя квадратическая погрешность коэффициента корреляции, которая определяется по формуле (2.16):

$$\sigma_R = (1 - R^2) / \sqrt{n - 2}; \quad (2.16)$$

σ_k — средняя квадратическая погрешность коэффициента регрессии, которая определяется по формуле (2.17):

$$\sigma_k = (\sigma / \sigma_a) \sqrt{((1 - R)/(n - 1))}; \quad (2.17)$$

σ_y — средняя квадратическая погрешность восстановленного значения гидрологической характеристики.

$R_{кр}$ — критическое значение коэффициента парной корреляции — $\geq 0,7$;

$A_{кр}, B_{кр}, C_{кр}$ — критические значения $R/\sigma_R, k/\sigma_k, y/\sigma_y$ соответственно — ≥ 2 .

При проведении процедуры приведения на первом этапе составляют уравнения регрессии и рассчитывают коэффициенты корреляции. Далее уравнения, удовлетворяющие условиям (2.15), располагают в убывающем порядке коэффициентов корреляции. Выбирают уравнение, имеющее наибольший коэффициент корреляции и по нему проводят процедуру восстановления значений стока.

Уравнение множественной линейной регрессии, по которому восстанавливается сток, имеет вид:

$$y = k_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_j x_j + \dots + k_l x_l, \quad (2.18)$$

где y — значения стока в приводимом пункте;

x_j — значения стока в пунктах-аналогах;

k_0 — свободный член;

k_j — коэффициенты уравнения линейной регрессии при $j = 1, 2, \dots, l$, l — число пунктов-аналогов

Для расчета коэффициентов уравнения (2.18) используется метод наименьших квадратов (МНК).

Данные, восстановленные по уравнению (2.18), имеют систематически заниженную дисперсию. Исключение систематического уменьшения дисперсии восстановленных данных необходимо осуществлять одним из двух вариантов.

1) Введением поправки в годовые значения стока, полученные по уравнению регрессии:

$$y'_i = [(y_i - y_n)/r] + y_n, \quad (2.19)$$

где y'_i – значения гидрологических характеристик, рассчитанные по уравнению регрессии;

y_i – значения исходной гидрологической характеристики;

y_n – среднее значение приводимого ряда за совместный с пунктом-аналогом период;

r – коэффициент корреляции.

2) С учетом случайной составляющей отклонений наблюдаемых данных от рассчитанных по уравнению регрессии [16]:

$$y'_i = y_i + \varphi \sigma \sqrt{1 - r^2}, \quad (2.20)$$

где φ – случайная величина, имеющая нормальный закон распределения с математическим ожиданием, равным нулю и дисперсией, равной единице, определяется по вероятности P , которая в свою очередь находится с помощью таблицы равномерно распределенных случайных чисел;

σ – среднее квадратичное отклонение исходного ряда наблюдений. Использование этого варианта рекомендуется осуществлять, если число восстановленных значений не менее 30;

y'_i – годовые значения гидрологических характеристик, рассчитанные по уравнению регрессии;

y_i – годовые значения исходной гидрологической характеристики;

r – коэффициент корреляции.

В последнем случае расчет параметров распределения осуществляется по ряду восстановленных значений без поправки (2.19) и не требует знания параметров ряда-аналога за весь N – летний период наблюдений.

По восстановленному ряду совместно с наблюдаемыми данными рассчитываются параметры распределения: среднее многолетнее значение, коэффициенты вариации, асимметрии и коэффициент корреляции между стоком смежных лет, а также квантили распределения. Расчетные значения коэффициентов асимметрии C_s и автокорреляции $r(1)$ принимаются на основании группового анализа отношения C_s/C_v и $r(1)$ по рекам-аналогам согласно СП 33-101-2003 [12] и Методическим рекомендациям по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений [15].

«На завершающем этапе особое внимание должно быть уделено оценке точности полученных решений, оценке значимости коэффициентов регрессии и коэффициентов множественной корреляции. Оценка эффективности восстановленных данных осуществляется на основании полученных коэффициентов парной, или множественной корреляции, которые должны быть выше заданных значений. Кроме того, эффективность процедуры восстановления отсутствующей гидрометеорологической информации определяется фактически полученными значениями отношений R/σ_R , k/σ_k , y/σ_y , которые должны быть больше заданных при расчетах» [18].

Для расчета выбирались полные, репрезентативные многолетние ряды наблюдений в бассейне Верхнего Дона, с периодом наблюдений более 30-ти лет.

3 Оценка изменений минимального стока

3.1 Исходные данные

Исходными данными являлись ряды наблюдений за минимальным стоком в периоды зимней и летне-осенней межени. Сведения по пунктам наблюдений приведены в таблице 3.2. Схема расположения гидропостов приведена на рисунке 3.1.

Были исследованы постоянные гидрологические посты размещенные на р.Дон и притоков первого и второго порядков.

Для оценки изменений минимального стока в бассейне Верхнего Дона использовались данные по 16 гидрологическим постам.

Для оценки абсолютных минимумов в меженный период были исследованы три зоны: непосредственно река Дон (гидропост р. Дон-г. Задонск), правобережные притоки Дона (р. Сосна, р. Тихая Сосна, р. Красивая Меча) и левобережные притоки Дона такие как р. Воронеж, р. Лесной Воронеж, р. Подгорная (Толучеевка), р. Битюг, р. Россошь, р. Девица, р.Хопер и ее приток р. Ворона.

Территориально посты района исследования расположены в Воронежской, Липецкой и Тамбовской областях.

Материалы для исследования были собраны из опубликованных материалов из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов, государственного водного кадастра, гидрологических ежегодников, архивов Воронежского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также научно-прикладного справочника «Климат России» (программный комплекс «Айссори - ВНИИГМИ-МЦД»).

Таблица 3.1 – Основные гидрографические характеристики водосборов в пунктах гидрологических наблюдений

№ поста	Код поста	Гидрологический пост	Широта	Долгота	Расстояние от истока, км	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Озерность, %	Заболоченность, %	Лесистость, %	Распаханность, %	Период наблюдений
1	78004	р. Дон – г. Задонск	42.40	38.92	302	1568	31100	-	-	<5	75	1890 – действ.
2	78078	р. Девица – с. Девица	51.63	38.95	77	12	1490	-	-		5	1955 – действ.
3	78111	р. Битюг – г. Бобров	51.08	40.08	290	89	7340	-	-	5	75	1928 – действ.
4	78109	р. Битюг – пгт. Мордово	52.08	40.75	71	308	903	-	-	<5	80	1932 – действ.
5	78144	р.Хопер-х.Бесплемяновский	50.75	41.90	735	244	44900	-	-	<5	-	1930 – действ.
6	78054	р. Сосна – г. Елец	52.63	38.52	259	37	16300	-	-	<5	80	1927 – действ.
7	78050	р. Красивая Меча – г. Ефремов	53.13	38.13	111	133	3240	-	-	<5	80	1944 – действ.
8	78106	р. Тихая Сосна – г. Алексеевка	50.63	38.70	74	87	2060	-	-	10	60	1941 – действ.
9	78082	р. Воронеж – г. Липецк 2	52.57	39.57	145	186	15300	-	-	<5	-	1975 – действ.
10	78087	р.Воронеж- с. Чертовицкое	51.82	39.28	290	41	21000	-	-	<5	-	1976 – действ.
11	78092	р.Лесной Воронеж-сл.Заворонежская	52.88	40/48	147	17	2000	-	-	<5	70	1954 – действ.
12	78125	р. Россошь – пгт. Подгоренский	50.24	39.38	34	36	452	-	-	5	70	1952 – 2015
13	78130	р. Подгорная – г. Калач	50.42	41.05	65	73	1790	-	-	<5	65	1932 – действ.

Продолжение таблицы 3.1

№ поста	Код поста	Гидрологический пост	Широта	Долгота	Расстояние от истока, км	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Озерность, %	Заболоченность, %	Лесистость, %	Распаханность, %	Период наблюдений
14	78164	р.Ворона-г.Уварово	51.97	42.27	319	135	9890	-	-	-	70	1956 – действ.
15	78163	р. Ворона-с.Чутановка	52.60	42.75	319	155	299		-	<5	70	
16	78142	р. Хопер-г. Новохоперск	51.08	41.65	656	232	34800	-	-	<5	70	1939– действ.



Рисунок 3.1 – Схема гидрометеорологической изученности

3.2. Основные характеристики

Таблица 3.2 – Основные характеристики водосборов расчетного водотока и рек-аналогов

№ поста	Гидрологический пост	Дли на реки	Площадь водосбора	Средне-взв. укло н	$L/A_{,56}^0$	$J \cdot A_0^{0,5}$	Период наблюдений	Река-аналог
		$L, км$	$км^2$	$J, ‰$				
1	р. Дон – г. Задонск	302	31100	0,27	0,92	47,8	1890 – действ.	–
2	р. Девица – с. Девица	77	1490	1.29	1.29	49.9	1955 – действ.	–
3	р. Битюг-г. Бобров	290	7340	0.28	1.98	24	1928 – действ.	–
4	р. Битюг – пгт. Мордово	71	903	0.89	1.57	26.8	1932 – действ.	
5	р.Хопер-х.Бесплемяновский	491	44900	0.20	1.22	42.40	1932 – действ.	-
6	р. Сосна – г. Елец	259	16300	0.46	1.13	58.7	1927 – действ.	-
7	р. Красивая Меча – г. Ефремов	111	3240	0.76	1.20	43.4	1944 – действ.	–
8	р. Тихая Сосна – г. Алексеевка	74	2060	0.75	1.03	34	1941 – действ.	-
9	р. Воронеж – г. Липецк 2	145	15300	0.29	1.10	41.4	1975 – действ.	–
10	р.Воронеж-с.Чертовицкое	249	21000	0.76	0.94	110	1975 – действ.	-
11	р. Лесной Воронеж-сл.Заворонежская	130	2000	0.1	1.84	4.5	1954 – действ.	-
12	р.Россошь- пгт.Подгоренский	34	452	2.69	1.11	57.1	1952 – 2015	р. Тихая Сосна – г. Алексеевка
13	р. Подгорная-г.Калач	65	1790	0.78	0.98	32.9	1932 – действ.	-
14	р.Ворона-г.Уварово	184	9890	0.20	1.1	19.8	1956– действ.	-

Продолжение таблицы 3.3

№ по ста	Гидрологический пост	Дли на реки	Пло- щадь водо- сбора	Сре дне- взв. укл он	$L/A_6^{0,5}$	$J \cdot A^{0,50}$	Период наблюдений	Река-аналог
		$L, км$	$км^2$	$J, ‰$				
16	р.Ворона- с.Чутановка	144	5560	0.14	1.15	10.4	1915– действ.	

По совместным рядам наблюдений по обоим створам проводится анализ синхронности в колебаниях максимальных расходов. Анализ проводится аналитическим методом, основан- ным на определении коэффициента парной корреляции. При проведении корреляционного анализа учитывались условия (2.15), описанные в разделе 2.3 настоящей работы.

Как видно из таблицы 3.3, для восстановления данных были использованы ряды наблю- дений за максимальными расходами воды весеннего половодья по гидрологическим постам р. Битюг – р.п. Мордово, р. Подгорная – г. Калач и р. Тихая Сосна – г. Алексеевка.

Результаты корреляционного анализа совместных рядов наблюдений представлены в приложении В.

В таблице 3.4 приведены коэффициенты, полученные в результате корреляционного анализа.

Используемые в данной работе ряды наблюдений (полные и восстановленные) были про- верены на однородность. Для этого были проанализированы хронологические и интегральные графики максимальных расходов.

На графиках видно, что для различных постов в начале 70-х гг. XX века (16 постов из 21 проанализированных) и в начале 80-х гг. (9 из 21) изменился режим максимальных расходов, который, скорее всего, связан с изменениями климата. По остальным постам так же произо- шло резкое уменьшение стока половодья, но уже в конце 80х – начале 90-х гг.

Соответственно, ряд наблюдений был разделен на две части и проведен анализ однород- ности по критериям Фишера и Стьюдента [11, 12, 13, 14]. Параметры критериев Фишера и Стьюдента приведены в таблице 3.5 для минимального рекомендуемого уровня значимости $\alpha=1 \%, 5\%, 10\%$.

Оценка однородности минимальных расходов воды (за период зимней и летне-осенней межени) в была выполнена по критериям Фишера и Стьюдента с использованием многолет- них данных по 16 гидрологическим постам.

Таблица 3.3 –Результаты корреляционного анализа

№п/ п	Гидрологический пост	Пост-аналог	Совместный период наблюдений	R	σ_R	R/σ_R	k	σ_k	k/σ_k
1	р. Россошь – пгт. Подгоренский	р. Тихая Сосна – г. Алексеевка	59	0.86	0.03	25.67	0.21	0.01	17.82

Таблица 3.4 – Коэффициенты критериев Фишера и Стьюдента

№п/ п	Гидрологический пост	Период наблюдений	n	F	$F_{\alpha 1\%}$	$F_{\alpha 5\%}$	$F_{\alpha 10\%}$	t	$t_{\alpha 1\%}$	$t_{\alpha 5\%}$	$t_{\alpha 10\%}$
1	р. Дон – г. Задонск	1928 – 1972 1973 – 2021	44 48	1.96	2.12	1.83	1.65	5.82	2.63	1.99	1.66
4	р. Красивая Меча – г. Ефремов	1949 – 1983 1984 – 2021	32 36	2.47	2.61	2.06	1.82	4.67	2.66	2.00	1.67
5	р. Сосна – г. Елец	1944 – 1983 1984 – 2021	40 38	4.98	2.48	1.98	1.76	5.90	2.65	2.00	1.67
6	р. Девица – с. Девица	1956 – 1972 1973 – 2021	17 49	9.45	2.18	1.81	1.65	5.24	2.63	2.36	1.98
7	р. Воронеж – г. Липецк 2	1932 – 1971 1972 – 2021	39 50	5.78	2.15	1.79	1.62	7.94	2.63	1.98	1.66
8	р. Тихая Сосна – г. Алексеевка	1947 – 1972 1973 – 2021	26 49	11.23	2.18	1.81	1.63	4.01	2.77	1.98	1.66
9	р. Битюг – пгт. Мордово	1949 – 1982 1983 – 2021	33 34	18.69	2.68	2.19	1.93	5.73	2.66	2.65	2.21

Продолжение таблицы 3.4

№п/ п	Гидрологический пост	Период наблюдений	n	F	$F_{\alpha 1\%}$	$F_{\alpha 5\%}$	$F_{\alpha 10\%}$	t	$t_{\alpha 1\%}$	$t_{\alpha 5\%}$	$t_{\alpha 10\%}$
10	р. Битюг – г. Бобров	1933 – 1982 1983 – 2021	48 39	10.63	2.22	1.87	1.68	5.49	2.63	2.59	2.18
11	р. Черная Калитва – пгт. Ольховатка	1953 – 1972 1973 – 2021	18 49	8.89	2.18	1.81	1.63	4.24	2.63	1.99	1.66
12	р. Россошь – пгт. Подгоренский	1956 – 1988 1989 – 2021	32 33	26.44	2.71	2.12	1.86	5.49	2.66	2.00	1.67
13	р. Подгорная – г. Калач	1936 – 1987 1988 – 2021	51 34	4.72	2.14	1.78	1.62	3.88	2.63	1.98	1.66
14	р. Ворона – г. Борисоглебск	1933 – 1982 1983 – 2021	46 39	9.19	2.28	1.88	1.69	5.36	2.64	2.37	1.99

Большинство рядов максимальных расходов весеннего половодья оказались неоднородными по всем критериям.

Для минимального рекомендуемого уровня значимости $\alpha=1\%$ неоднородность по критерию Стьюдента выявилась у 95% рядов, а по критерию Фишера у 85%.

Для минимального рекомендуемого уровня значимости $\alpha=5\%$ неоднородность по критерию Стьюдента выявилась у 100% рядов, а по критерию Фишера у 90%.

Для минимального рекомендуемого уровня значимости $\alpha=10\%$ неоднородность по критерию Стьюдента и Фишера выявилась у всех рядов, используемых в данной работе.

Неоднородность рядов на большинстве рек бассейна Дона обусловлена тем, что максимальные расходы воды и сроки стока весеннего половодья в последние десятилетия снизились. Также произошло уменьшение дисперсии их колебаний.

В приложении А приведены хронологические и интегральные графики максимальных расходов по каждому гидрологическому посту территории исследования.

На рисунках 3.2 – 3.5 в качестве примера представлены хронологический и интегральный график максимальных расходов по постам р. Битюг – г. Бобров и р. Тихая Сосна – г. Алексеевка.

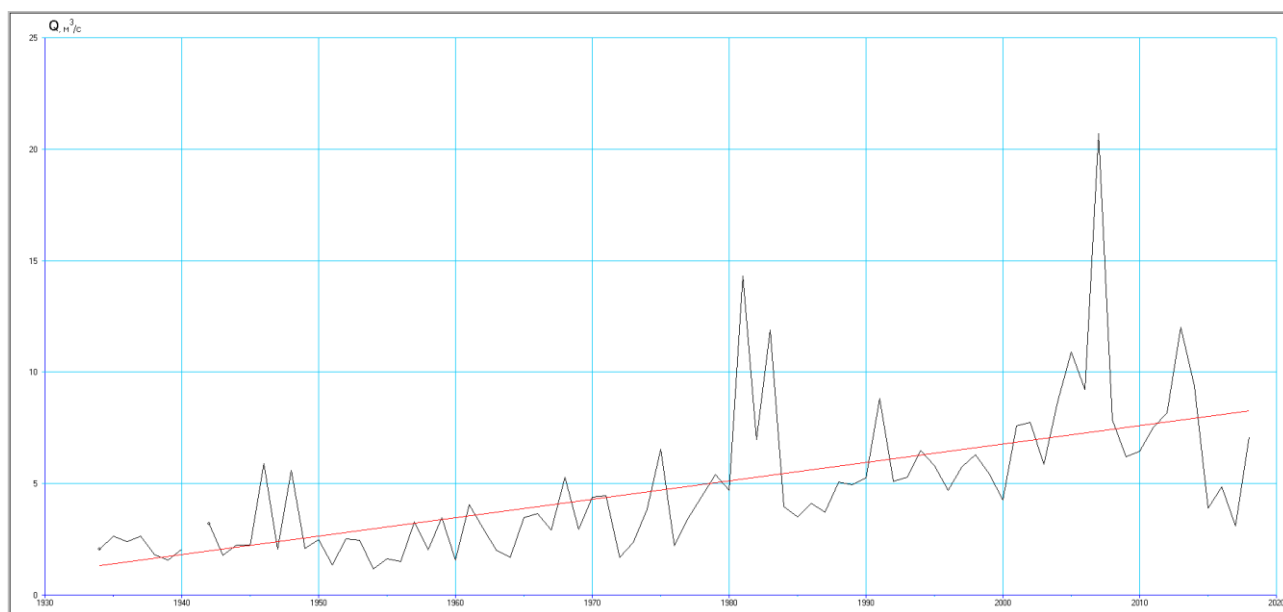


Рисунок 3.2 – Хронологический график минимальных расходов (гидрологический пост р. Битюг – г. Бобров)

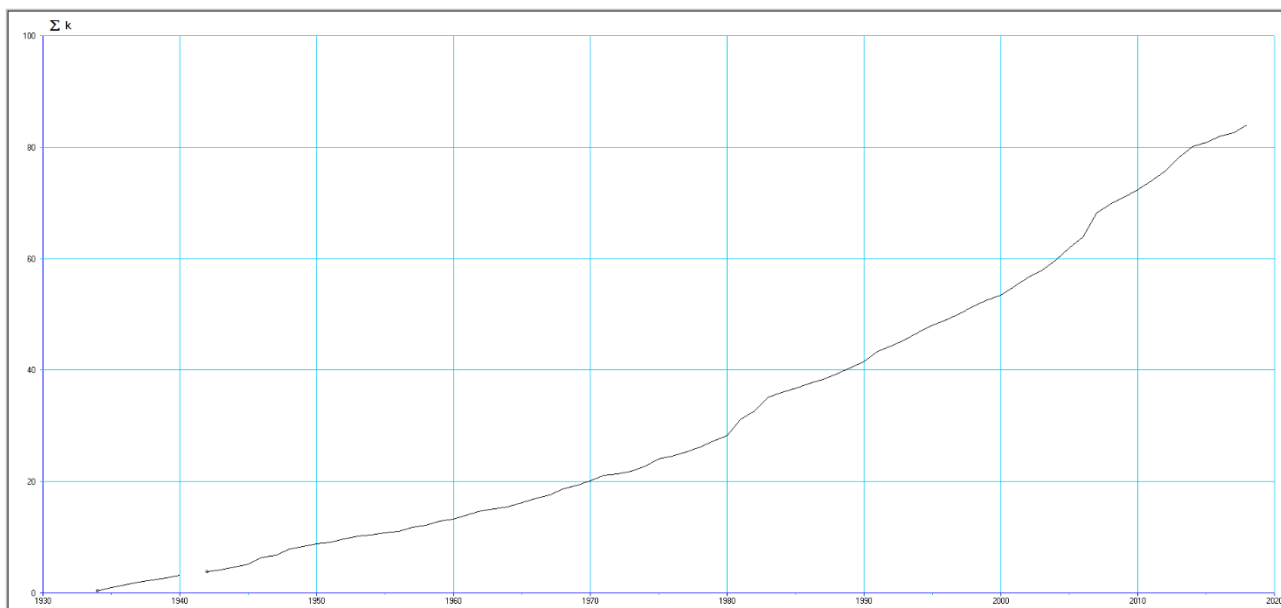


Рисунок 3.3 – Интегральный график минимального расхода воды за зимний меженьный период (гидрологический пост р. Битюг – г. Бобров)

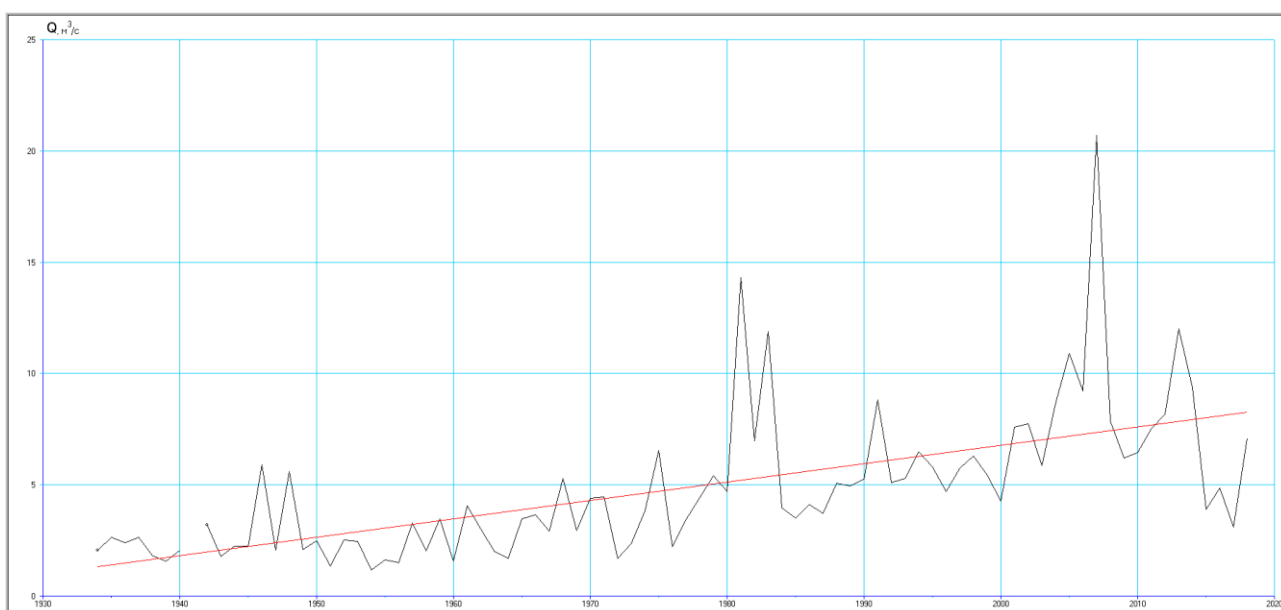


Рисунок 3.4 – Хронологический график минимальных расходов за период зимней межени (гидрологический пост р. Тихая Сосна – г. Алексеевка)

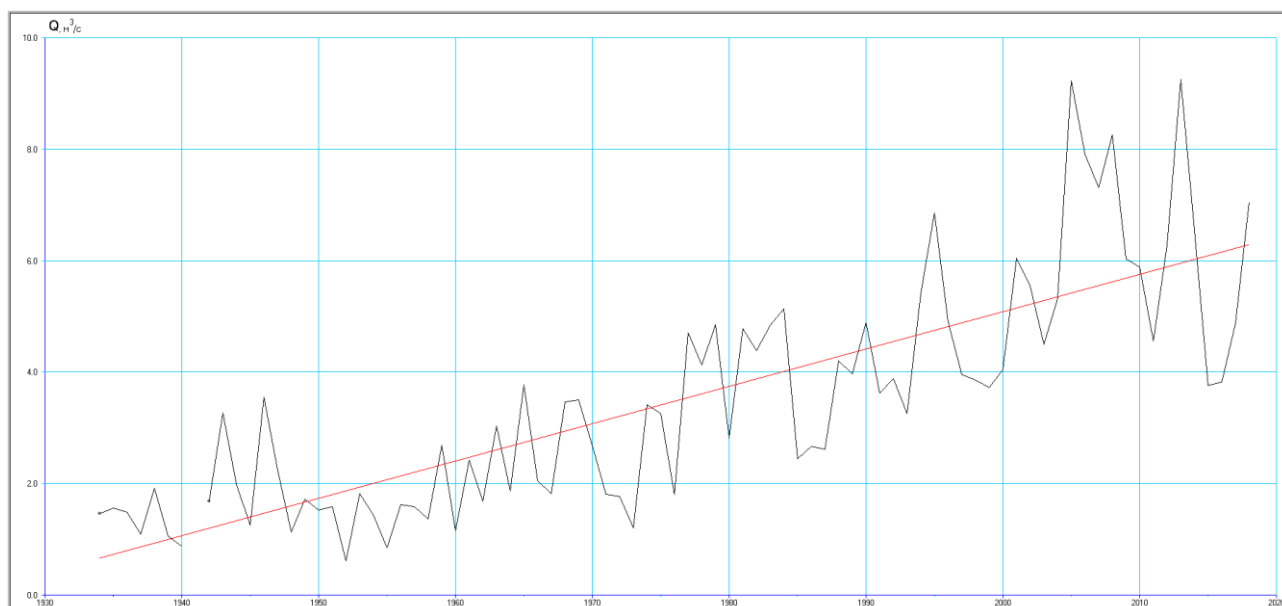


Рисунок 3.5 – Интегральный график минимальных расходов летне-осенней межени (гидрологический пост р. Тихая Сосна – г. Алексеевка)

В связи с тем, что данные являются неоднородными, согласно нормативной документации [11, 12] эмпирические и аналитические кривые распределения устанавливаются отдельно для каждой однородной совокупности данных. Для каждой выделенной совокупности данных были рассчитаны параметры аналитических кривых распределения ежегодных вероятностей превышения. Результаты расчетов приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры для построения аналитических кривых распределения минимальных расходов воды за зимнюю межень

Годы наблюдений	$Q_{cp}, \text{ м}^3/\text{с}$	C_v	C_s	C_s / C_v	$r(1)$
р. Дон – г. Задонск					
1928 – 1970 гг.	39.3	0.3	0.3	1.0	0.2
1971 – 2022 гг.	66.9	0.3	0.6	1.9	0.6
р. Девица– с.Девица					
1956 – 2022 гг.	2.31	0.4	0.1	0.14	0.7
р. Битюг – г. Бобров					
1933 – 1970 гг.	2.7	0.4	1.3	3	-0.07
1971 – 2022 гг.	6.4	0.5	2.1	4.1	0.3
р. Битюг – пгт.Мордово					
1949 – 1970 гг.	0.14	1.3	0.4	0.9	0.1
1971 – 2018 гг.	0.7	0.7	1.3	1.9	0.07
р. Хопер-х. Бесплемяновский					
1949-2022	41.4	0.5	0.9	1.8	0.7
р. Сосна-г. Елец					
1928-1971	19.0	0.2	0.4	2	0.14
1972-2022	30.6	0.3	0.3	1	0.6
р. Красивая Меча-г.Ефремов					
1949-2022	9.3	0.5	2.5	4.8	0.5
р. Тихая Сосна-г.Алексеевка					
1947-2022	0.7	0.7	0.6	0.9	0.8
р.Воронеж-г.Липецк-2					
1932-1970	12.8	0.2	1.2	5.9	0.5
1971-2016	14.0	0.16	-0.54	-3.3	0.14
р. Воронеж- с.Чертовицкое					
1975-2022	32.9	0.3	0.6	2	0.2

Продолжение таблицы 3.6

Годы наблюдений	$Q_{cp}, \text{ м}^3/\text{с}$	C_v	C_s	C_s / C_v	$r(1)$
р. Лесной Воронеж – сл.Заворонежская					
1954– 1970 гг.	1.2	0.576	0.471	0.82	0.30
1971 – 2022 гг.	3.5	0.632	0.434	0.69	0.15
р. Россошь– пгт. Подгоренский					
1947 – 1970 гг.	0.15	0.2	-1.2	-4.9	0.15
1971 – 2022 гг.	0.2	0.5	1.1	-2.2	0.3
р. Подгорная – г. Калач					
1936 – 1970 гг.	0.2	0.6	0.7	1.1	0.4
1971 – 2022 гг.	1.03	0.4	-0.02	-0.1	0.6
р. Ворона – г.Уварово					
1956-1970	7.1	0.3	1.1	2.4	0.5
1971-2022	11.0	0.4	0.4	0.6	0.6
р. Ворона – с. Чутановка					
1915-1970	3.7	0.4	1.1	2.4	0.5
1971-2022	5.7	0.5	0.4	0.6	0.6
р. Хопер – г. Новохоперск					
1939 – 1970 гг.	18.9	0.3	0.8	3.0	-0.03
1971 – 2018гг.	49.9	0.4	1.5	3.2	0.3

Таблица 3.6 – Параметры для построения аналитических кривых распределения минимальных расходов воды за летне-осеннюю межень

Годы наблюдений	$Q_{cp}, \text{ м}^3/\text{с}$	C_v	C_s	C_s / C_v	$r(1)$
р. Дон – г. Задонск					
1928 – 1970 гг.	50.9	0.17	-0.02	-0.1	0.6
1971 – 2022 гг.	39.3	0.3	0.3	1.0	0.2
р. Девица– с. Девица					
1956 – 2022 гг.	1.7	0.3	-0.1	-0.4	0.6
р. Битюг – г. Бобров					
1933 – 1970 гг.	1.7	0.4	0.9	2.2	0.14
1971 – 2022 гг.	4.4	0.4	0.6	1.7	0.6
р. Битюг – пгт.Мордово					
1949 – 1970 гг.	0.11	0.4	-0.1	-0.2	0.4
1971 – 2018 гг.	0.5	0.7	1.0	1.4	0.6
р. Хопер-х. Бесплемяновский					
1949-2022	32.5	0.4	0.6	1.8	0.7
р. Сосна-г. Елец					
1928-1971	23.2	0.3	0.6	1.6	0.8
1972-2022	31.0	0.3	0.1	0.1	0.7
р. Красивая Меча-г.Ефремов					
1949-2022	10.2	0.4	0.8	1.9	0.9
р. Тихая Сосна-г.Алексеевка					
1947-1970	1.3	0.7	0.8	1.2	0.8
1971-2022	2.4	0.4	0.2	0.4	0.7
р.Воронеж-г.Липецк-2					
1932-1970	12.9	0.3	0.8	2.7	0.4
1971-2016	15.8	0.3	0.2	0.6	0.6
р. Воронеж- с.Чертовицкое					
1975-2022	23.2	0.3	0.8	2.3	0.3

Продолжение таблицы 3.6

Годы наблюдений	$Q_{cp}, \text{ м}^3/\text{с}$	C_v	C_s	C_s / C_v	$r(1)$
р. Лесной Воронеж – сл.Заворонежская					
1954– 1970 гг.	0.9	0.8	0.6	0.8	0.6
1971 – 2022 гг.	2.7	0.6	0.3	0.5	0.7
р. Россошь– пгт. Подгоренский					
1947 – 1970 гг.	0.15	0.6	0.1	0.2	0.3
1971 – 2022 гг.	0.2	0.4	0.4	1.0	0.1
р. Подгорная – г. Калач					
1936 – 1970 гг.	0.3	0.6	0.7	1.1	0.16
1971 – 2022 гг.	0.7	0.4	0.4	1.0	0.4
р. Ворона – г.Уварово					
1956-1970	6.5	0.2	0.2	1.2	-0.18
1971-2022	11.0	0.4	0.4	0.6	0.6
р. Ворона – с. Чутановка					
1915-1970	3.9	0.4	0.6	1.5	0.6
1971-2022	5.8	0.5	0.6	1.2	0.6
р. Хопер – г. Новохоперск					
1939 – 1970 гг.	20.2	0.3	0.5	1.8	0.5
1971 – 2018гг.	36.7	0.3	0.4	1.2	0.5

По результатам гидрологических расчетов, согласно [10, 11, 12, 14], по выбранным гидрологическим постам были рассчитаны минимальные расходы воды различной обеспеченности. В таблице 3.7 приведены результаты расчетов максимальных расходов воды 1%-ой обеспеченности, а также относительные изменения данных расходов.

Согласно данным таблицы 3.7 средний максимальный сток по выбранным постам уменьшился в среднем на 62%, максимальное снижение стока на изучаемой территории наблюдается на постах р. Битюг – пгт. Мордово и р. Карачан – с. Алешки (сток уменьшился на 78 %), а минимальное – на посту р. Хопер – г. Поворино (уменьшение стока составило 45%).

Таблица 3.7 – Минимальные расходы за период зимней межени $Q_{P\%,}$ м³/с

№ п/п	Гидрологический пост	Период наблюдений	Q_{cp} , м ³ /с	ΔQ_{cp} , %	$Q_{1\%}$ м ³ /с	$\Delta Q_{1\%}$, %	Период наблюдений	Q_{cp} , м ³ /с	$Q_{1\%}$, м ³ /с
1	р. Дон – г. Задонск	1928 – 1972 1973 – 2021	2868 1341	53	6683 4545	32	1928 – 2021	2071	6276
2	р. Девица – с. Девица	1956 – 1972 1973 – 2021	229 69	70	753 266	65	1956 – 2021	111	635
3	р. Красивая Меча – г. Ефремов	1949 – 1983 1984 – 2021	382 166	57	1286 823	36	1949 – 2021	267	1197
5	р. Сосна – г. Елец	1944 – 1983 1984 – 2021	2051 809	61	5168 1949	62	1944 – 2021	1367	4845
7	р. Воронеж – г. Липецк 2	1932 – 1971 1972 – 2021	1159 367	68	3349 1275	62	1932 – 2021	714	2983

Продолжение таблицы 3.7

№ п/п	Гидрологический пост	Период наблю- дений	Q_{cp} , м³/с	ΔQ_{cp} , %	$Q_{1\%}$ м³/с	$\Delta Q_{1\%}$, %	Период наблю- дений	Q_{cp} , м³/с	$Q_{1\%}$, м³/с
8	р. Усмань – д. Боровое	1977 – 1995	133	46	483	64	1977 – 2021	101	435
		1996 – 2021	72		175				
9	р. Хава – с. Ильиновка	1951 – 1982	73	70	226	75	1951 – 2021	48	218
		1983 – 2021	22		56,8				
10	р. Тихая Сосна – г. Алексе- евка	1947 – 1972	237	75	818	72	1947 – 2021	121	705
		1973 – 2021	59		232				
11	р. Битюг – пгт. Мордово	1949 – 1982	151	78	465	74	1949 – 2021	92	435
		1983 – 2021	33		122				
12	р. Битюг – г. Бобров	1933 – 1982	483	69	1637	68	1933 – 2021	341	1612
		1983 – 2021	151		520				
13	р. Чигла – пос. Первомай- ский	1959 – 1995	47	70	200	72	1959 – 2021	34	189
		1996 – 2021	14		57				
14	р. Черная Калитва – пгт. Ольховатка	1953 – 1972	142	61	574	68	1953 – 2021	78	459
		1973 – 2021	55		186				

Продолжение таблицы 3.7

№ п/п	Гидрологический пост	Период наблюдений	Q_{cp} , м ³ /с	ΔQ_{cp} , %	$Q_{1\%}$ м ³ /с	$\Delta Q_{1\%}$, %	Период наблюдений	Q_{cp} , м ³ /с	$Q_{1\%}$, м ³ /с
15	р. Россошь – пгт. Подгоренский	1956 – 1988 1989 – 2021	35 8	77	141 19	87	1956 – 2021	22	124
16	р. Подгорная – г. Калач	1936 – 1987 1988 – 2021	161 65	60	601 279	54	1936 – 2021	123	565
17	р. Хопер – г. Поворино	1929 – 1982 1983 – 2021	774 426	45	2167 1436	34	1939 – 2021	633	2113
18	р. Ворона – г. Борисоглебск	1933 – 1982 1983 – 2021	502 228	55	1678 578	66	1933 – 2021	382	1554

3.1 Оценка изменений климатических параметров

3.1.1. Исходные данные

Оценка основных элементов климата выполнена на основании климатических характеристик по ближайшим метеостанциям.

Схема расположения метеостанций представлена на рисунке 3.1. В таблице 3.1 приведены основные сведения о метеостанциях.

Таблица 3.1 – Таблица метеорологической изученности

№ п/п	Код пункта наблюдений	Метеостанция	Высота над уровнем моря, м БС	Период наблюдений
1	34122	Воронеж	147	1918 – действ.
2	27928	Елец	167	1899-действ.
3	27930	Липецк	177	1956-действ.
4	27947	Тамбов	128	1940-действ.

3.1.2 Климатические сценарии

Были изучены климатические сценарии, разработанные Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC).

Исследование опирается на материалы Шестого оценочного доклада (AR6) IPCC, опубликованного в период с октября 2015 года по июль 2023 года.

Отчет рассматривает взаимосвязь между адаптацией и смягчением последствий изменения климата в рамках различных климатических сценариев, представленных в AR6, а также анализирует влияние этих сценариев на глобальное потепление и экосистемы. Особое внимание уделяется форматам данных, используемым IPCC, таким как NetCDF и GRIB, и доступу к данным через различные порталы, включая Copernicus Climate Change Service (C3S), German Climate Computing Centre (DKRZ) и Earth System Grid Federation (ESGF).

IPCC использует различные форматы данных для хранения и распространения результатов климатического моделирования. Эти форматы стандартизированы для обеспечения совместимости и доступности данных для научного сообщества.

Основным форматом данных, используемым IPCC, является NetCDF (Network Common Data Format) с применением стандарта Climate and Forecast (CF). Этот формат является стандартом в науках о Земле и широко используется для хранения многомерных массивов данных, таких как результаты климатических моделей. Для анализа данных в формате NetCDF рекомендуются такие инструменты, как cdo (Climate Data Operators), ncdo (NetCDF Operators) и ncl (NCAR Command Language).

Для более ранних оценочных докладов (FAR, SAR, TAR и AR4) использовался формат GRIB (Gridded Binary). GRIB является стандартом Всемирной метеорологической организации (ВМО) для представления прогнозов и результатов анализа. Для работы с файлами GRIB используются такие инструменты, как cdo и wgrib.

Переход от формата GRIB к NetCDF/CF отражает стремление к стандартизации и улучшению совместимости данных. Данные IPCC часто распространяются в виде месячных средних значений, климатологий (средние значения за 20 и 30 лет), а также в формате Geotiff, совместимом с GIS.

Данные, используемые в докладах IPCC, часто поступают из проектов CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). CMIP — это международный проект, в рамках которого различные исследовательские группы проводят моделирование климата с использованием различных моделей и сценариев. Данные CMIP играют ключевую роль в подготовке оценочных

докладов IPCC.

Данные CMIP6, которые лежат в основе Шестого оценочного доклада IPCC (AR6), доступны через несколько порталов, включая Copernicus Climate Change Service (C3S), German Climate Computing Centre (DKRZ) и Earth System Grid Federation (ESGF). Эти порталы предоставляют доступ к широкому спектру данных, включая результаты моделирования климата, прогнозы и климатические индексы.

IPCC использует различные сценарии для моделирования будущего климата. Ранее использовались сценарии Representative Concentration Pathways (RCP), которые описывают различные траектории концентрации парниковых газов в атмосфере. В AR6 также используются сценарии Shared Socioeconomic Pathways (SSP), которые описывают различные социально-экономические траектории развития и их влияние на выбросы парниковых газов.

Сценарии SSP, такие как SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5, представляют различные потенциальные будущие социально-экономические условия и связанные с ними выбросы парниковых газов. Эти сценарии позволяют анализировать различные пути развития климата и их последствия.

IPCC поощряет открытый доступ к своим данным. Данные CMIP6, используемые в AR6, доступны через каталоги DKRZ и CEDA, а также через портал C3S. Данные распространяются под лицензиями Creative Commons Attribution 4.0 International License, что требует надлежащего цитирования источников данных. Это способствует прозрачности и воспроизводимости исследований.

В контексте изменения климата, адаптация и смягчение последствий представляют собой два ключевых, но различных подхода к решению этой проблемы. Смягчение последствий направлено на сокращение выбросов парниковых газов и предотвращение дальнейшего изменения климата, в то время как адаптация направлена на снижение уязвимости к последствиям изменения климата, которые уже происходят или неизбежны в будущем.

Смягчение последствий, в основном, приносит глобальную пользу, но его эффект в большей степени ожидается после середины XXI века. Адаптация, напротив, обеспечивает преимущества на локальном и региональном уровнях, особенно в контексте немедленного реагирования на существующие и прогнозируемые изменения климата.

Несмотря на различия, адаптация и смягчение последствий являются взаимодополняющими и необходимыми компонентами комплексной стратегии по борьбе с изменением климата. Даже самые амбициозные сценарии смягчения не могут полностью предотвратить климатические изменения в ближайшей перспективе, поэтому адаптация необходима для решения неотложных проблем уязвимости. В то же время, чрезмерная зависимость от адаптации

без усилий по смягчению может привести к таким масштабам климатических изменений, которые сделают адаптацию чрезмерно дорогой и сложной.

Эффективная климатическая политика требует одновременного и скоординированного применения мер как по адаптации, так и по смягчению. Это означает, что необходимо разрабатывать стратегии, которые одновременно снижают выбросы парниковых газов и повышают устойчивость к последствиям изменения климата. Комплексный подход также включает в себя развитие технологий, научные исследования и международное сотрудничество.

В Шестом оценочном докладе (AR6) IPCC представлен расширенный анализ сценариев, основанный на обновленной базе данных сценариев AR6, размещенной Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA). Эта база данных включает тысячи количественных сценариев, охватывающих социально-экономическое развитие, выбросы парниковых газов и секторальные преобразования.

База данных сценариев AR6 включает 3131 количественный сценарий, охватывающих социально-экономическое развитие, выбросы парниковых газов и секторальные преобразования в энергетике, землепользовании, транспорте, зданиях и промышленности. Сценарии происходят из более чем 191 уникальной модельной структуры и 95 модельных семейств, представляющих глобальные, национальные, мультирегиональные и секторальные модели.

Эта база данных является важным ресурсом для анализа различных путей развития климата и их последствий. Она позволяет исследователям и политикам изучать различные варианты смягчения и адаптации и оценивать их эффективность.

Хотя AR6 продолжает рассматривать сценарии стабилизации концентраций парниковых газов, акцент смещается на более детальный анализ путей смягчения, совместимых с долгосрочными климатическими целями. Это включает оценку различных категорий сценариев, таких как сценарии с превышением целевых показателей, доступностью технологий и политическими предпосылками.

База данных сценариев AR6 обеспечивает более широкую основу для оценки, охватывая сценарии выбросов парниковых газов в масштабах всей экономики, энергетические и секторальные сценарии, от глобального до национального уровня. Это позволяет более точно оценить последствия различных политических решений и технологических изменений.

Климатические модели IPCC, используемые для разработки сценариев, прогнозируют дальнейшее глобальное потепление в XXI веке и далее. Величина потеп

ления зависит от сценария выбросов. Сценарии с высокими выбросами приводят к значительно более высоким уровням потепления, чем сценарии с низкими выбросами.

Данные CMIP6, доступные через C3S Climate Data Store (CDS) и DKRZ catalogue, предоставляют ежедневные и ежемесячные глобальные климатические прогнозы из многочисленных экспериментов, моделей и временных периодов. CMIP6 также включает прогнозы, основанные на SSP (Shared Socioeconomic Pathways), такие как SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5, которые представляют различные потенциальные будущие социально-экономические развития и связанные с ними выбросы парниковых газов. NOAA Climate Projection Web Portal также предоставляет доступ к данным CMIP6, позволяя пользователям визуализировать карты и временные ряды для различных переменных, экспериментов и моделей.

Изменение климата оказывает значительное воздействие на экосистемы, включая изменения в распределении видов, потерю местообитаний и нарушение пищевых цепей. Климатические модели IPCC также используются для прогнозирования воздействия изменения климата на экосистемы.

IPCC-WGI AR6 Interactive Atlas Gridded Monthly Dataset, доступный через Instituto de Fisica de Cantabria (IFCA) и C3S CDS, предоставляет данные глобальных (CMIP5 и CMIP6) и региональных (CORDEX) прогнозов для 22 переменных и индексов, релевантных драйверам климатического воздействия. Этот набор данных особенно полезен для пользователей, которые хотят разрабатывать индивидуальные продукты, такие как региональная информация на национальном или субнациональном уровнях.

IPCC объединяет ученых и политиков со всего мира. Четкие и последовательные форматы данных необходимы для эффективной коммуникации и сотрудничества. Использование Markdown, с его возможностью включать блоки кода и форматированные данные, облегчает эту коммуникацию. Стандартизированные форматы данных, такие как NetCDF/CF, и доступ к данным через IPCC Data Distribution Centre (DDC), C3S и другие порталы, играют ключевую роль в обеспечении доступности и совместимости данных. Программы, используемые для создания многих рисунков в отчетах IPCC, доступны через GitHub, что способствует прозрачности и воспроизводимости.

Архив данных IPCC включает данные из многочисленных климатических моделей от учреждений по всему миру, таких как Beijing Climate Center (BCC), Bjerknæs Centre for Climate Research (BCCR), Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (CCCma) и другие. Данные CMIP6, используемые в последнем оценочном докладе IPCC, доступны с серверов Earth System Grid Federation (ESGF) и через порталы, такие как C3S CDS и DKRZ catalogue.

Исследование климатических сценариев IPCC подчеркивает их важность для понимания будущих изменений климата и их последствий. Сценарии предоставляют основу для оценки различных путей развития климата и для разработки эффективных мер по смягчению

и адаптации. AR6 и база данных сценариев AR6 представляют собой ценный ресурс для научного сообщества, политиков и общественности, предоставляя наиболее полную и достоверную информацию об изменении климата.

Необходимо продолжать разработку и реализацию политики, способствующей как смягчению, так и адаптации, основываясь на научных данных IPCC и используя доступные ресурсы, такие как база данных сценариев AR6. Принятие решений должно основываться на принципах управления рисками, справедливости и устойчивого развития, с особым вниманием к уязвимым секторам и региональным аспектам адаптации. Климатические сценарии IPCC играют ключевую роль в этом процессе, предоставляя необходимую информацию для принятия обоснованных решений и для действий по борьбе с изменением климата.

4 Испарение

Оценка стока, то есть объема воды, стекающей с определенной территории, является одной из ключевых задач гидрологии. Для решения этой задачи разработано множество эмпирических формул, которые устанавливают связь между величиной стока и различными климатическими и физико-географическими факторами.

Испарение – это ключевой процесс в гидрологическом цикле, представляющий собой переход воды из жидкого состояния в газообразное и ее последующий перенос в атмосферу. Этот процесс играет важную роль в формировании водного баланса, влияя на уровень воды в водоемах, дебит рек и доступность воды для растений. Исследование испарения имеет большое значение для гидрологических и метеорологических исследований, а также для управления водными ресурсами.

Интенсивность испарения в основном определяется через уравнение водного баланса как разница между осадками и стоком. Однако у этого подхода есть существенный недостаток — он не позволяет независимо оценивать характеристики, составляющие уравнение водного баланса.

В тексте был проведен сравнительный анализ шести таких формул: формулы Мезенцева, Ольдекопа, Тюрка, Постникова, Будыко и Швайбера, которые были применены для рядов минимального стока. Целью исследования является выявление преимуществ и недостатков каждой формулы, а также определение области их применимости на основе имеющихся теоретических знаний и результатов исследований.

Эмпирические формулы для расчета стока представляют собой математические выражения, которые связывают величину стока с различными факторами, такими как осадки, испарение, температура и физико-географические характеристики водосбора. Эти формулы основаны на статистическом анализе данных наблюдений и, как правило, имеют ограниченную область применения.

Рассмотрим некоторые из них.

Формула Мезенцева

Формула Мезенцева – одна из наиболее известных эмпирических формул для расчета годового стока. Она исходит из предположения о зависимости стока от годового количества осадков и испаряемости. Формула имеет вид:

$$Y = a * (X - b * E)$$

где: * Y - годовой сток * X - годовое количество осадков * E - годовая испаряемость * a, b - эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-географических условий бассейна.

Плюсы:

Относительная простота применения, требующая лишь данных об осадках и испаряемости.

Широкое распространение и апробация в различных регионах.

Учитывает влияние испарения на формирование стока.

Минусы:

Эмпирический характер, что ограничивает ее точность при применении в условиях, отличных от тех, для которых были определены коэффициенты a и b .

Не учитывает другие факторы, влияющие на сток, такие как рельеф, почвенный покров, растительность и др.

Требует предварительного определения эмпирических коэффициентов, что может быть затруднительно для неосвоенных территорий.

Новые данные: Исследования, проведенные в Институте географии Российской академии наук, указывают на возможность дополнения формулы Мезенцева данными об антропогенных факторах, таких как изменения в землепользовании и влияние водохранилищ, для повышения точности расчетов. Работы Роде и Смирнова (1972) демонстрируют, что формула не учитывает задерживающую роль крон деревьев, которая может достигать 30% от общего количества осадков. Анализ чувствительности модели показывает, что точность расчетов по формуле Мезенцева сильно зависит от правильного определения коэффициентов a и b .

Формула Э.М. Ольдекопа

Формула Ольдекопа также предназначена для расчета годового стока. Она базируется на предположении о том, что сток является функцией от осадков и дефицита увлажнения. Формула имеет вид:

$$z = z_0 \operatorname{th} \frac{x}{z_0},$$

где z – годовой слой испарения в мм;

z_0 – возможный максимум испарения при данных климатических условиях при предположении постоянного избытка влаги;

x – годовая сумма атмосферных осадков;

th- гиперболический тангенс.

По мнению Ольдекопа эту формулу лучше использовать отдельно к зимнему (ноябрь–апрель) и летнему (май–октябрь) полугодиям. В таком случае z_0 по данным Ольдекопа, принимает следующие значения:

- для зимнего полугодия

$$z_{0,з} = 96d_з,$$

- для летнего полугодия

$$z_{0,л} = 136d_л,$$

где $d_з$ и $d_л$ – средние значения недостатка насыщения влагой воздуха в миллиметрах зимнего и весеннего полугодий.

Плюсы:

Учитывает дефицит увлажнения, что более корректно отражает влияние испарения на сток, чем прямое вычитание испаряемости, как в формуле Мезенцева.

Относительно проста в применении.

Минусы:

Эмпирический характер, требующий определения коэффициента k .

Не учитывает другие факторы, влияющие на сток, кроме осадков и дефицита увлажнения.

Может давать значительные погрешности в условиях экстремальных климатических режимов.

Новые данные: Исследования в рамках проекта «Изменения речного стока в условиях глобального потепления» показывают, что формула Ольдекопа может быть адаптирована для учета изменений в антропогенных нагрузках на водосборы, что повышает точность прогнозирования стока в условиях меняющегося климата. Также, формула не учитывает влияние лесной подстилки, которая, по данным Б.Д. Зайцева (1949), может снижать испарение с поверхности почвы на 39-69%. Анализ чувствительности показывает, что параметр k имеет значительное влияние на результаты расчетов.

Формула Тюрка

Автор: Л. Тюрк

Описание: Формула Тюрка представляет собой эмпирическую зависимость для оценки годового стока, основанную на годовом количестве осадков и среднегодовой температуре воздуха. Формула имеет вид:

$$Y = X / (1 + (X / L)^2)$$

где: * Y - годовой сток * X - годовое количество осадков * L - эмпирический параметр, зависящий от температуры воздуха.

Так же эта формула может быть представлена в другом виде

$$E = X / \sqrt{0,9 + \frac{X^2}{(300 + 25T + 0,05T^3)^2}}, \quad (2.6)$$

где E-суммарное годовое испарение, мм/год; X-годовое количество осадков, мм/год; T-среднегодовая температура воздуха, 0С.

Плюсы:

Простота применения, требующая лишь данных об осадках и температуре.

Учитывает влияние температуры на испарение и, следовательно, на сток.

Минусы:

Эмпирический характер, требующий определения параметра L.

Не учитывает другие факторы, влияющие на сток, такие как испаряемость, рельеф, почвенный покров и др.

Может давать значительные погрешности при применении в условиях с большими колебаниями температуры.

Новые данные: Исследования, проведенные в Институте водных проблем РАН, демонстрируют, что формула Тюрка может быть улучшена путем интеграции данных о сезонных изменениях температуры и осадков, что позволяет более точно оценивать сток в условиях меняющегося климата. Формула не учитывает влияние лесной растительности на водопроницаемость почвы, что, согласно исследованиям, может существенно влиять на формирование стока. Анализ чувствительности подчеркивает важность точного определения параметра L для корректных результатов.

Формула Будыко

Автор: А.А. Будыко

Описание: Формула Будыко предназначена для расчета стока талых вод. Она учитывает интенсивность таяния снега и водопроницаемость почвы. Формула имеет вид:

$$Y = (M * P) / (1 + k * P)$$

где: * Y - сток талых вод * M - интенсивность таяния снега * P - водопроницаемость почвы * k - эмпирический коэффициент.

Плюсы:

Учитывает основные факторы, влияющие на сток талых вод: интенсивность таяния и водопроницаемость почвы.

Минусы:

Эмпирический характер, требующий определения коэффициента k .

Не учитывает другие факторы, влияющие на сток талых вод, такие как рельеф, наличие мерзлых грунтов и др.

Применима только для расчета стока талых вод.

Новые данные: Исследования в рамках проекта «Гидрология и климат» показали, что формула Будыко может быть дополнена данными о температурных колебаниях и их влиянии на скорость таяния снега, что улучшает точность расчетов. Исследования П.А. Урываева (1953) показали, что коэффициенты поверхностного стока на мерзлой почве могут достигать 0,92, а на талой - 0,01, что подчеркивает важность учета состояния почвы при расчете стока талых вод. Анализ чувствительности указывает на значительное влияние параметров M и P на результаты расчетов.

3.6. Формула Швайбера

Автор: Ю.А. Швайбер

Описание: Формула Швайбера предназначена для расчета стока в условиях горных территорий. Она учитывает количество осадков, высоту местности и средний уклон. Формула имеет вид:

$$Y = a * X * (H / 1000) * (\operatorname{tg}(\alpha))$$

где: * Y - годовой сток * X - годовое количество осадков * H - высота местности над уровнем моря * α - средний угол наклона поверхности * a - эмпирический коэффициент.

Плюсы:

Учитывает влияние высоты и уклона на сток, что важно для горных территорий.

Минусы:

Эмпирический характер, требующий определения коэффициента a .

Не учитывает другие факторы, влияющие на сток, такие как испаряемость, почвенный покров, растительность и др.

Применима только для горных территорий.

Новые данные: Исследования в рамках проекта «Гидрология горных регионов» установили, что формула Швайбера может быть адаптирована для учета изменений в растительности

и их влияния на сток, что позволяет более точно прогнозировать сток в горных условиях. Формула не учитывает влияние внутрипочвенного стока, который, как показывают исследования А.И. Субботина (1966), может достигать скорости до 20 м/сут. в лесу на склонах 3-4°. Анализ чувствительности показывает, что параметры N и α оказывают существенное влияние на результаты расчетов.

4. Сравнительный анализ формул

Рассмотренные эмпирические формулы, несмотря на различия в подходах и учитываемых факторах, имеют ряд общих черт и различий. Сравнительный анализ позволяет выделить их сильные и слабые стороны, а также определить наиболее подходящие области применения для каждой из них.

Сравнительная таблица характеристик формул для расчета испарения

Формула	Авторы	Основные факторы	Простота применения	Учет испарения	Учет типа почв	Учет рельефа	Применимость	Точность
Мезенцева	В.С. Мезенцев	Осадки, Испаряемость	Высокая	+	-	-	Широкое Распространение, различные регионы	Ограничена эмпирическим характером, требуется определения коэффициентов не учитывается

Продолжение таблицы 4.1.

Формула	Авторы	Основные факторы	Простота применения	Учет испарения	Учет типа почв	Учет рельефа	Применимость	Точность
Ольдекоп	Е.М. Ольдекоп	Осадки, дефицит увлажнения	Высокая	+	-	-	Различные регионы	Эмпирическая, требует определения коэффициента, не учитывает ряд факторов, погрешности в экстремальных климатических режимах.
Тюрк	Л. Тюрк	Осадки, температура	Высокая	+	-	-	Различные регионы	Эмпирическая, требует определение параметра, не учитывает ряд факторов, погрешности при больших колебаниях температуры.
Постников	Н.В. Постников	Осадки, испаряемость, тип почв	Средняя	+	+	-	Различные регионы	Учитывает тип почв, эмпирическая, требует определения коэффициента стока, не учитывает ряд факторов, зависимость коэффициента от влажности почвы.
Будыко	А.А. Будыко	Интенсивность таяния снега, водопроницаемость почвы	Средняя	-	+	-	Расчет стока талых вод	Учитывает основные факторы стока талых вод, эмпирическая, требует определения коэффициента, не учитывает ряд факторов стока талых вод, применима только для талых вод.
Швайбера	Ю.А. Швайбер	Осадки, высота местности, уклон	Средняя	-	-	+	Горные территории	Учитывает рельеф (высоту и уклон), эмпирическая, требует определения коэффициента не учитывает ряд факторов, применима для горных территорий.

Анализ по критериям:

Простота применения: Формулы Мезенцева, Ольдекопа и Тюрка отличаются наибольшей простотой применения, требуя минимального набора входных данных. Формулы Постникова, Будыко и Швайбера несколько сложнее из-за необходимости определения дополнительных параметров, таких как коэффициент стока, водопроницаемость почвы или уклон местности.

Учет факторов стока: Формулы различаются по набору учитываемых факторов. Формулы Мезенцева и Ольдекопа акцентируют внимание на климатических факторах (осадки и испарение), формула Тюрка – на температуре, формула Постникова – на типе почв, формула Будыко – на факторах, определяющих сток талых вод, а формула Швайбера – на рельефе. Ни одна из рассмотренных формул не является всеобъемлющей и не учитывает все факторы, влияющие на сток.

Область применения: Большинство формул (Мезенцева, Ольдекопа, Тюрка, Постникова) имеют широкую область применения и могут использоваться в различных регионах. Однако формула Швайбера специально разработана для горных территорий, а формула Будыко – для расчета стока талых вод.

Точность: Точность эмпирических формул ограничена их природой. Они лучше работают в условиях, близких к тем, для которых были получены эмпирические коэффициенты. Для повышения точности расчетов необходимо учитывать ограничения каждой формулы и, по возможности, использовать дополнительные данные и методы.

5. Общие преимущества и недостатки гидрологических формул

- В целом, гидрологические формулы, включая рассмотренные эмпирические модели, обладают как преимуществами, так и недостатками.

Преимущества:

- Количественная оценка: Формулы позволяют количественно оценивать гидрологические процессы, обеспечивая возможность численного анализа и прогнозирования.
- Прогнозирование: Они могут использоваться для прогнозирования будущих гидрологических событий, таких как наводнения, засухи и водообеспеченность.
- Планирование: Формулы необходимы для планирования и управления водными ресурсами, включая проектирование систем водоснабжения, ирригационных систем и сооружений для защиты от наводнений.
- Понимание: Методика помогает в понимании взаимосвязей между различными гидрологическими переменными.

- **Эффективность:** Математические модели могут быть эффективны для анализа больших наборов данных.
- **Практичность и простота (для эмпирических формул):** Многие эмпирические формулы просты в применении и требуют относительно небольшого объема входных данных, что делает их удобными для оперативных расчетов и регионов с ограниченной информацией.
- **Быстрая оценка (для эмпирических формул):** Эмпирические формулы позволяют быстро получить оценку величины стока и других гидрологических характеристик.
- **Основа для дальнейшего анализа (для эмпирических формул):** Результаты, полученные с помощью эмпирических формул, могут служить основой для более сложных гидрологических моделей и исследований.

Недостатки:

- **Упрощение:** Модели часто упрощают сложные природные процессы, что потенциально приводит к неточностям.
- **Неопределенность параметров:** Значения параметров, используемых в формулах, могут быть неопределенными, что приводит к неопределенности результатов.
- **Ограничения данных:** Точность моделей зависит от доступности надежных данных, которые не всегда доступны.
- **Региональная специфика:** Многие формулы калибруются для конкретных регионов и могут быть неприменимы к другим регионам.
- **Вычислительная сложность (для сложных моделей):** Некоторые модели могут быть вычислительно интенсивными и требовать специализированного программного обеспечения и знаний.
- **Эмпирический характер (для эмпирических формул):** Эмпирические формулы ограничены условиями, для которых они были разработаны, и могут давать значительные погрешности при экстраполяции на другие условия.
- **Ограниченный учет факторов (для эмпирических формул):** Эмпирические формулы часто учитывают лишь ограниченное число факторов, влияющих на сток, игнорируя другие важные процессы.
- **Неточность в экстремальных условиях (для эмпирических формул):** Эмпирические формулы могут быть менее точными при прогнозировании стока в экстремальных условиях (наводнения, засухи).
- **Отсутствие динамического представления (для эмпирических формул):** Эмпирические формулы, как правило, не отражают динамический характер гидрологических процессов и предназначены для оценки средних или интегральных характеристик стока.

5 Прогноз математического ожидания и коэффициента вариации

Для составления прогноза для исследуемых неоднородных рядов данных была определена максимальная неоднородность. Исходя из этого, был определен год перелома и каждый ряд поделен на два однородных периода, отличающиеся по стоку, температуре воздуха и количеству осадков.

По методике рекомендуется использовать формулу Тюрка для определения испарения, но она справедлива для южных широт и может давать неверные результаты для Центрально-Черноземного региона. В связи с этим были рассмотрены другие варианты расчетных формул для испарения и испаряемости, представленные в таблице 3.1

Таблица 5.1. Подбор расчетной формулы для выбора расчетного прогнозного коэффициента на примере р.Дон- г.Задонск (период зимней межени)

Река Дон г.Задонск период до 1970 года зимний период +7%												
Формула испарения		Xp	354		tmp, °C		-6.7	Gn		810		
	E ₀	E	K _{пр}	C _{пр}	m _{2пр}	m _{1п}	m _{1фак}	m ₂	C _{впр}	C _{в пр}	C _{вфакт}	δC _в
Тюрк	112	440	0.18	1.01	5.53	375	370	177	0.05	141021	0.3	-2847
Мезенцев	11	445	0.51	1.97	37112	192	189	177	0.07	0.1	0.3	-1410
Тюрк	1407	440	0.99	1.10	140929	375	370	177	0.05	0.05	0.3	-2847
Постников	112	34	0.91	1.10	119073	345	340	177	0.06	0.08	0.3	-2607
Ольдекоп			1.01	0.99	146768	383	377	177	0.05	0.05	0.3	-2906

Для бассейна рек Верхнего Дона для двух периодов используемые ряды минимального стока наилучший результат расчета испаряемости дали по формуле Мезенцева.

При прогнозе маловодного периода водности в исследуемом районе наилучший результат при расчете коэффициента вариации показали формулы Тюрка и Ольдекопа.

Эти формулы для расчета испарения дают более высокую погрешность для математического ожидания при прогнозе меженного периода (в среднем более $\delta m1=30\%$).

Формула Мезенцева дала наименьшую погрешность при оценке фактического и расчетного коэффициента вариации (в среднем менее $\delta m1=60\%$).

Так как изначально формула Тюрка была разработана для рек на юге Франции и севере Африки, то вполне закономерно, что расчет испаряемости для бассейна Верхнего Дона, особенно в зимний период дает худший по сравнению с другими методиками результат.

Формула Ольдекопа также дала наилучший результат при расчете коэффициента вариации минимального стока, ввиду того что она была разработана для расчетов годового стока.

Формула Мезенцева оказалась оптимальной для прогноза характеристик минимального стока, поскольку в методике за основу берутся климатические параметры (осадки и испарение), а также важным фактором является ее применимость для различных географических зон.

Для оценки методики были произведены прогнозы для двух периодов водности до 1970-го года и после, это связано со строительством гидротехнических сооружений в руслах рек, а также же для того чтобы отследить связь методик с климатическими периодами на минимальный сток. Наилучший результат при расчете испаряемости с бассейнов рек Верхнего Дона был отмечен для естественного периода до 1970 года, до строительства плотин и прудов в руслах рек.

Следует учесть, что для расчета прогнозных значений использовались формулы с такими климатическими параметрами как температура и осадки. Для полноценной оценки стока следует учесть такие параметры как температура почвы, водопроницаемость почвы и уклон местности.

При сравнении полученных результатов, важно отметить, что погрешности значений были меньше в первый период естественного гидрологического режима на реках.

На реках с естественным гидрологическим режимом лучше результаты расчета при прогнозе отмечены в период с 1970 года по настоящее время который характеризуется как период потепления.

Заключение

В данной магистерской диссертации была проведена оценка характеристик минимального стока рек бассейна Верхнего Дона и оценка влияния климатических параметров на изменение стока в период межени.

Первоначально был проведен сбор, анализ и обобщение данных гидрометрических и метеорологических наблюдений. Затем были изучены и применены методы приведения коротких рядов наблюдений к многолетнему периоду, произведена оценка неоднородности и нестационарности рядов гидрологических и метеонаблюдений, сделан расчет максимальных расходов весеннего половодья в створах гидрометрической сети с учетом неоднородности и нестационарности гидрологических рядов согласно действующим нормативным документам. Далее был проведен анализ влияния климатических и антропогенных факторов на основные характеристики минимального стока рек на примере гидрометрических постов сети Росгидромет, расположенных в бассейне Верхнего.

Автором сформулированы основные *результаты и выводы* исследования:

1. Статистическая проверка смоделированных рядов минимального стока исследуемых рек показала, что согласно критерию Фишера все ряды однородны, критерию Стьюдента ряды однородны по рекам Девица – с. Девица и Тихая Сосна – г. Алексеевка, в остальных рядах однородность нарушена; ряды минимального летнего стока по критерию Фишера однородны у всех рек, по критерию Стьюдента – у рек Сосна- г. Елец, Тихая Сосна- Алексеевка, в остальных рядах однородность нарушена; в рядах зимнего минимального стока – по критерию Фишера неоднородность наблюдается только в ряду р. Тихая Сосна – г. Алексеевка, а по критерию Стьюдента однородность отмечена в рядах Девица - Девица, Сосна-Елец, Тихая Сосна- Алексеевка; неоднородность присуща рядам стока рек Битюг-г. Бобров, Красивая Меча – г. Ефремов, Хопер-Бесплемяновский. Учитывая отсутствие устойчивого тренда неоднородности в рядах стока, можно считать нарушения случайными, а, следовательно, к рядам стока могут применяться статистические методы расчета гидрологических характеристик.

2. В многолетних изменениях минимального стока рек прослеживается положительная тенденция нарастания, особенно в минимальных расходах воды зимней межени. Расходы воды летней межени также увеличиваются, но изменения статистически незначимы. При этом в годовом стоке выраженных изменений не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии уменьшения или увеличения водных ресурсов.

3. На всех исследуемых реках Верхнего Дона установлено перераспределения стока по фазам водного режима и сезонам года: уменьшение весеннего стока (снижение стока снегового половодья), увеличение летне-осеннего стока и зимнего стока (увеличение стока межени). Сток дождевых паводков не носит выраженный характер колебаний и требует дальнейшего изучения.

4. Внутригодовое перераспределение стока показало генезис изменения абсолютных минимумов водности. Даты абсолютных минимумов летне-осенней и зимней межени сместились на более поздние сроки. Расчленение гидрографов показало тенденцию к смещению фаз гидрологического режима в сторону увеличения продолжительности зимней межени.

5. Приоритетная роль снегового питания в годовом цикле уступает место подземному питанию, что ведет к большей устойчивости водности рек в маловодный, зачастую дефицитный для водопотребителей период, и снижению гидроэкологических рисков водопользования.

6. Увеличение стока в маловодные периоды года при относительном постоянстве средних годовых расходов воды не может происходить без изменения количественных показателей весеннего половодья. В период с 2007 год по настоящее время на реках Донского бассейна наблюдается деградация половодья как фазы водного режима, наблюдаются аномалии которые проявляются как снижения продолжительности периода, а также в отдельные года была зафиксирована низкая водность.

7. Изменения характеристик минимального стока рек Донского бассейна одновременно проявляются в смещении сроков и продолжительности периода низкой водности. В настоящий момент практически на всех реках имеется тренд сдвига даты начала половодья и максимального расхода воды на более ранние сроки.

8. Исходя из высокой степени нагрузки на водные ресурсы Верхнего Дона, нужно принимать во внимание потенциальные экологические риски и для предотвращения их разрабатывать методики по более эффективному использованию водных ресурсов.

Для выполнения данной работы применялись методы статистического анализа, гидрологической аналогии, пространственной интерполяции, географического районирования.

Список использованных источников

1. Акимов Л.М. Пространственно-временные закономерности распределения климатических характеристик на территории Воронежской области /Л.М.Акимов// Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология.-2013.-№1.-с.192-198.
2. Акимов, Л. М. Применение спектрально-сингулярного подхода для разработки долгосрочного прогноза температуры воздуха в холодное полугодие / Л.М. Акимов, Т. Н. Задорожная // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. — Воронеж, 2015 .— № 1. - С. 14-19 .— 0,3 п.л.
3. Акимов, Л. М. Выявление циклических колебаний во временном ходе условий увлажнения. / Л.М. Акимов // Аридные экосистемы, 2013 — Москва: Товарищество научных изданий КМК, Том 19, номер 4 (57), 2013 декабрь — С. 59 - 63 - 0,5 п. л. - ISSN 1993-3916.
4. Акименко Т. А. Климатические изменения водности рек центра Русской равнины в конце XX века / Т.А.Акименко, В.М. Евстигнеев// Современные глобальные изменения природной среды. Т.1. М.: Научный мир, 2006. С. 382-389.
5. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / Под ред. Н. И. Коронкевича и И. С. Зайцевой. М.: Наука, 2003. 367 с.
6. Бабкин В.И. Многолетние колебания стока Волги, Оки, Дона, Днепра и методы его прогноза/ В.И.Бабкин // Известия Российской академии наук. Серия географическая. Академиздатцентр "Наука" РАН. 2008. №3. С.92 - 98.
7. Бабкин В.И. Современные и ожидаемые до 2015 г. водные ресурсы местного формирования Белгородской, Московской, Воронежской и Тамбовской областей/В.И.Бабкин // Метеорология и гидрология. 2008. №3. С.96 - 103.
8. Баранов В.А. Карты минимального стока рек Европейской территории СССР/В.А.Баранов, Л.Н.Попов //Труды ГГИ. 1966. Вып. 133. С.112 - 147.
9. Баскаков Т.Е. Зависимость стокообразования р. Дон от атмосферной циркуляции. - В кн: Географические аспекты изучения гидрологии и гидрохимии Азовского бассейна/ Т.Е. Баскаков//Л.: 1981. С. 16 - 22.
10. Бассейн Дона (Водосборы Непрядвы, Мокрой и Сухой Табол и правой стороны Дона до впадения р. Красивой Мечи. Исследования Лесоводственного отдела 1898 г.) // Труды экспедиции для исследования источников главнейших рек Европейской России. М. Высочайше утвержденного Товарищества И.Н. Кушнерев и Ко, 1904.с.184

11. Болгов М.В. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения/ М.В. Болгов, В.М. Мишон, Н.И. Сенцова//М.: Наука, 2005 г. 317 с.
12. Болгов М.В. Пороговые стохастические модели минимального стока /М.В. Болгов, И.А. Филиппова//Метеорология и гидрология-2006-№3.-с.88-94.
13. Бучик С.В.Формирование абсолютных минимумов стока летне-осенней межени в бассейне Верхнего Дона/ В.А.Дмитриева, С.В .Бучик // Водное хозяйство России. – 2019. – №6. – С. 35-46.
14. Быдин Ф.И. Зимний режим рек и методы его изучения. Исследование рек СССР/ Ф.И.Быдин// вып. V. Изд. Гос. гидрологического института. Л., 1933 г. 214 с.
15. Вершинина Л.К. Оценка потерь талых воды и прогнозы объема стока половодья /Л.К. Вершинина, О.И. Крестовский, И.Л. Калужный, К.К. Павлова//. Л.: Гидрометеиздат. 1985 г.
16. Владимиров А.В. Сток рек в маловодный период года/ А.В.Владимиров// Л.: Гидрометиздат, 1976 г. 279 с.
17. Владимиров А.В. Минимальный сток рек СССР/ А.В.Владимиров//. Л.: Гидрометиздат, 1970 г. 212 с.
18. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты: Учеб. для вузов/ А.М. Владимиров// Л.: Гидрометеиздат, - 1990. – 364 с.
19. Владимиров А.М. Сборник задач и упражнений по гидрологическим расчетам. – СПб/ А.М.Владимиров, В.С. Дружинин//.: Гидрометеиздат, 1992. – 208 с.
20. Вода России. Речные бассейны / Под ред. Черняева А.М//Екатеринбург: «АКВА-ПРЕСС», 2000 г. 536 с.
21. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. Шикломанова И.А. - СПб.: ГГИ, 2008 г., 600 с.
22. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока/ А.Н. Гельфан//М.: Наука, 2007., 276 с.
23. Георгиади А.Г. Изменение речного стока в бассейне реки Дон в эпохи глобального потепления климата / А.Г. Георгиади, И.П. Милюкова// Проблемы региональной экологии. 2006. №2. С.23 - 32.
24. Георгиади А.Г. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона / А.Г. Георгиади и др.//М. : Макс-Пресс, 2014. - 216 с..
25. Гире А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы/ А.А. Гире//Л.: Гидрометеиздат, 1971 г, 241 с.

26. Громова М.Н. Оценка выбросов минимального стока ЕТР/М.Н. Громова// Сборник трудов международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов 'Изменения климата и окружающая среда''- СПб: Изд. ''Гранд'', 2005.-с.177-183.
27. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, т 1. вып 3. Л.: Гидрометеиздат, 1986 г.
28. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, т 1. вып 3. Л.: Гидрометеиздат, 1986 г.
29. Государственный Водный Кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши т.2, вып.3, 1985.
30. Громова М.Н. Оценка выбросов минимального стока ЕТР/М.Н. Громова// Сборник трудов международной школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов 'Изменения климата и окружающая среда''- СПб: Изд. ''Гранд'', 2005.-с.177-183.
31. Дедкова А.П. Причины и механизмы пересыхания малых рек/ А.П. Дедкова, Г.П. Букатов// сб.статей под ред. Дедкова А.П., Бутакова//Казань.: ГранДан, 1996 г., 109 с.
32. Демин А.П. Современное состояние водохозяйственного комплекса России/ А.П.Демин// Сб. научных трудов Всероссийской конференции «Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения». Барнаул: ООО «Агентство рекламных технологий», 2009. С. 469-488.
33. Дегтярёв С.Д. Интегральная оценка водных ресурсов ЦЧО: монография / С.Д. Дегтярёв, В.Н. Золотарев, В.Н. Жердев//Воронеж, Изд-во ВВВАИУ, 1998. – 80 с.
34. Дегтярёв С.Д. Эколого-гидрологическая оценка состояния речных водосборов Воронежской области: монография/ С.Д. Дегтярёв, В.М. Смольянинов, С.В. Щербинина//Воронеж: Истоки, 2007. – 133 с.
35. Джамалов Р. Г. Изменения режима и величины подземного стока рек Европейской территории России под влиянием нестационарного климата/ Р.Г. Джамалов, Н.Л.Фролова, М.Б. Киреева, Т.И. Сафронова// Ресурсы подземных вод: современные проблемы изучения и использования: материалы между нар. научн. конфер. к 100-летию со дня рождения Б. И. Куделина. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 83-93.
36. Джамалов Р. Г. Влияние изменений климата на сток и водный режим рек ЕТР / Р.Г. Джамалов, Н.Л. Фролова, С.А. Агафонова, М.Б. Киреева, Т.И.Сафронова // Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России. Краснодар, 2010. С. 106-116.
37. Дмитриева В.А. Практическая гидрометрия: учеб. Пособие/ В.А. Дмитриева// Воронеж: ИПЦ Воронеж. гос. ун-та, 2008. – 200 с.

38. Дмитриева В.А. Гидрологическая изученность Воронежской области. Каталог водотоков. Воронеж/ В.А.Дмитриева//Издательско-полиграфический центр Воронежского университета, 2007 г. 172 с.
39. Дмитриева В.А. Географо-гидрологическая оценка водных ресурсов субъекта Российской Федерации в условиях меняющихся климата и хозяйственной деятельности (на примере Воронежской области)/ В.А. Дмитриева// Автореферат дис. на соиск. уч. степени д. г. н. Воронеж, 2012. 47 с.
40. Дмитриева В.А. Водные ресурсы Воронежской области в условиях меняющихся климата и хозяйственной деятельности. Воронеж/ В.А. Дмитриева//Издательский дом ВГУ, 2015 г. 192 с.
41. Дмитриева В.А. Водные ресурсы в бассейне верхнего и среднего Дона и современный климатический и хозяйственный период/ В.А.Дмитриева// Изд.РАН. Сер.: География.-2011.-№5.-с.75-85.
42. Дмитриева В.А. Внутригодовая и многолетняя динамика сезонного речного стока / В.А. Дмитриева // Аридные экосистемы, 2011. – №2. – С. 23-32.
43. Дмитриева В.А. Структура использования водных ресурсов в Воронежской области / В.А. Дмитриева // Водное хозяйство России. – 2010. – №5. – С. 28 – 40.
44. Дмитриева В.А. Гидрография рек Липецкой области. Каталог водотоков/ В.А. Дмитриева, Е.С. Илатовская// Липецк: Б.И. 2010. - 149 с.
45. В.А. Дмитриева. Изменение водных ресурсов Центрально-Черноземных областей / В.А. Дмитриева // Водные ресурсы.– 1992. – № 4. – С. 137–140.
46. Дмитриева В.А. Генезис максимумов водности рек и изменчивость водного режима в современный климатический период / В.А. Дмитриева, С.В. Бучик // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. – №5. – С. 50-62.
47. Дмитриева, В.А. Гидрологическая изученность Воронежской области: каталог водотоков / В.А. Дмитриева. – Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2008. – 225 с.
48. Дмитриева, В.А. Проблема охраны малых водотоков у условиях интенсивного водопользования / Дмитриева В.А., Нефедова Е.Г. // Экология речных бассейнов: Тр. VIII междун. науч.-практ. конф., 13-16 сентября 2016 г. – Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2016 б. – С. 331-335.
49. Дмитриева В.А. Вероятность нарушения гидроэкологической безопасности в бассейне реки Усмань/ В.А.Дмитриева, А.И. Чеснокова//V-ая международная научно-практическая конференция “Эколого-географические исследования в речных бассейнах”, г.Воронеж, 5-7 октября 2018г.

50. Дмитриева В.А. Контрасты половодья в бассейне Верхнего Дона /В.А.Дмитриева, А.И.Сушков// Международная научно-практическая конференция "Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы, 3-5 октября, 2019г.
51. Доклад о состоянии окружающей среды на территории Воронежской области в 2009 году / Департамент природных ресурсов и экологии Воронежской области – Воронеж, 2010. – 92 с.
52. Доклад о состоянии окружающей среды на территории Воронежской области в 2015 году / Департамент природных ресурсов и экологии Воронежской области. – Ижевск: Изд-во ООО «Принт-2», 2016. – 130 с.
53. Евстигнеев В. М. Речной сток и гидрологические расчеты/ В.М.Евстигнеев//М.: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
54. Евстигнеев В.М. Географические закономерности межгодовых колебаний речного стока/ В.М.Евстигнеев, Т.А. Акименко, Л.С. Евсеева // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. Вып. 1. М.: МГУ, 1999 С. 95-118
55. Евстигнеев В. М.. Водный режим рек СССР (карта для высшей школы масштаба 1:8 000 000)/ В.М.Евстигнеев, А.А.Зайцев, Т.Г. Сваткова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1990. № 1. С. 10-16.
56. Жук В. А. Регрессионный анализ связи годового стока с метеорологическими факторами/ В.А. Жук, Н.Л.Фролова // Оценка ресурсов и качества поверхностных вод. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 31-33.
57. Карта растительности. -М.: ГУГК, 1990. Масштаб 1:4000000
58. Карта растительности. -М.: ГУГК, 1990. Масштаб 1:4000000
59. Карасев А.И. Теория вероятностей и математическая статистика/А.И.Карасев//Москва, Статистика ,1979.
60. Киреева М. Б. Бессточные периоды на реках бассейна Дона/ М.Б. Киреева, Н.Л. Фролова // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 4, С. 47-54.
61. Киреева М. Б. Современные изменения водного режима рек бассейна Дона/ М.Б.Киреева, Н.Л.Фролова// Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление: сборник трудов первой открытой конференции Научно- образовательного центра. М., 2011. С. 98-113.
62. Киреева М. Явления отсутствия стока на реках бассейна р. Дон в условиях изменения климата/ М.Б. Киреева, Н.Л. Фролова // Ресурсы подземных вод: современные проблемы изучения и использования: материалы междунар. научн. конфер. к 100-летию со дня рождения Б. И. Куделина. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 386-391

63. Киреева М.Б. Современные изменения водного режима рек бассейна Дона/ М.Б.Киреева, Н.Л. Фролова // Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление: сборник трудов первой открытой конференции Научно- образовательного центра. М., 2011. С. 98-113.
64. Кислов А. В. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-европейской равнины в условиях потепления XXI век/ А.В.Кислов, В.М.Евстигнеев, С.М. Малхазова, Н.Н. Соколина, Г.В. Суркова, П.А. Торопов, А.В. Чернышев А.Н. Чумаченко// М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
65. Коронкевич, Н.И. Негативные гидроэкологические ситуации / Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева, Л.М. Китаев // Изв. РАН. Серия географ. – 1995. – №1. – С. 43-53.
66. Коваленко В.В. Частично инфинитивная гидрология/ В.В.Коваленко// Спб: Издательство РГГМУ, 2007.230с.
67. Коренева И. Б. Об оценке минимального экологически достаточного стока воды в реках/ И.Б.Коренева, А.В. Христофоров // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1993. № 1. С. 77-83.
68. Коронкевич Н. И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения/ Н.И. Коронкевич//М.: Наука, 1990. 205 с.
69. Крицкий С.Н. Расчеты речного стока/ С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель// ОНТИГосстройиздат, 1934. - 259 с.
70. Куделин Б.И. Естественные ресурсы подземных вод Центрально-Черноземного района и методика их картирования/ Б.И. Куделин, З.А. Коробейникова, Н.А. Лебедева//М.: Издательство Московского университета, 1963 г. 147 с.
71. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод/ Б.И. Куделин//. М.: Издательство Московского университета, 1966 г. 345 с.
72. Курдов А.Г. Минимальный сток рек (основные закономерности формирования и методы расчета)/ А.Г. Курдов// Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. 1970. 302 с.
73. Курдов, А.Г. Родники Воронежской области: формирование, экология, охрана/ А.Г.Курдов//Воронеж: Издательство государственного университета, 2000.- 128 с.
74. Курдов, А.Г. Водные ресурсы Воронежской области / А.Г. Курдов// Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1995. – 224 с.
75. Красов В.Д. Оценка антропогенного изменения гидрологических характеристик на основе модификации последовательностей речного стока с внутригодовым распределением / В.Д. Красов // Вестн. Воронеж. Госуниверситета. Сер. география. Геоэкология. – 2011.-№1.- С.57-69
76. Красов В.Д. Стратегия управления водными ресурсами в условиях антропогенных изменений речного стока/В.Д. Красов// Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология.- 2009. - №1. – С. 13-22.

77. Климатическая доктрина Российской Федерации. Правительство Российской Федерации, 2009.
78. Лурье П.М. Влияние изменений климата на гидрологический режим Р-Дон в начале XXI столетия/ П.М. Лурье, В.Д. Панов// Метеорология и гидрология. 1999.№4.С.90-100.
79. Лурье П.М. Река Дон: гидрография и режим стока / Лурье П.М., Панов В.Д//Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2018. – 592 с.
80. Магрицкий Д.В.Речной сток и гидрологические расчеты: практические работы с выполнением при помощи компьютерных программ/ Д.В. Магрицкий //Москва.: Изд-во Триумф, 2014.-184с.
81. Мишон В.М. Река Воронеж и ее бассейн: ресурсы и вводно- экологические проблемы/ В.М. Мишон//Издательство Воронежского государственного университета, 2000 г., 296 с.
82. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным/ Гос. учр-е «Гос. гидрол. ин-т».- СПб.: Нестор-История, 2010.-162 с.
83. Норватов А.М. Минимальный сток малых рек Европейской территории СССР/ А.М. Норватов //Труды ГГИ. вып.52, Л.: Гидрометиздат, 1956 г.,64 с.
84. Норватов А.М. Долгосрочный фоновый прогноз водности летней межени рек лесостепной зоны (на примере рек бассейнов Волги и Дона/ А.М. Норватов, Л.К. Ремизова, Н.П. Королева //Труды ГГИ. Л.: Гидрометиздат, вып.75, 1956 г., 95 с.
85. Оценочный доклад об изменениях климата и его последствиях на территории Российской Федерации, 2008 г.
86. О стратегии социально-экономического развития Воронежской области на долгосрочную перспективу: Закон Воронежской области. – Принят областной Думой 23 июня 2010 года. – 438 с.
87. Плана мероприятий по реализации Стратегии экологической безопасности России, 2019г.
88. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. т 7.Л.: Гидрометеиздат, 1964 г.
89. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики, т 1.Л.: Гидрометеиздат, 1967 г.
90. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики, т 12. вып 2.Л.: Гидрометеиздат, 1967 г.
91. Сенцова Н.И.Статистические оценки гидрометеорологических характеристик в бассейне Дона в нестационарных условиях/ Н.И. Сенцова//Москва. Институт водных проблем РАН.
92. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации/ А.В. Сикан// Российский государственный университет (РГГМУ), 2007.

93. 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.
94. Соколов А.А. Влияние озерного регулирования на величину минимального стока рек/А.А. Соколов// Труды ГГИ.- Л. Гидрометеиздат, 1954.-Вып. 43 (97).-С.175-182.
95. Смольянинов, В.М. Комплексная мелиорация и орошение земель в Центрально-Черноземном регионе: состояние, условия развития / В.М. Смольянинов, П.П. Стародубцев. – Воронеж: Истоки, 2011. – 179 с.
96. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Госстрой России. 2003 г. 80 с.
97. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна р. Дон. Екатеринбург: ФГУП Рос НИИВХ, 2011 г. 228 с. Электронное издание.
98. Стратегии экологической безопасности России до 2025 г, 2017г.
99. Фашевский, Б.В. Экологическое обоснование допустимой степени регулирования речного стока. – Мн.: БелНИИНТИ, 1989. – 160 с.
100. Фролова Н.Л. Антропогенные изменения речного стока/Н.Л.Фролова //Москва, Юрайт, 2020.С-116.
101. Филиппова И.А. Минимальный сток рек Европейской территории России и его оценка в условиях изменения климата/ И.А. Филиппова// ФГБУ Институт Водных проблем РАН, Москва, 2014 г.
102. Христофоров А. В. Надежность расчетов речного стока/ А.В.Христофоров//М.: Изд-во МГУ, 1993. 166 с.
103. Христофоров А. В. Теория вероятностей и математическая статистика/ А.В.Христофоров// М.: Изд-во МГУ, 1988. 131 с.
104. Чеботарев А.В. Гидрологический словарь/ А.В.Чеботарев// Л.: Гидрометеиздат, 1976 г., 247 с.
105. Шевелев М.Э. Метод расчет обеспеченных минимумов речного стока/М.Э.Шевелев//Метеорология и гидрология,1937.-№8.-с.39-44.
106. Шикломанов И.А. Исследование водных ресурсов суши: Итоги проблемы перспективы/ И.А. Шикломанов// Ленинград Гидрометеиздат,1988.
107. Шикломанов И.А. Водные ресурсы России и их использование/ И.А. Шикломанов// Санкт-Петербург,2008.

108. Чеснокова А.И. Сценарная оценка стока бассейна Верхнего Дона на примере р.Дон-Лиски/ А.И. Чеснокова//Научно-практическая конференция "Актуальные проблемы гидро-геологических, инженерно-геологических и геоэкологических исследований", Воронежский государственный университет, Воронеж 2016г.
109. Чеснокова, А. И. Вероятностная оценка стока рек Донского бассейна/ А. И. Чеснокова // Материалы конференции "Ломоносов 2019": Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Московский государственный университет, географический факультет. - Москва, 2019. – Электронный ресурс. - ISBN 978-5-317-06100-5.
110. Ясинский С.В. Влияние региональных колебаний климата и хозяйственной деятельности на изменения гидрологического режима водосборов и стока малых рек/С.В.Ясинский, Е.А. Кашутина // Водные ресурсы. 2010.
111. Ясинский С.В. Пространственные и временные закономерности изменения весеннего и речного стока на Русской равнине/С.В.Ясинский, Е.А. Кашутина // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 5. С.71 - 81.
112. Dzhamaalov R. G. Climate- Induced Changes in Groundwater Runoff in Don Basin / R.G. Dzhamaalov, N.L. Frolova ,M.B .Kireeva, T.L. Safronova/// Water Resources. 2010. Vol. 37. No. 5. P. 733-742.
113. Beven K.Rainfall-Runoff Modelling/ K.Beven|// The Primer.Lancaster University,UK. Wiley-Blackwell, Ltd,2012-472 p.
114. Ishihara T. A study on the variation of low flow/ T. Ishihara T, E.A. Takage//''Bull. Disaster Prevent. Res.Inst'',1965,№ 2, p.75-98.
115. Kireeva M. Low flow on rivers of European part of Russia under the impact of climate change/M. Kireeva , E. Rets // 32nd International Geographical Congress. Book of Abstracts. P. 471.
116. Lam, David C L. Potential Climat Effects on Great Lakes Hydrodinam- ics ana Water Quality/ David C.LL. am, William M. Schertzer//New York, ASCE,2001-586 p.
117. Masnavi, M.R. Restoration and Reclamation of the River Valleys' Landscape Structure for Urban Sustainability using FAHP Process, the Case of Northern Tehran / M.R. Masnavi, H. Tasa, M. Ghobadi, M.R. FarzadBehtash, S. NeginTaji // International Journal of Environmental Research. – Vol. 10. – Issue 1. – 2016. – pp. 193-202.
118. Fausch, K.D. Multiple stressors in north temperate streams: lessons from linked forest-stream ecosystems in northern Japan / K.D. Fausch, C.V. Baxter, M. Murakami // Freshwater Biology. – Vol. 55. – 2010. – pp. 120-134.

119. Wrona, F.J. Cumulative impacts within the northern river basins / F.J. Wrona, W.D. Gummer, K.J. Cash, K. Crutchfield // Northern River Basins Study Synthesis Report No. 11. – Northern River Basins Study, Edmonton, Alberta. – 1996. – 102 p.
120. Сайт Центра регистра и кадастра <http://waterinfo.ru>
121. Сайт Донского бассейнового водного управления <http://www.donbvu.ru>.
122. Сайт исследовательской группы Университета Восточной Англии <http://www.cru.uea.ac.uk>.

Приложение А. Хронологические и интегральные графики минимальных расходов воды

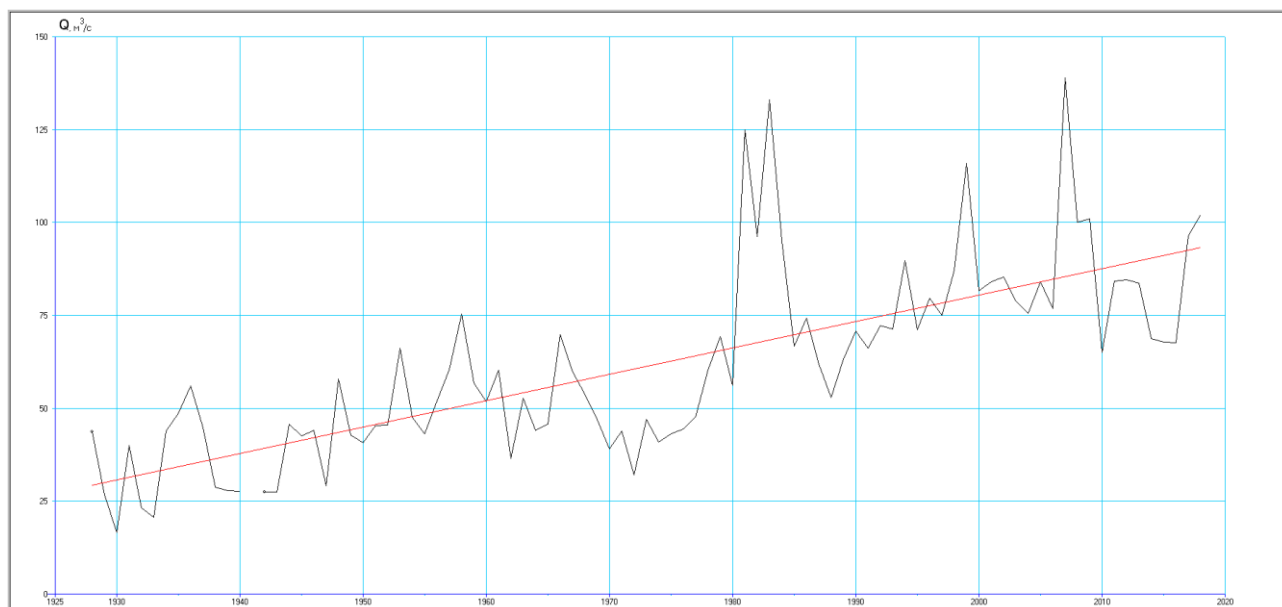


Рисунок А.1 – Хронологический график минимальных расходов воды зимний период
(р. Дон – г. Задонск)

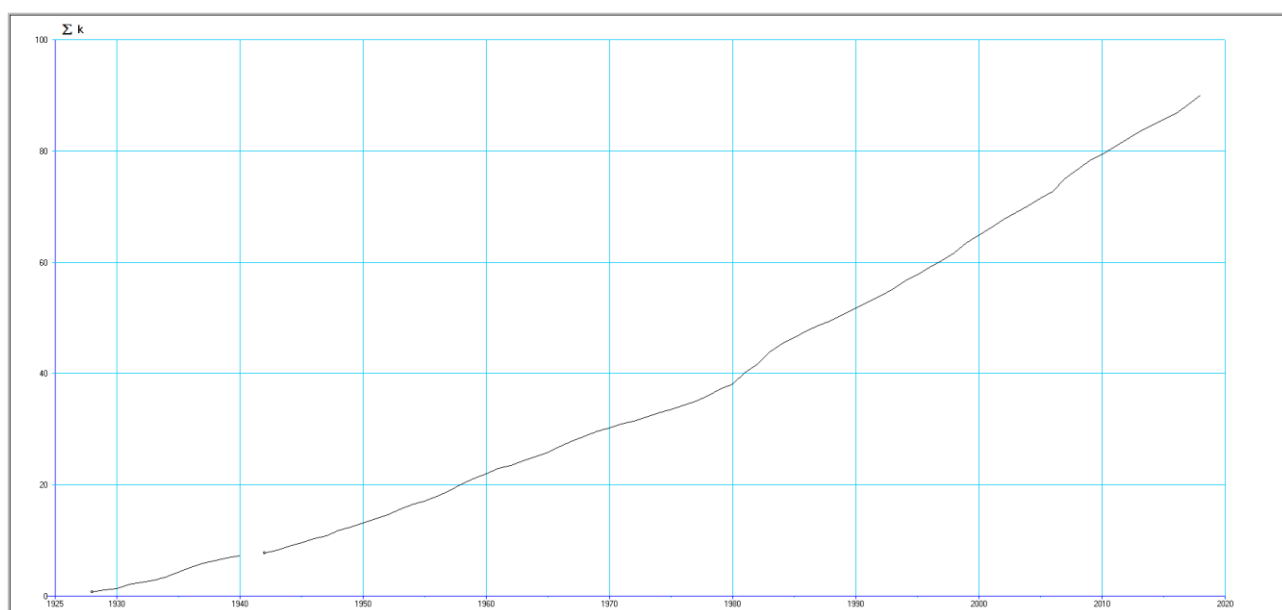


Рисунок А.2 – Интегральный график минимальных расходов воды
(р. Дон – г. Задонск) зимний период

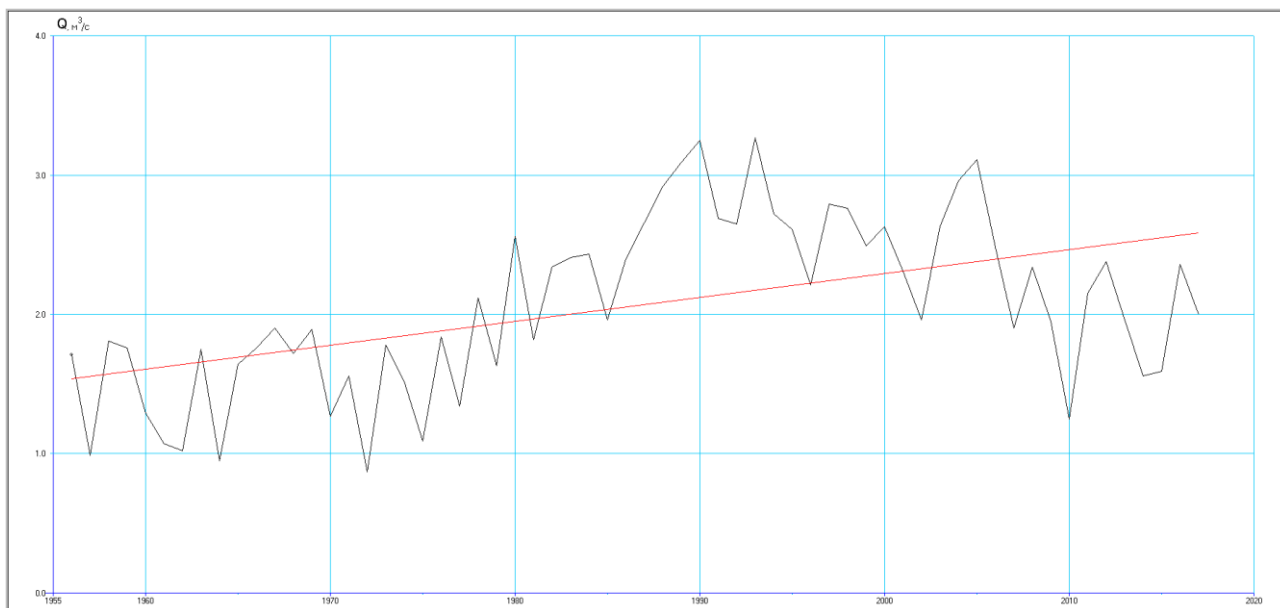


Рисунок А.3 – Хронологический график минимальных расходов воды
(р. Девица – с. Девица) за летне-осенний период

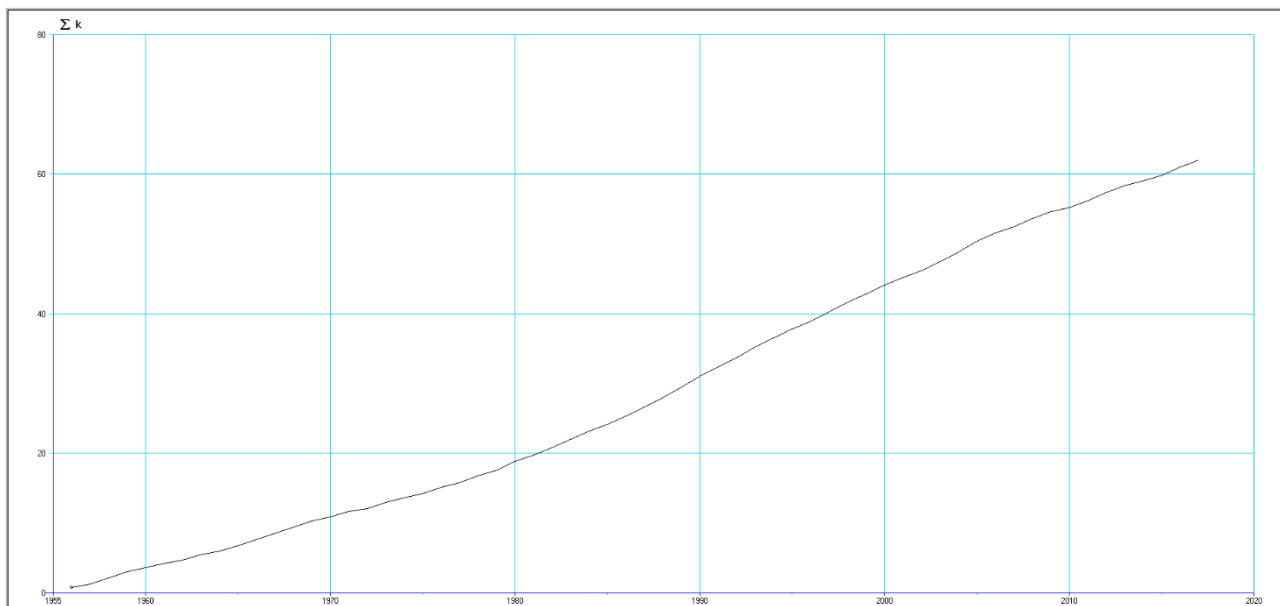


Рисунок А.4 – Интегральный график максимальных расходов воды
(р. Девица – с. Девица) за летне-осенний период

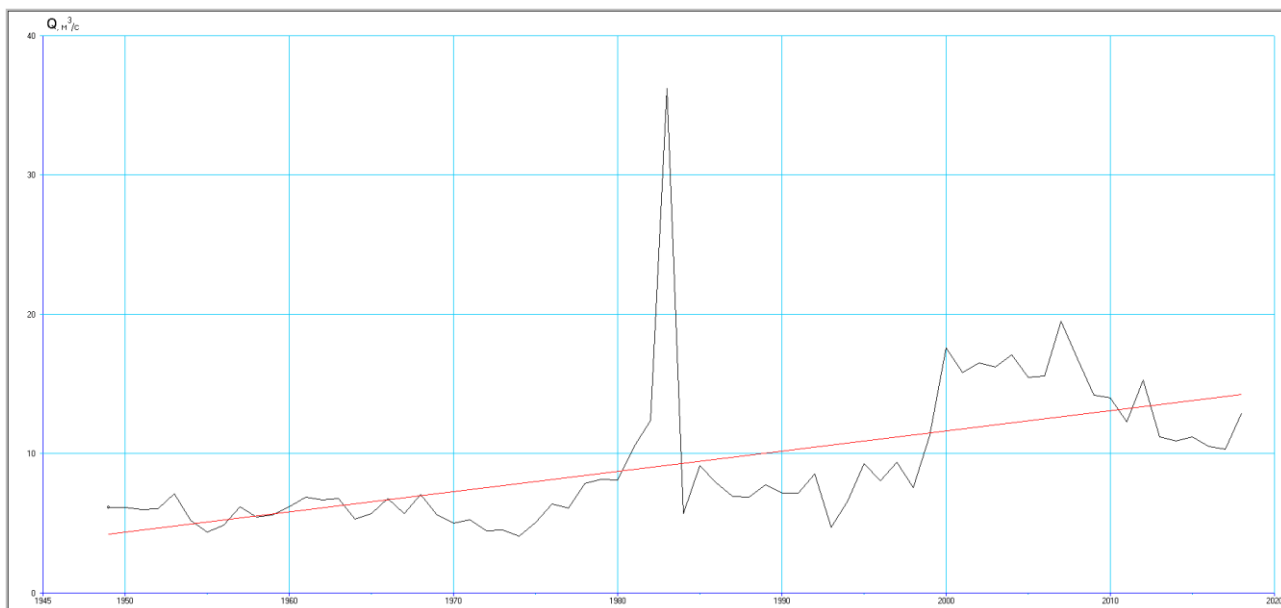


Рисунок А.7 – Хронологический график максимальных расходов воды зимний период
(р. Красивая Меча – г. Ефремов)

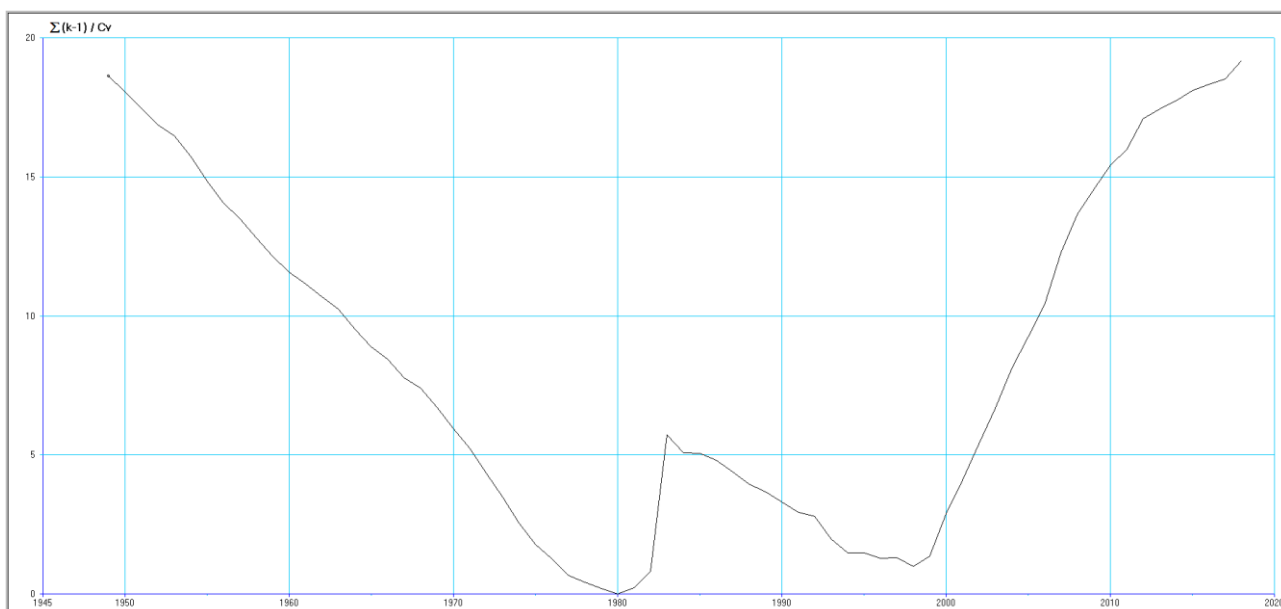


Рисунок А.8 – Разностаная интегральная кривая максимальных расходов воды зимний период (р. Красивая Меча – г. Ефремов)

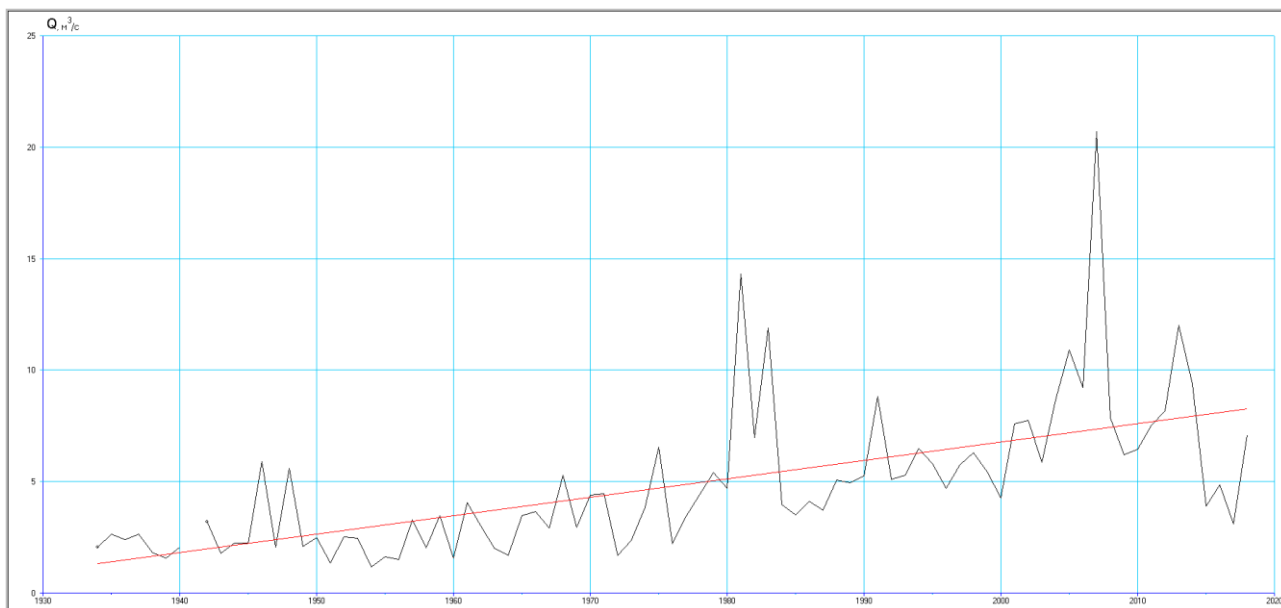


Рисунок А.9 – Хронологический график минимальных расходов воды за зимний период
(р. Битюг– г. Бобров)

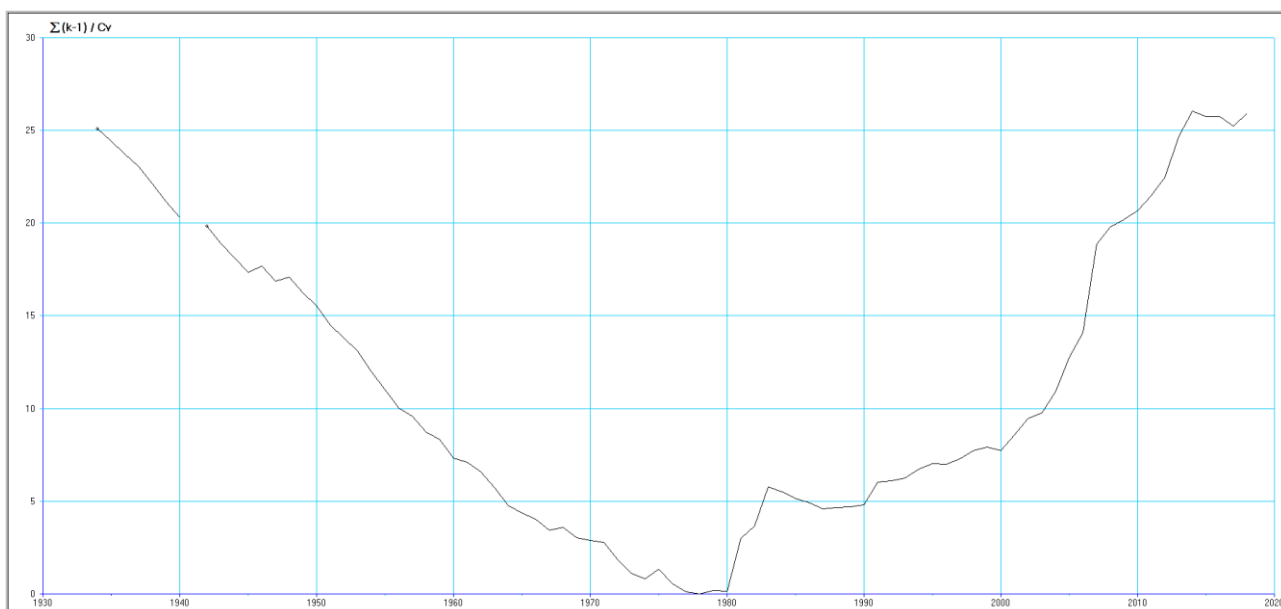


Рисунок А.10 – Интегральный график расходов воды минимальных расходов воды за зимний период
(р. Битюг– г. Бобров)

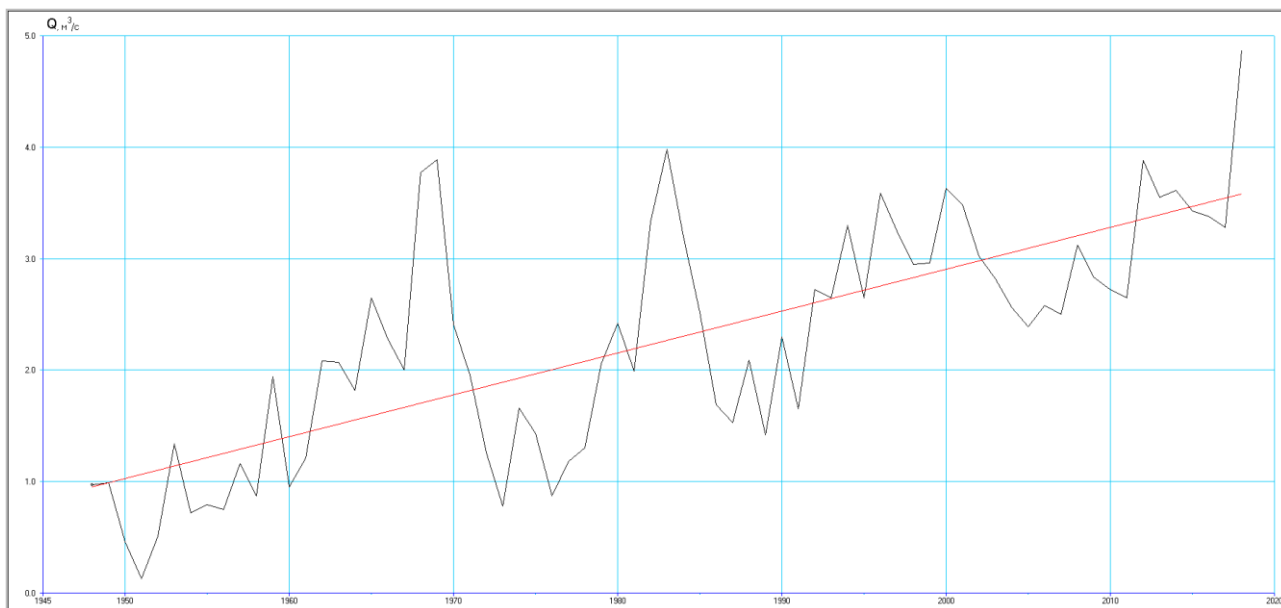


Рисунок А.9 – Хронологический график минимальных расходов воды за зимний период
(р. Тихая Сосна– г. Алексеевка)

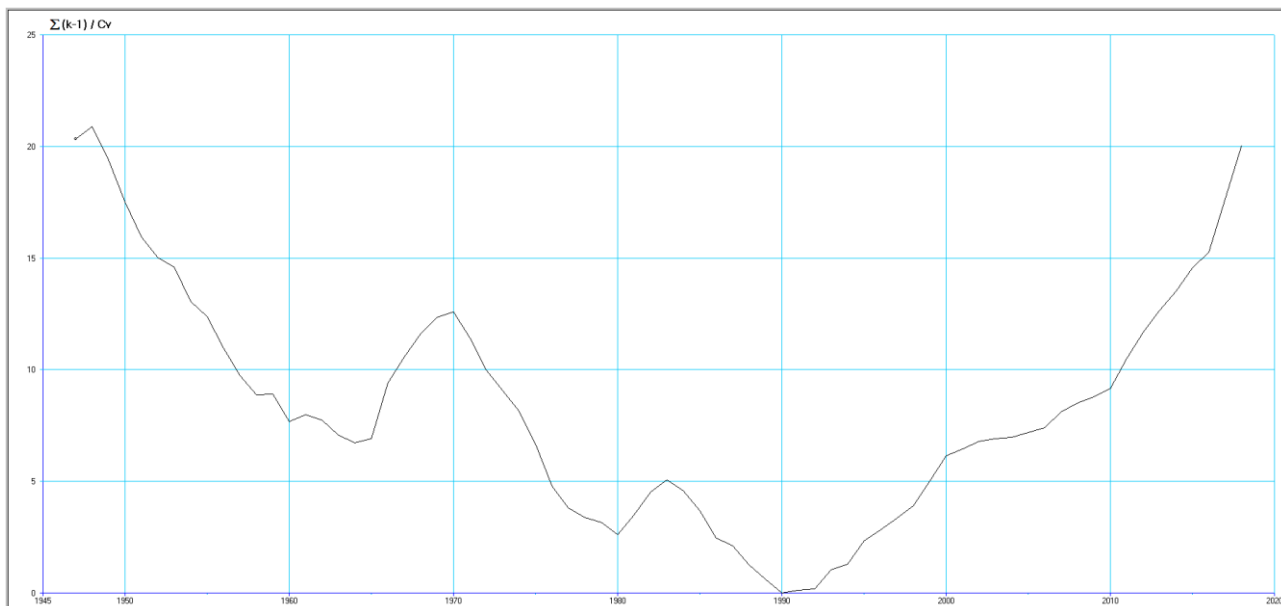


Рисунок А.10 – Интегральный график расходов воды минимальных расходов воды за
зимний период
(р. Тихая Сосна– г. Алексеевка)

Кривые обеспеченности

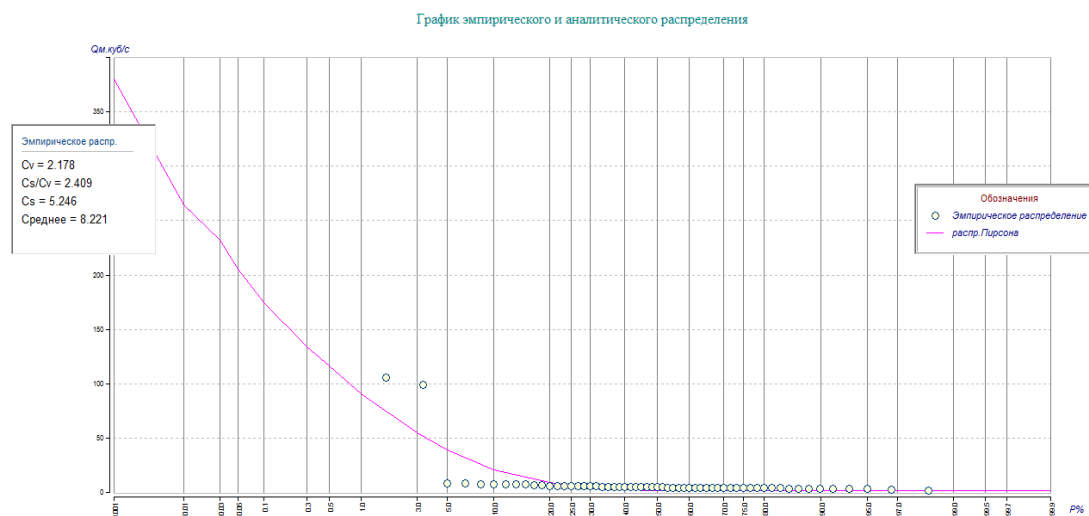


Рисунок Б.1.Кривая обеспеченности среднегодового расхода воды р.Девица- с.Девица

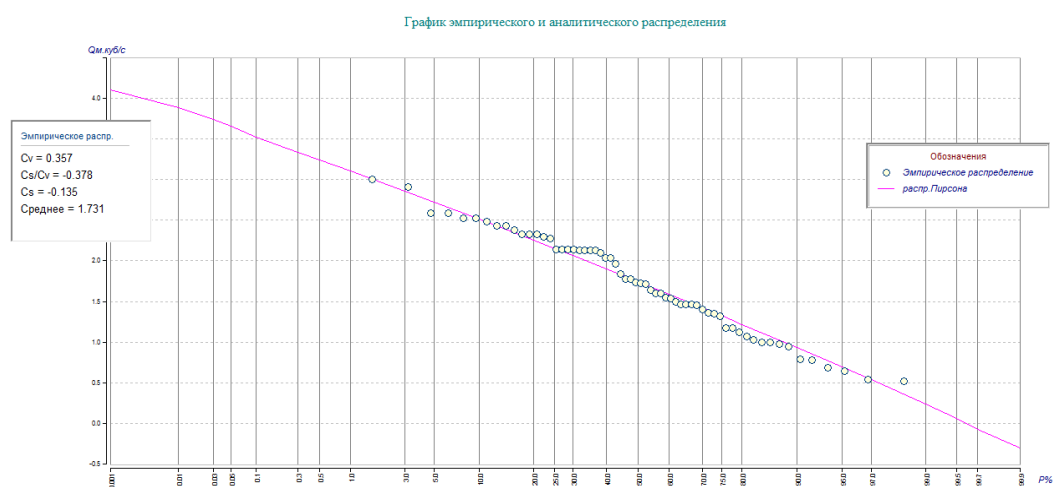


Рисунок Б.2.Кривая обеспеченности наименьшего летнего расхода воды р.Девица- с.Девица

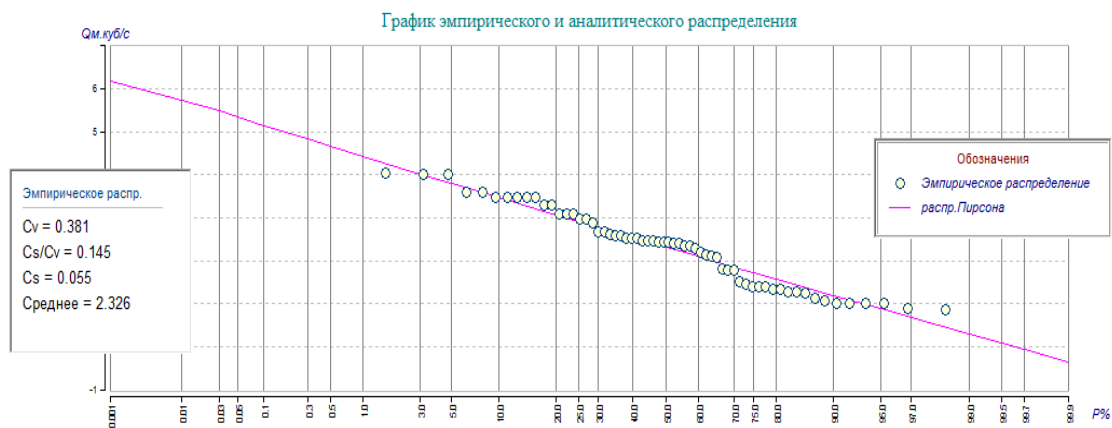


Рисунок Б.3.Кривая обеспеченности наименьшего зимнего расхода воды р.Девица- с.Девица

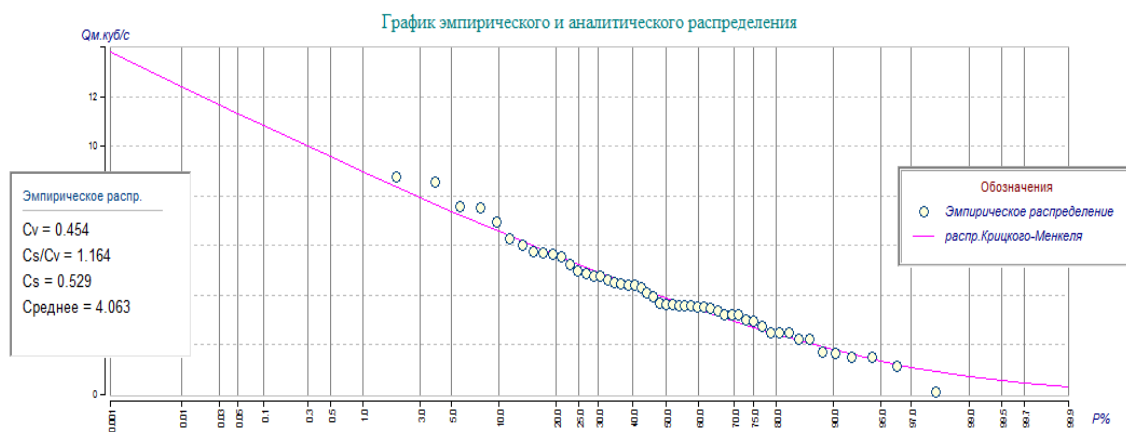


Рисунок Б.4.Кривая обеспеченности наименьшего летнего расхода воды р.Битюг- г.Бобров

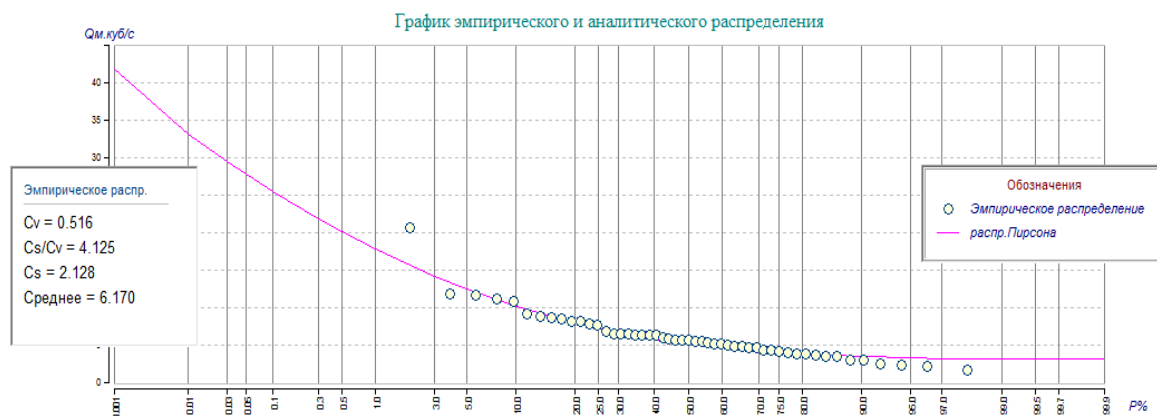


Рисунок .5.Кривая обеспеченности наименьшего зимнего расхода воды р.Битюг- г.Бобров

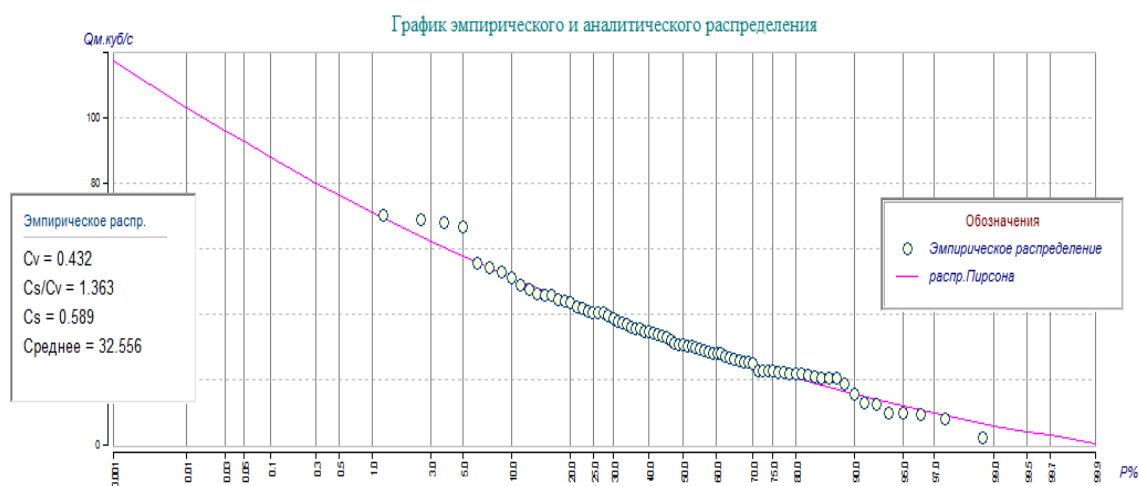


Рисунок Б.6.Кривая обеспеченности наименьшего летнего расхода воды р.Хопер- х. Бесплемяновский

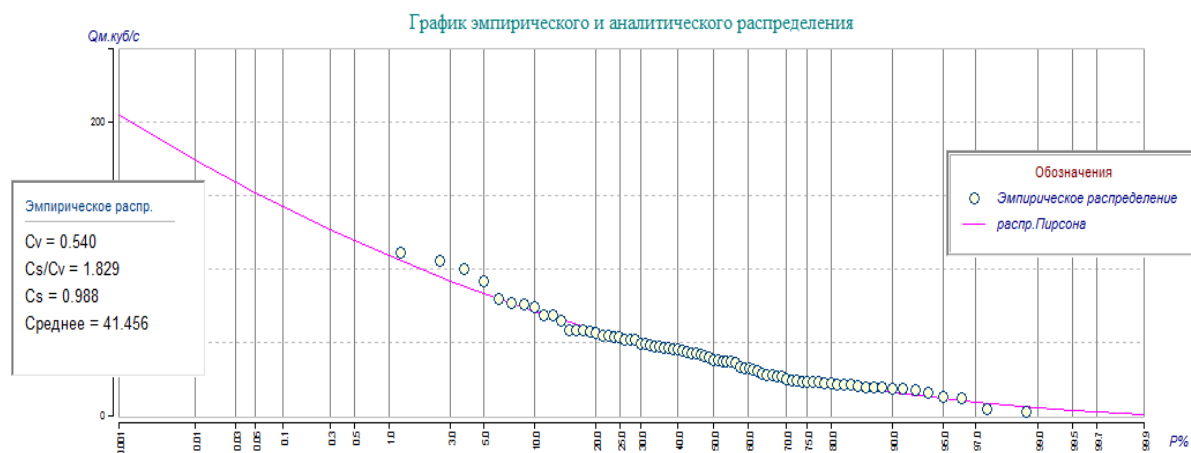


Рисунок Б.7.Кривая обеспеченности наименьшего зимнего расхода воды р.Хопер- х. Бес-
 племянновский

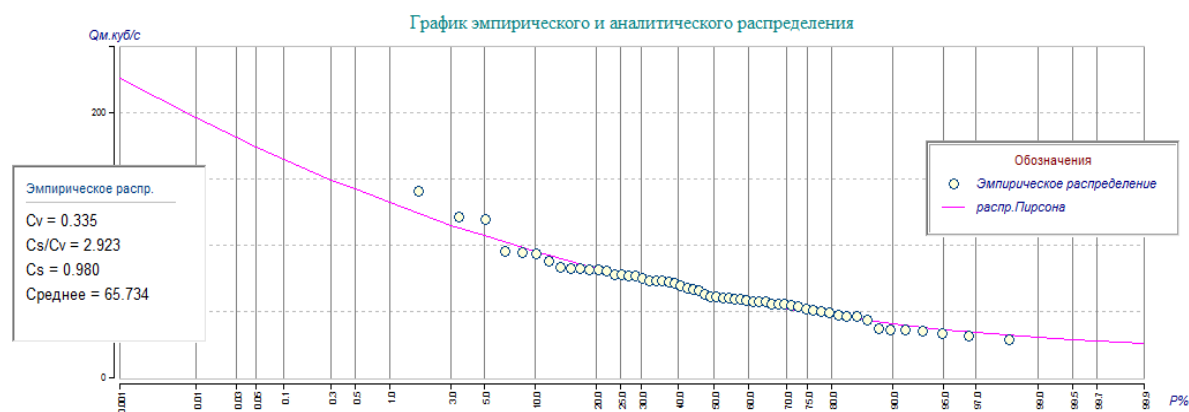


Рисунок Б.8.Кривая обеспеченности среднегодового расхода воды р. Хопер- х. Бесплемяннов-
 ский

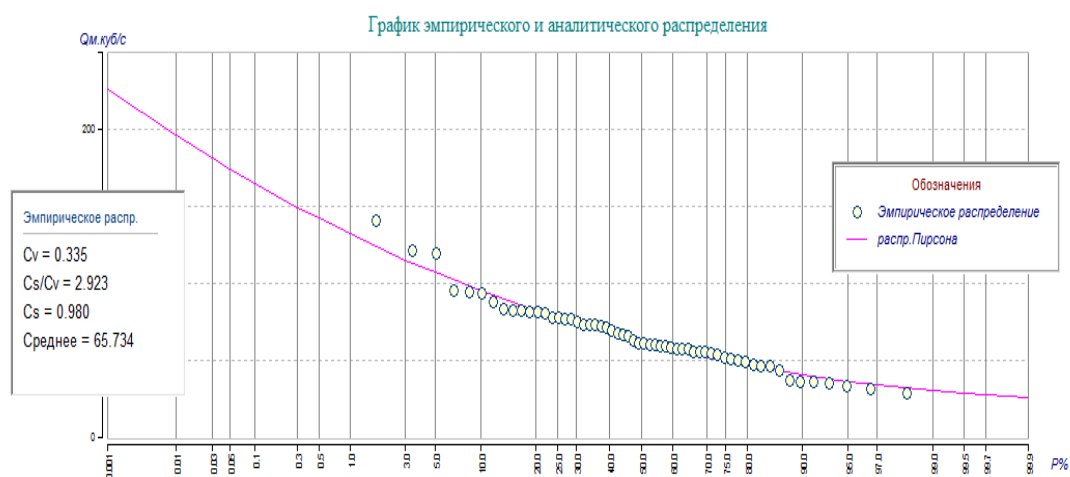


Рисунок Б.9.Кривая обеспеченности среднегодового расхода воды р.Сосна- г. Елец

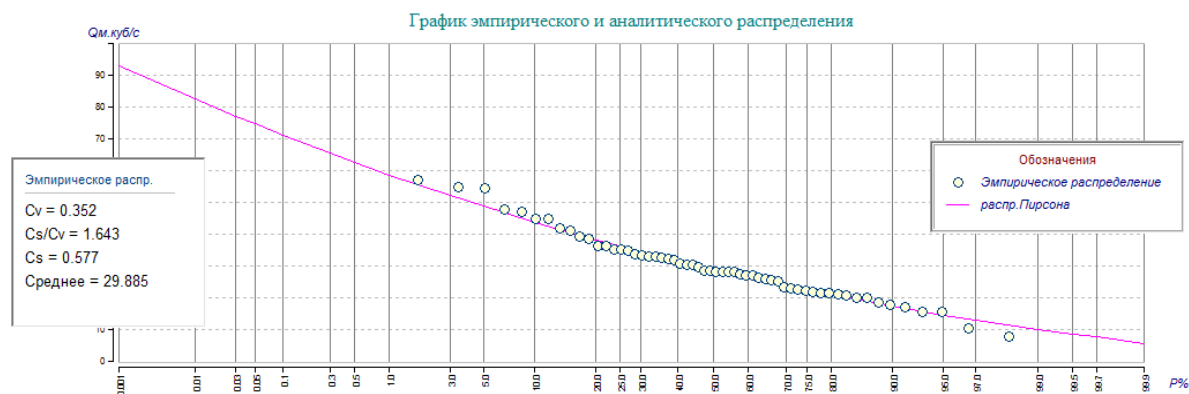


Рисунок Б.10.Кривая обеспеченности наименьшего зимнего расхода воды р.Сосна- г. Елец

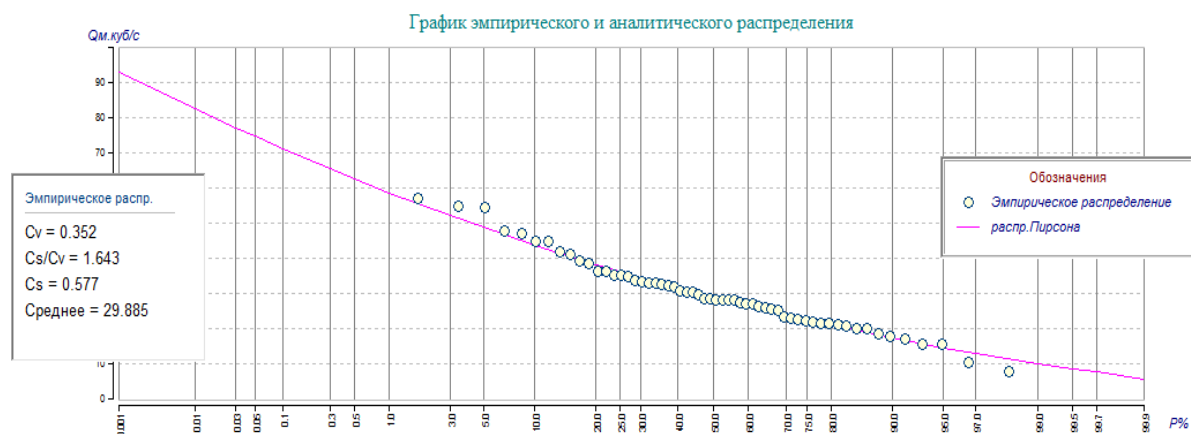


Рисунок Б.11.Кривая обеспеченности наименьшего летнего расхода воды р.Сосна- г. Елец

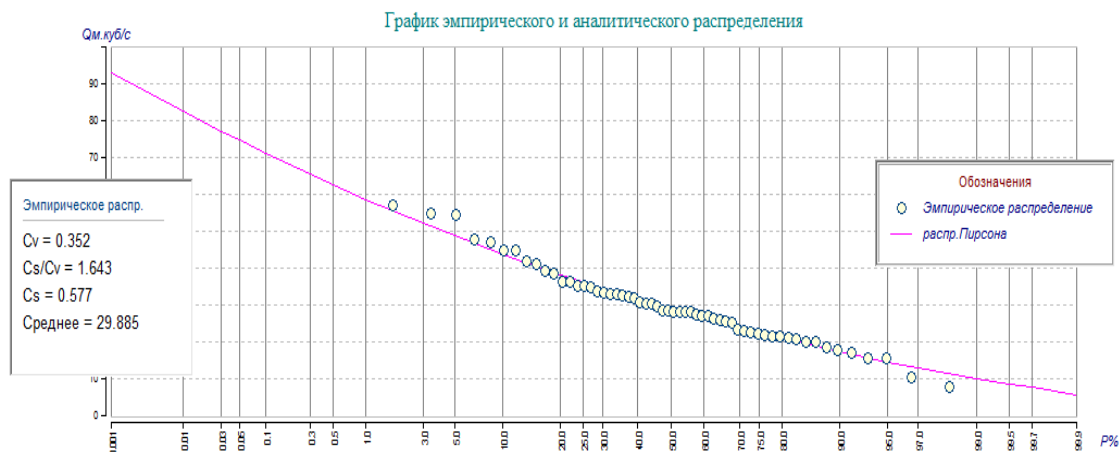


Рисунок Б.12.Кривая обеспеченности среднегодового расхода воды р.Красивая Меча- г. Ефремов

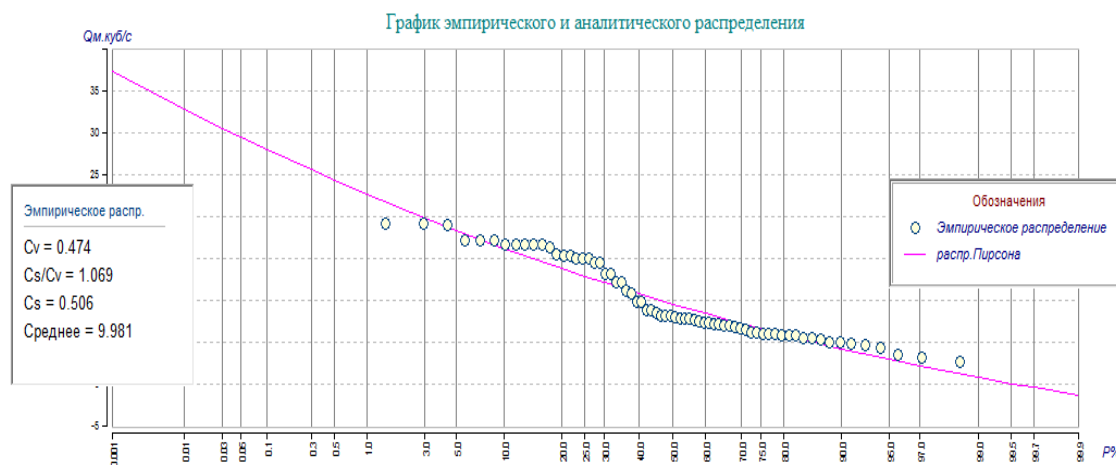


Рисунок Б.13.Кривая обеспеченности наименьшего летнего расхода воды р.Красивая Меча- г. Ефремов

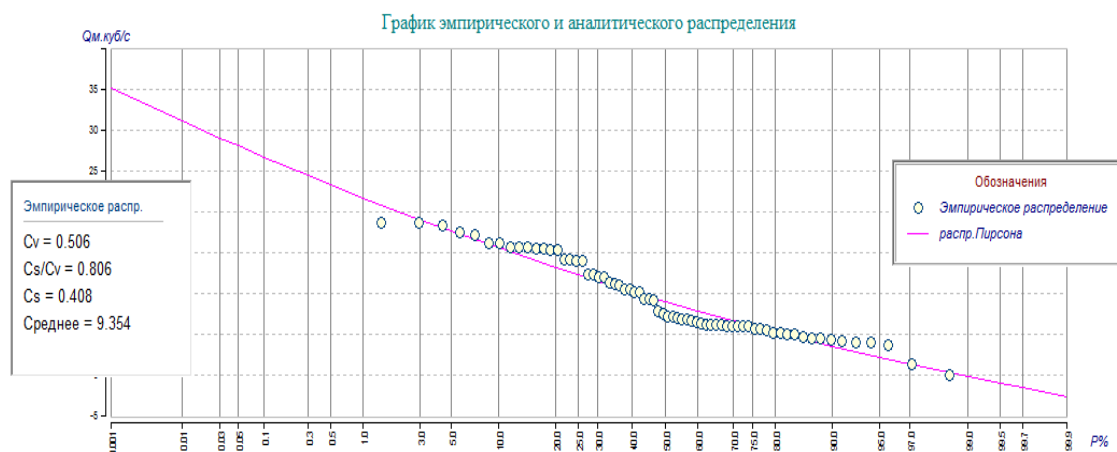


Рисунок Б.14.Кривая обеспеченности наименьшего зимнего расхода воды р.Красивая Меча- г. Ефремов

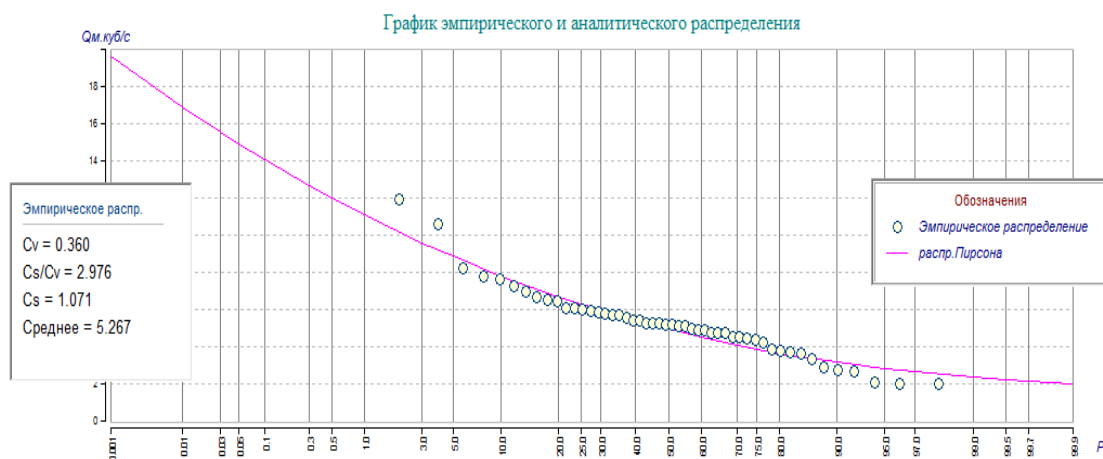


Рисунок 15. Кривая обеспеченности среднегодового расхода воды р.Тихая Сосна- г. Алексеевка

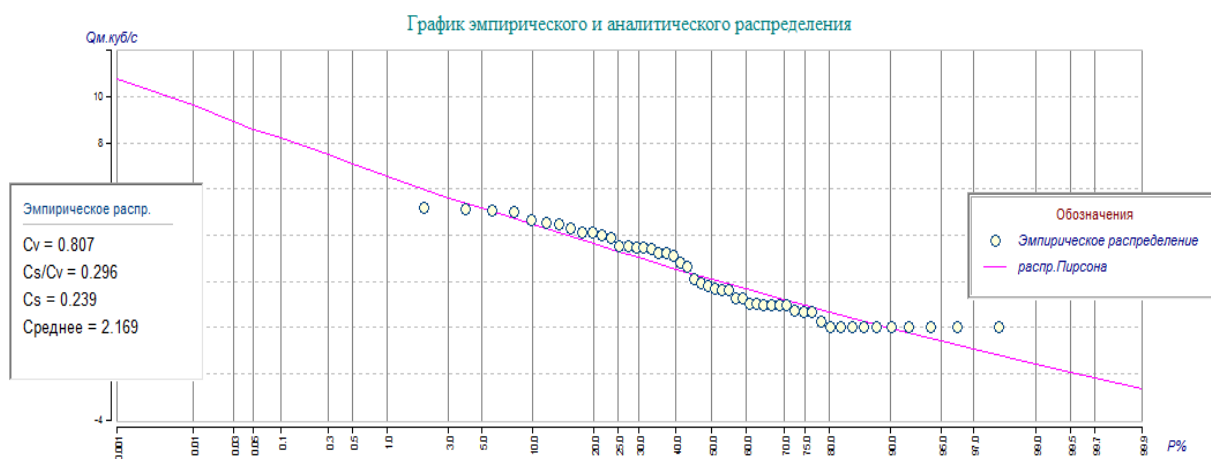


Рисунок .16.Кривая обеспеченности наименьшего летнего расхода воды р.Тихая Сосна- г. Алексеевка

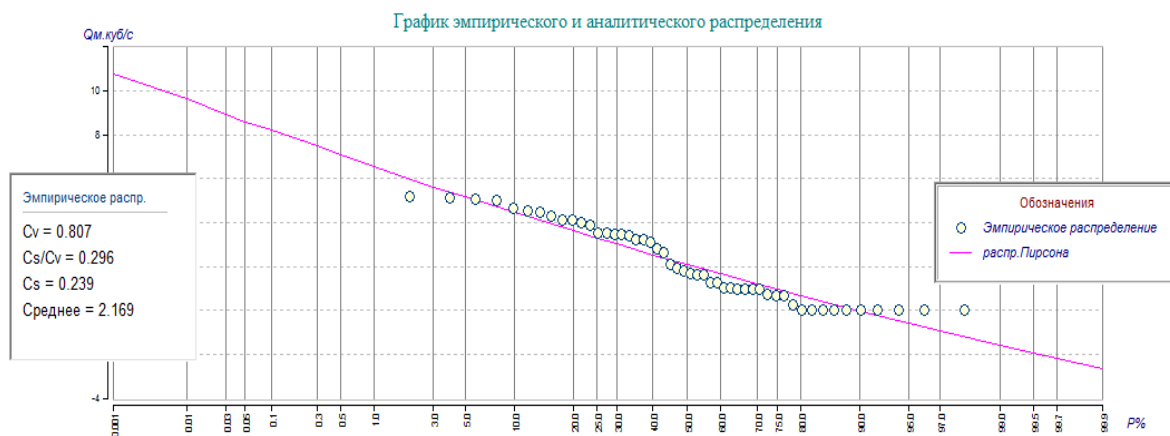


Рисунок Б.17.Кривая обеспеченности наименьшего зимнего расхода воды р.Тихая Сосна- г.
Алексеевка

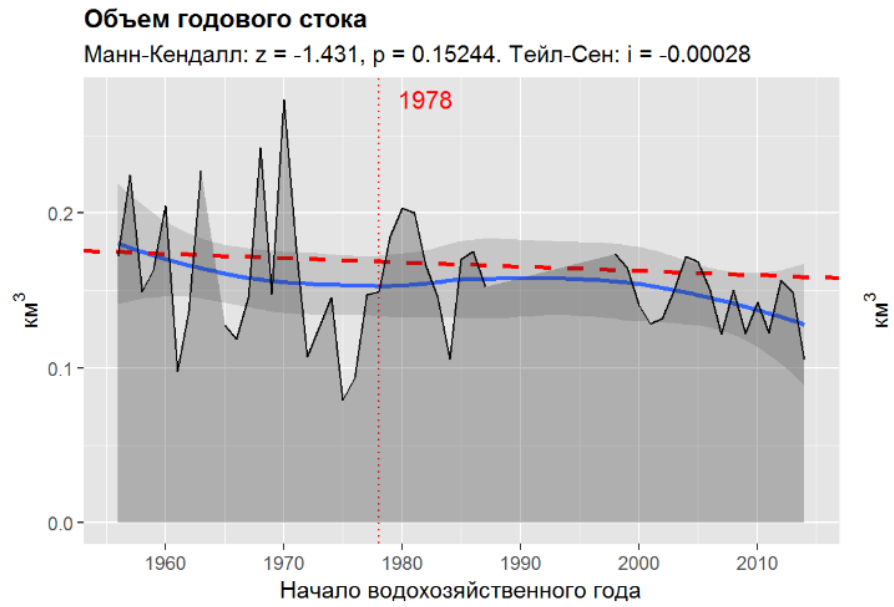


Рис.2.2.Объем дождевого стока по гидропосту р.Девица- с.Девица без грунтовой составляющей

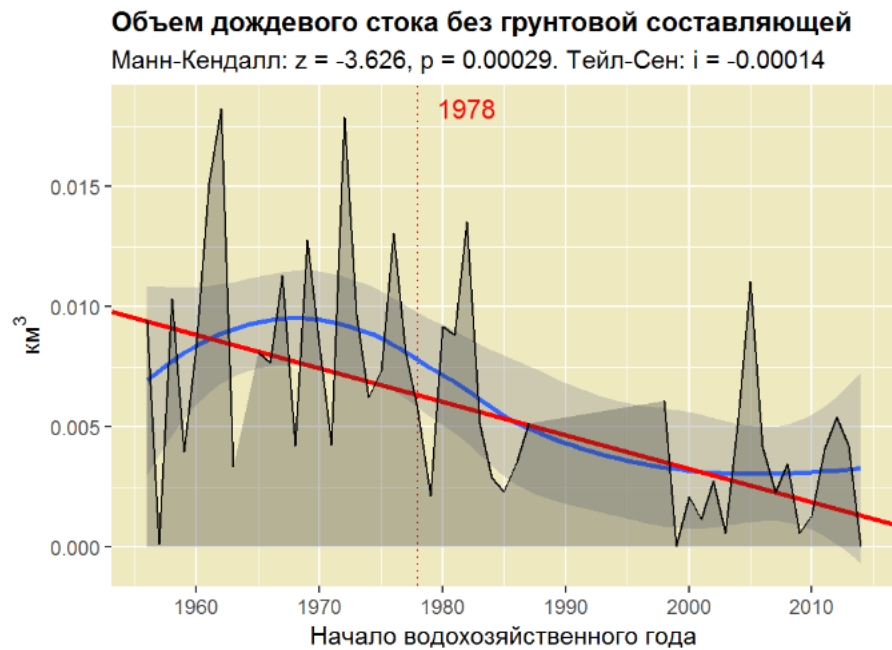


Рис.2.2.Объем дождевого стока по гидропосту р.Девица- с.Девица с объемом грунтовой составляющей стока

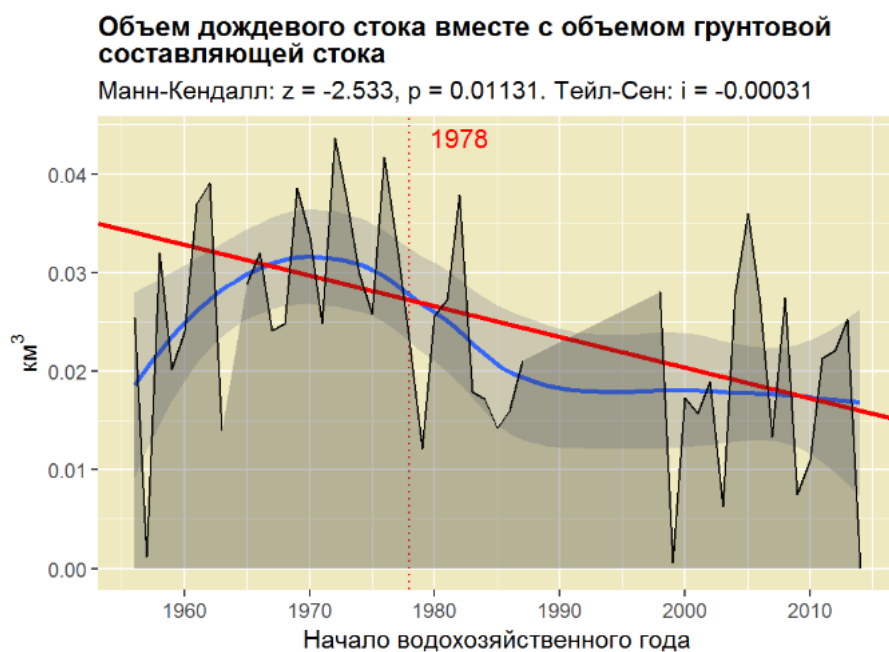


Рис.2.3.Объем дождевого стока по гидропосту р.Девица-с.Девица вместе с объемом грунтовой составляющей

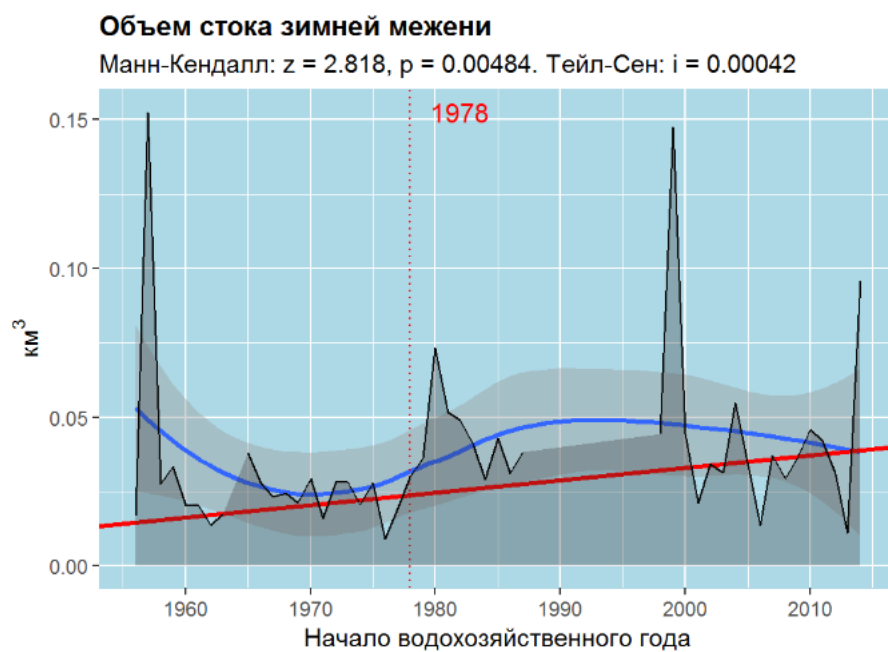


Рис.2.4.Объем стока зимней межени по гидропосту р.Девица-с.Девица

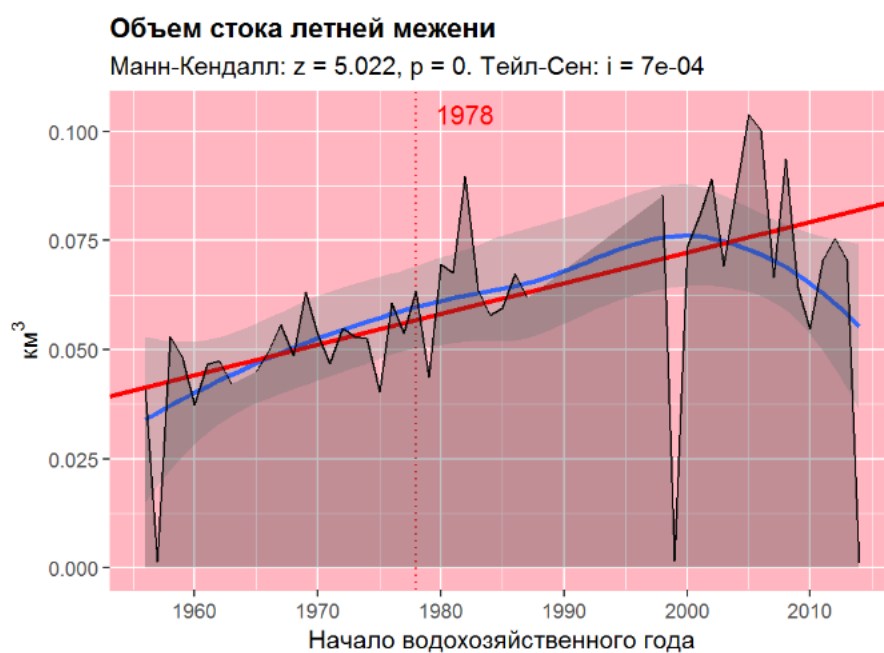


Рис.2.5.Объем стока летней межени по гидропосту р.Девица- с.Девица

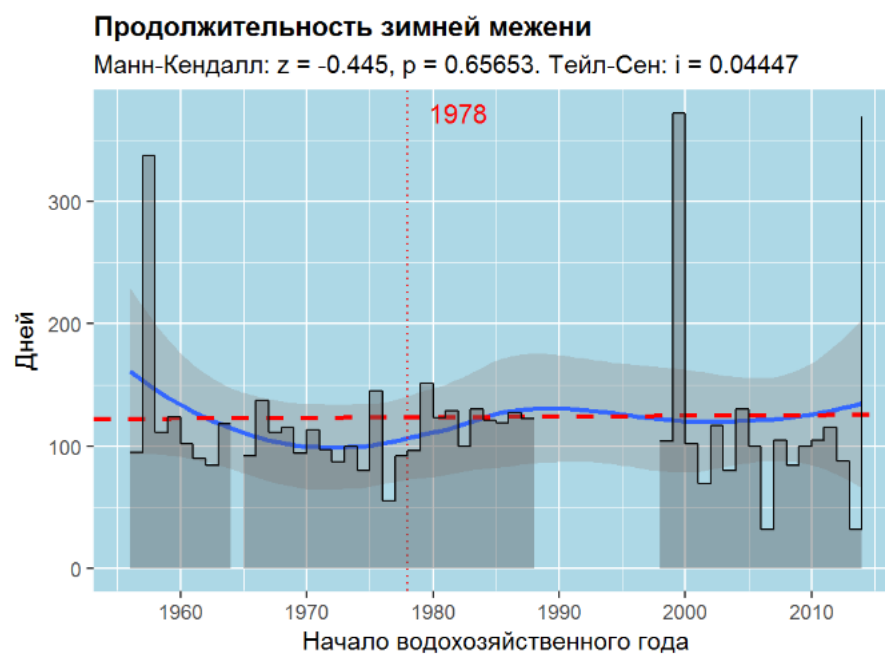


Рис.2.6.Продолжительность зимней межени по гидропосту р.Девница-с.Девница

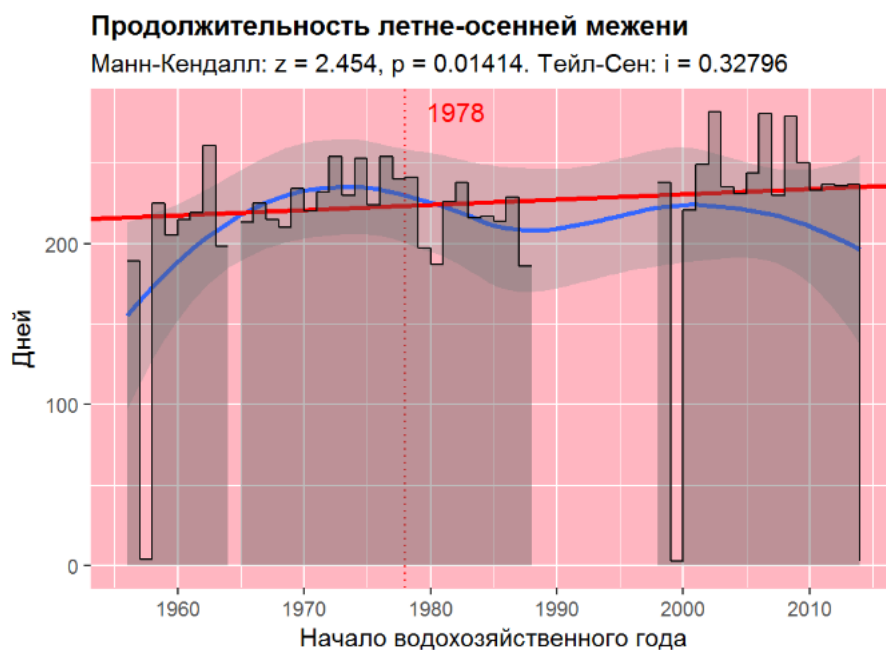


Рис.2.7.Продолжительность летне-осенней межени по гидропосту р.Девница- с.Девница

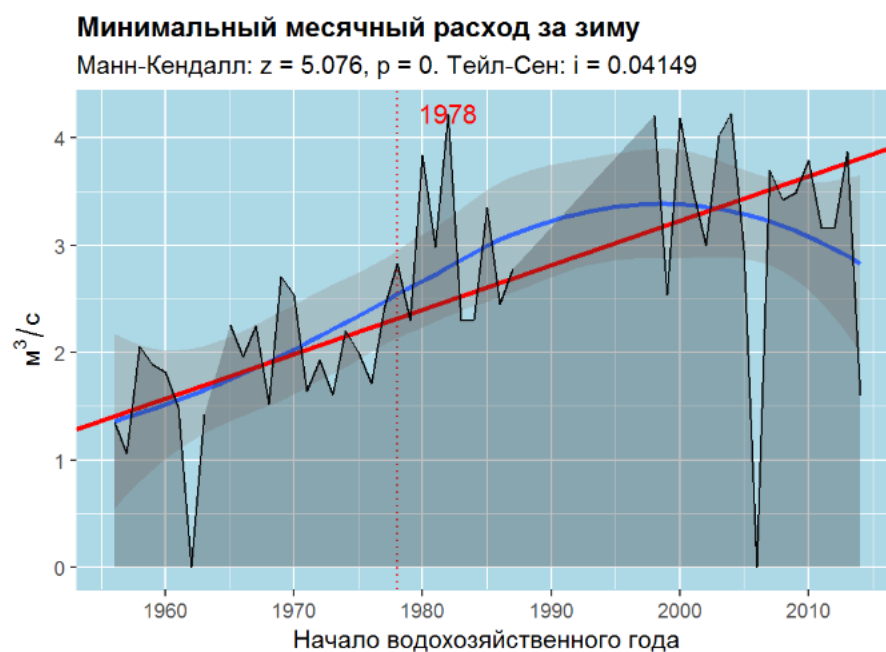


Рис.2.8.Минимальный месячный расход за зиму р.Девица-с.Девица

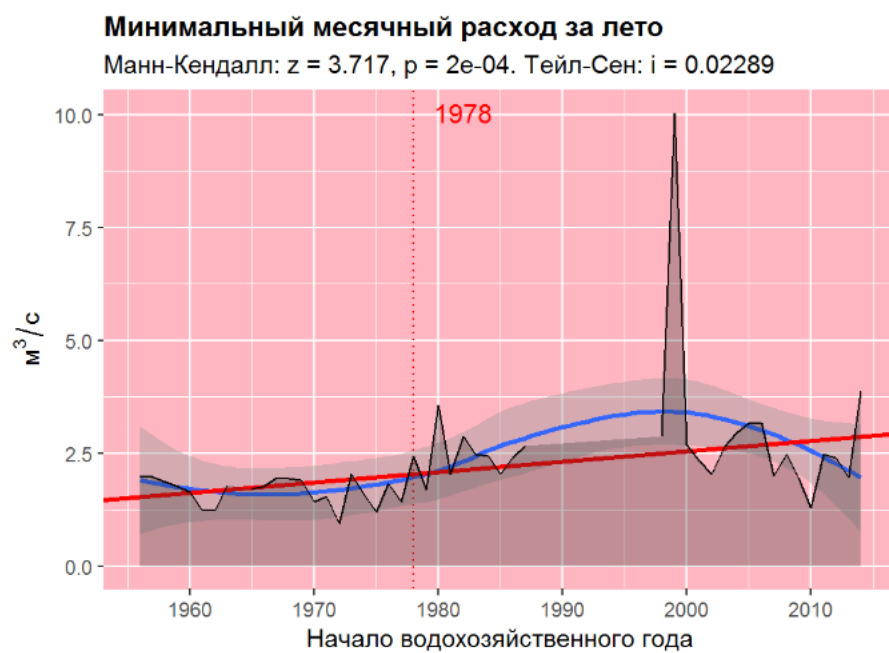


Рис.2.9.Минимальный месячный расход за лето р.Девица-с.Девица

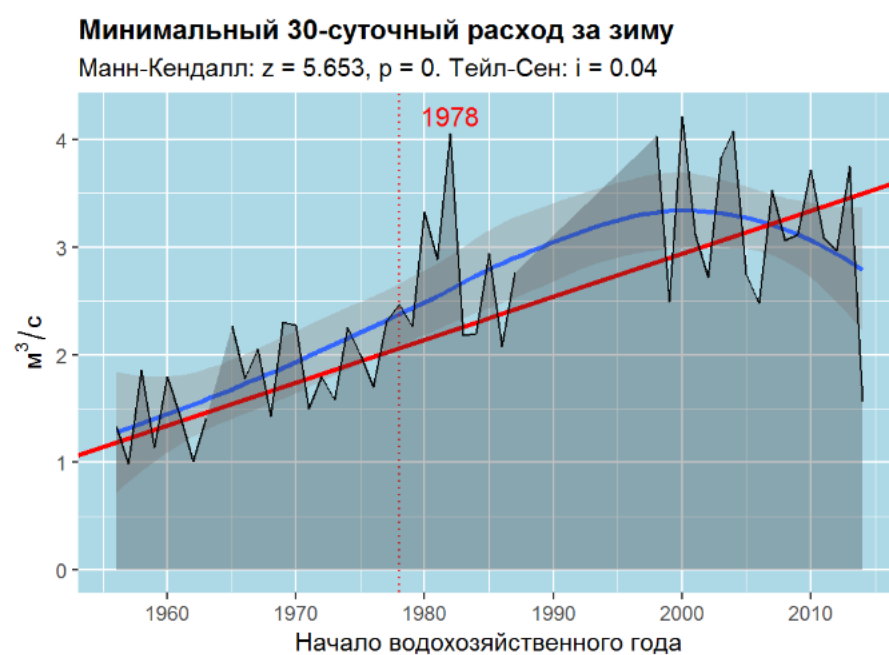


Рис.2.10. Минимальный 30-суточный расход за зиму р. Девица-с. Девица

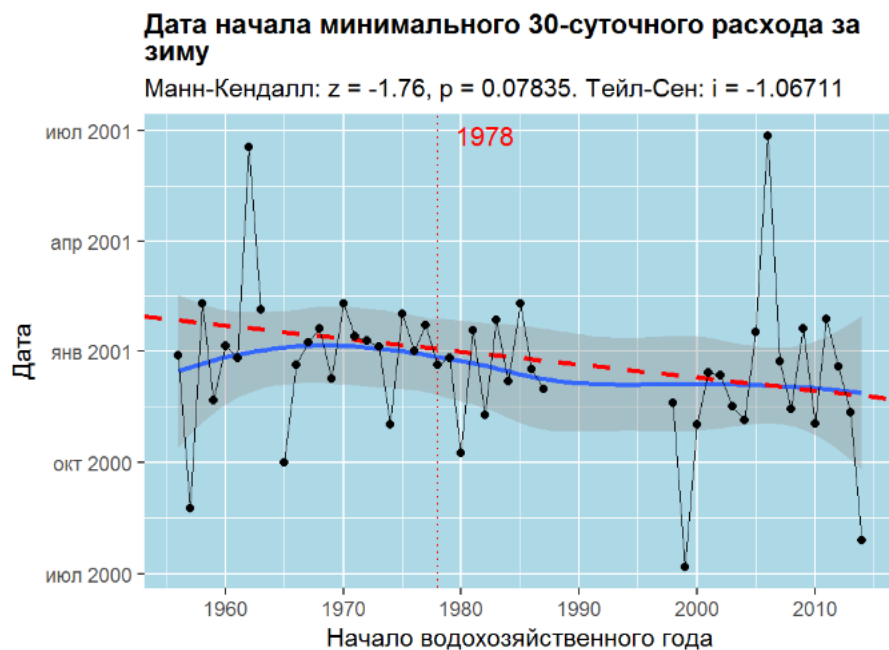


Рис.2.11. Дата начала минимального 30-суточного расхода за зиму р. Девица- с. Девица

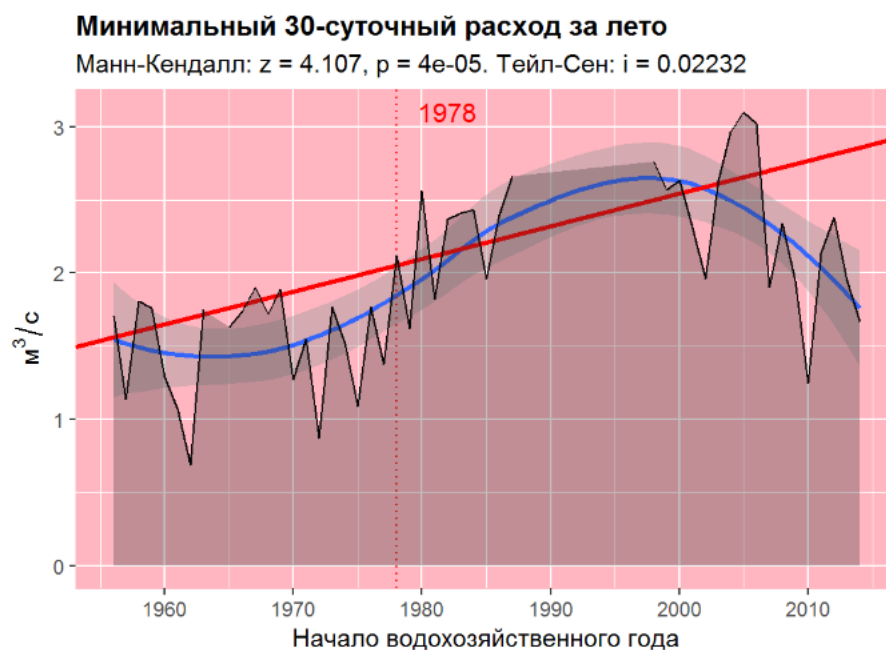


Рис.2.12. Минимальный 30-суточный расхода за лето р.Девица-с.Девица

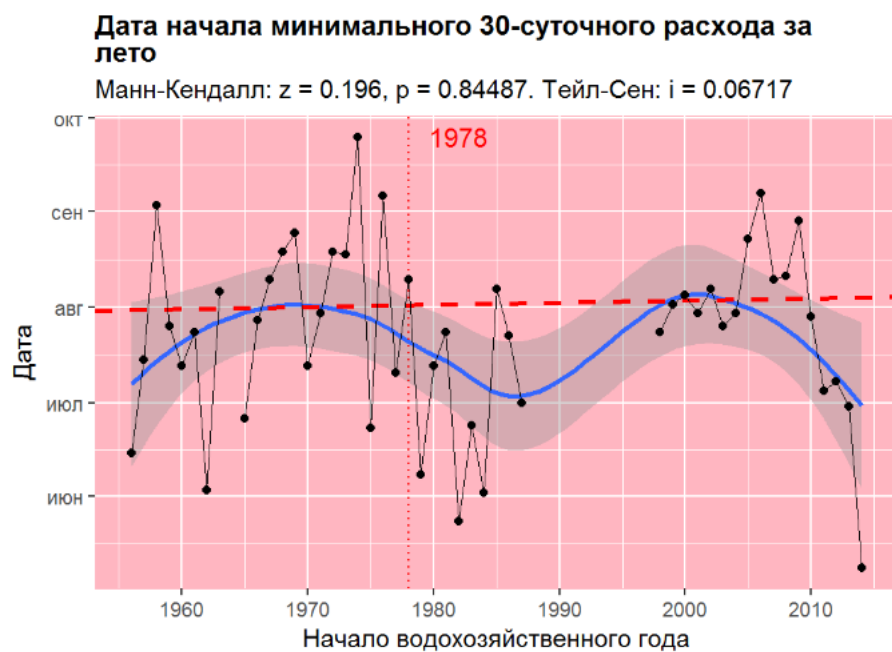


Рис.2.14. Объем годового стока р.Битюг- г.Бобров

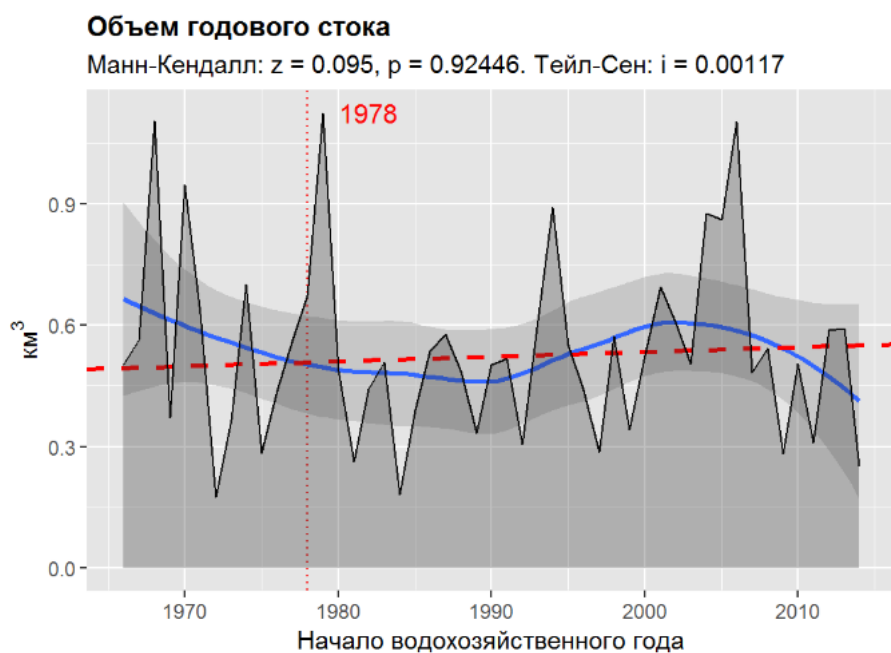


Рис.2.15. Объем дождевого стока по гидропосту р.Битюг-г.Бобров без грунтовой составляющей

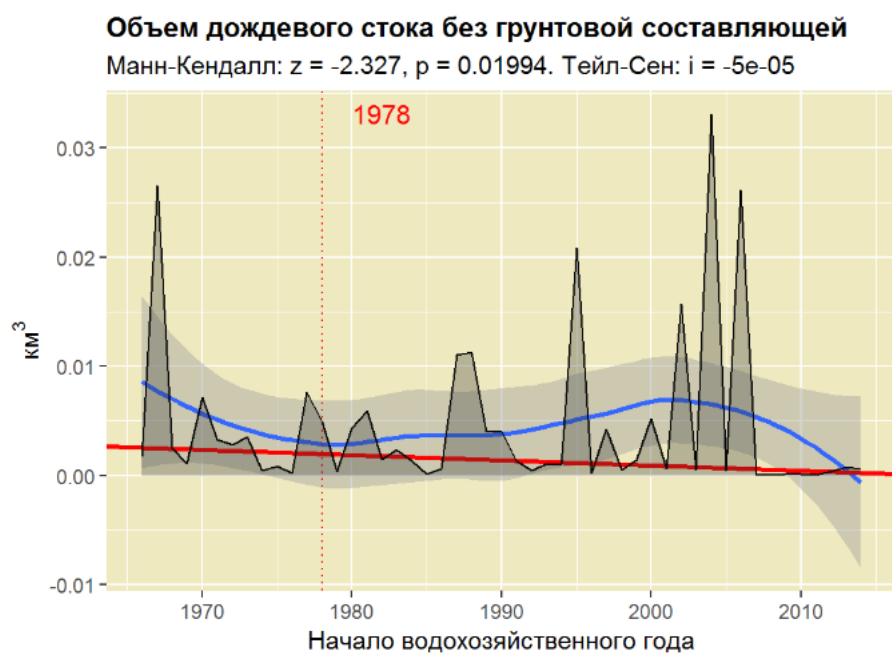


Рис.2.16. Объем дождевого стока по гидропосту р.Битюг-г.Бобров с грунтовой составляющей

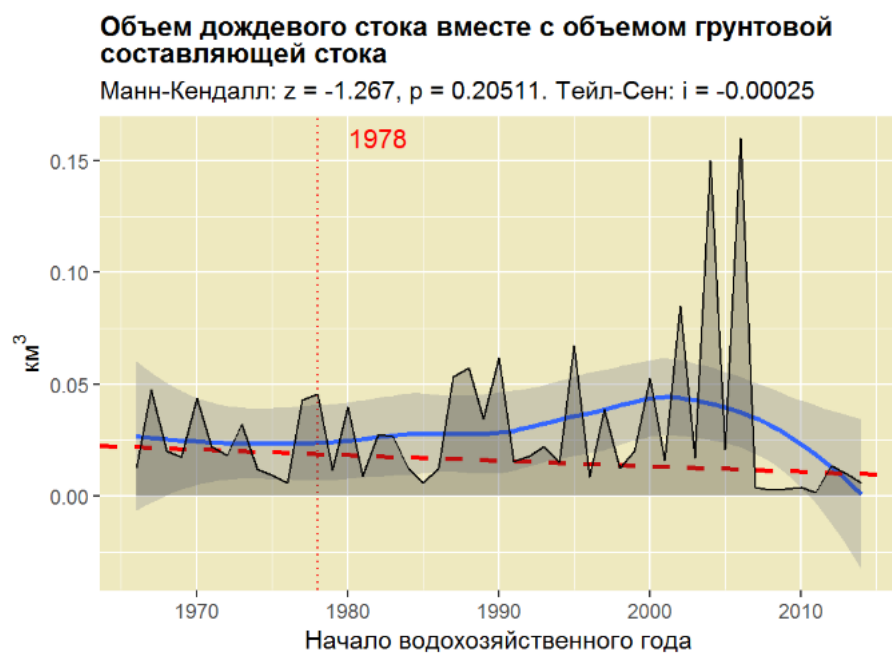


Рис.2.17.Объем стока зимней межени по гидропосту р.Битюг -г.Бобров

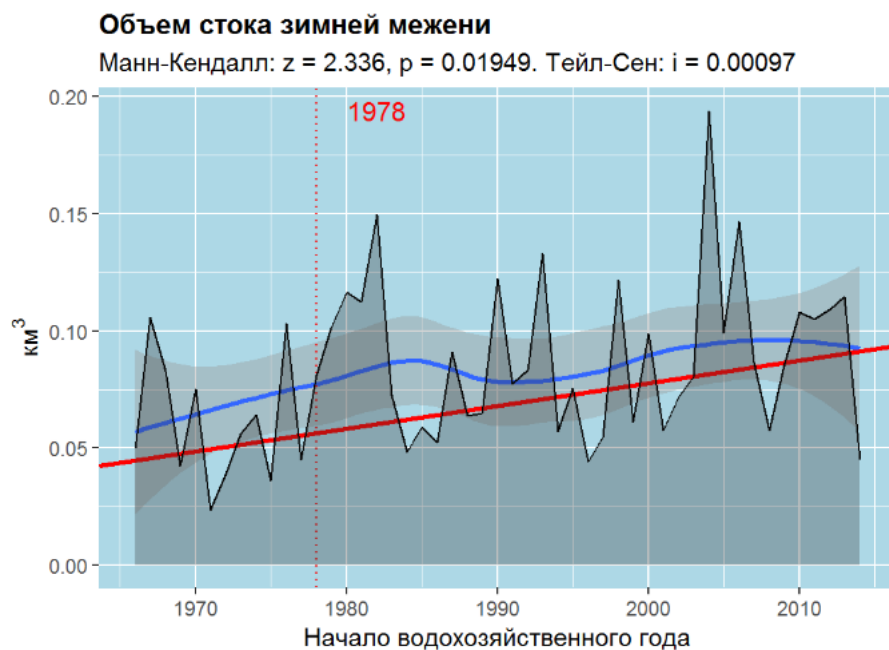


Рис.2.18.Объем стока летней межени по гидропосту р.Битюг- г.Бобров

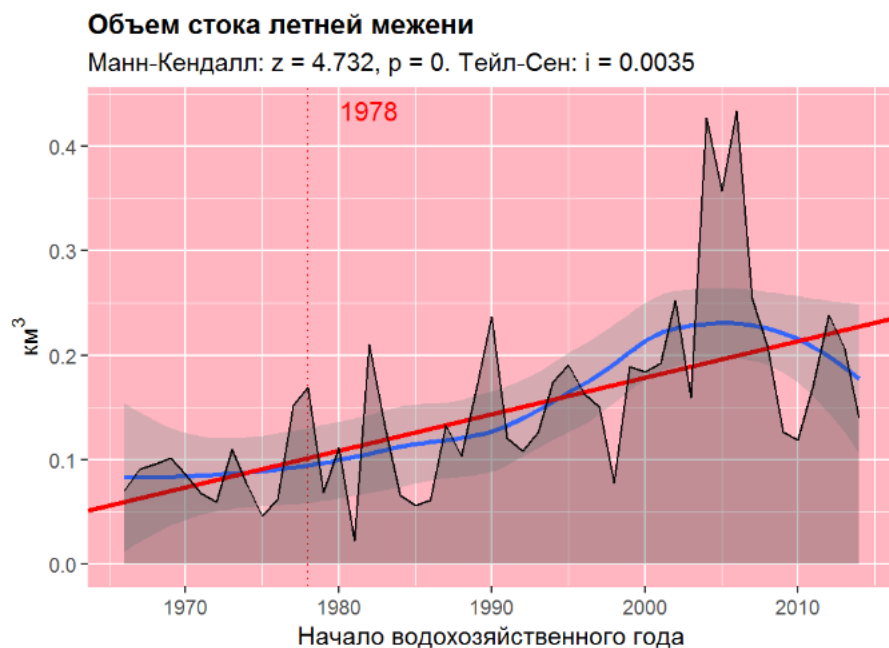


Рис.2.19.Продолжительность зимней межени по гидропосту р.Битюг- г.Бобров

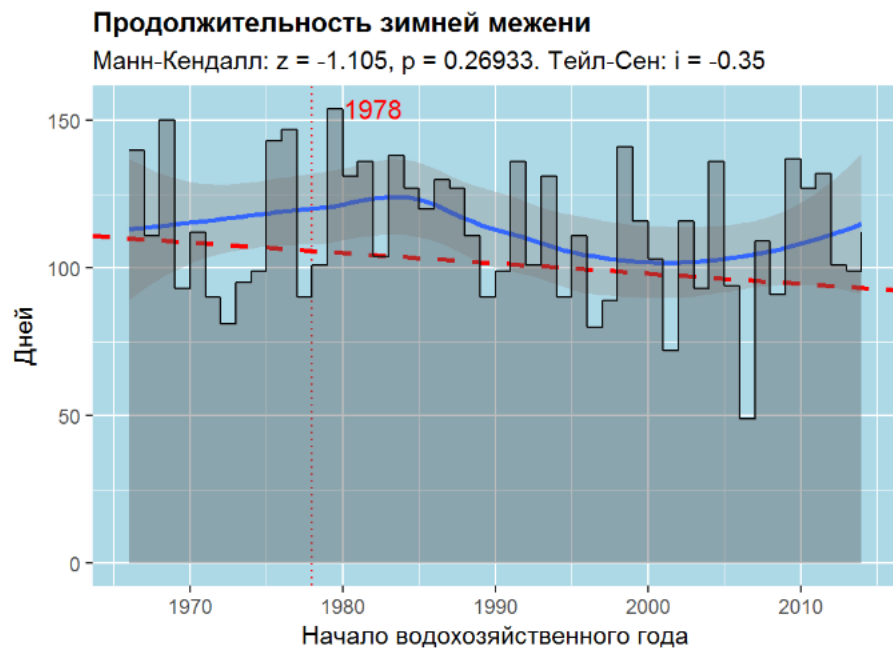


Рис.2.20.Продолжительность летне-осенней межени по гидропосту р.Битюг- г.Бобров

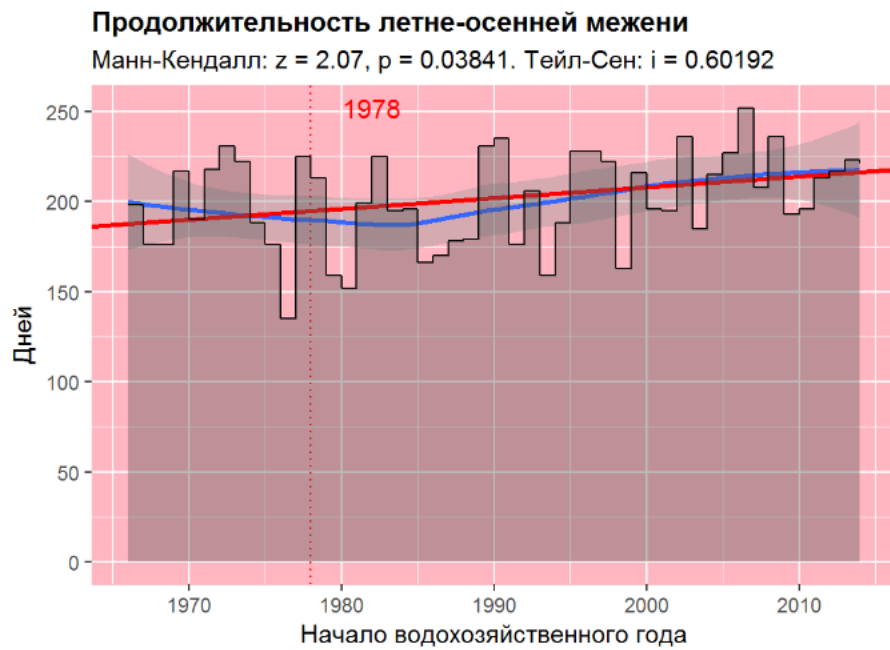


Рис.2.21. Минимальный месячный расход за зиму по гидропосту р.Битюг- г.Бобров

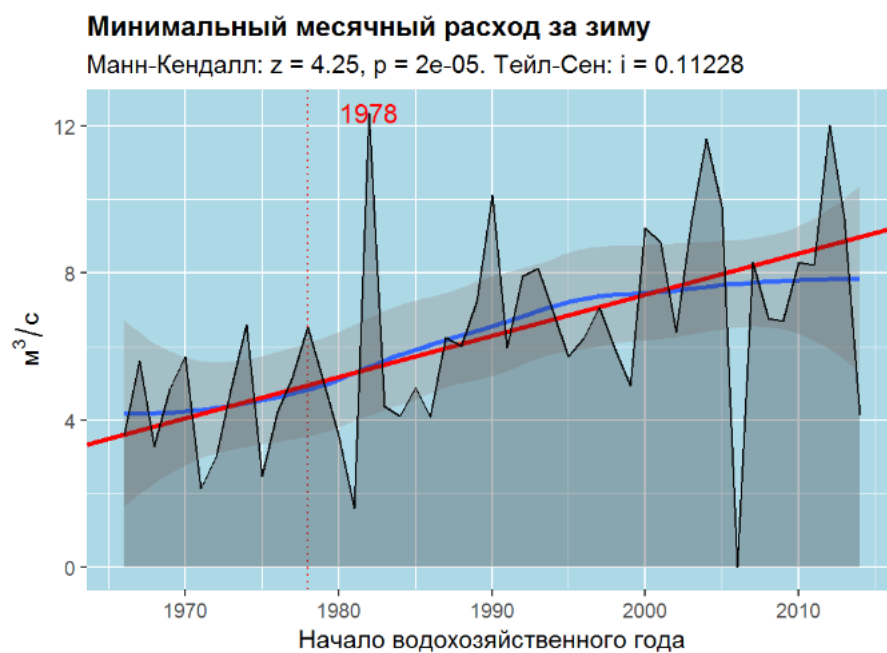


Рис.2.22. Минимальный месячный расход за лето по гидропосту р.Битюг- г.Бобров

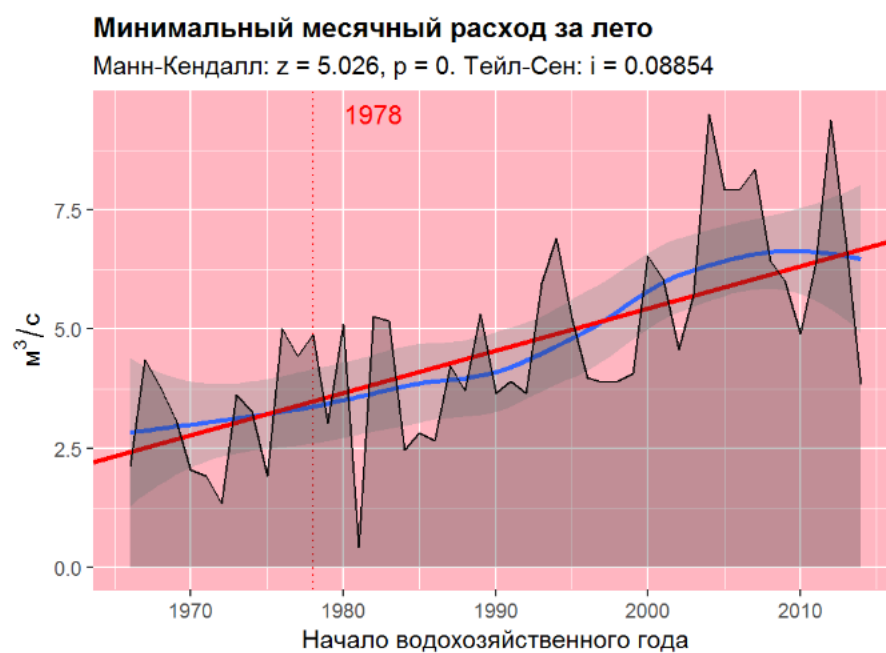


Рис.2.23. Минимальный 30-суточный расход за зиму по гидропосту р.Битюг- г.Бобров

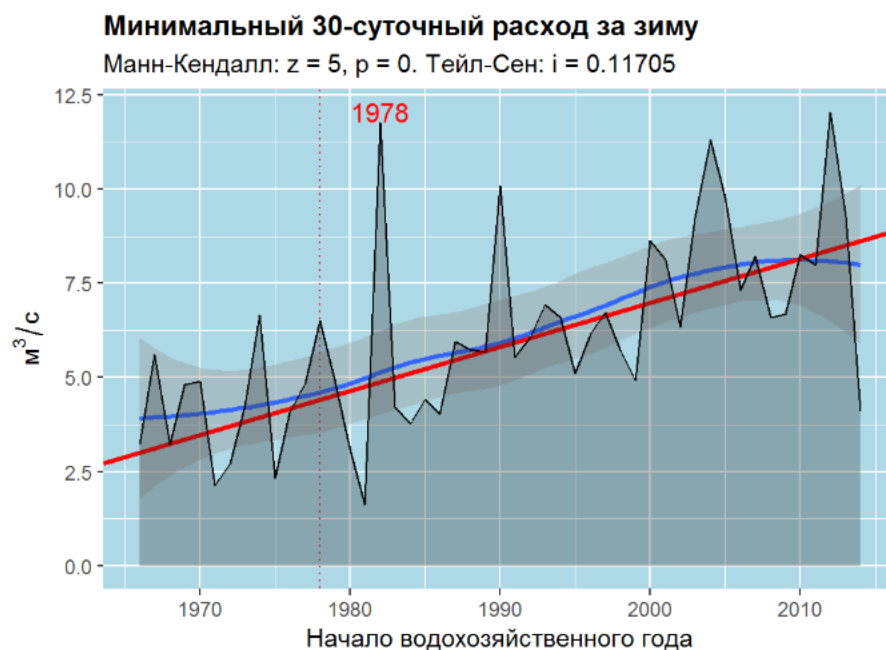


Рис.2.24. Дата начала минимального 30-суточного расхода за зиму по гидропосту р.Битюг- г.Бобров

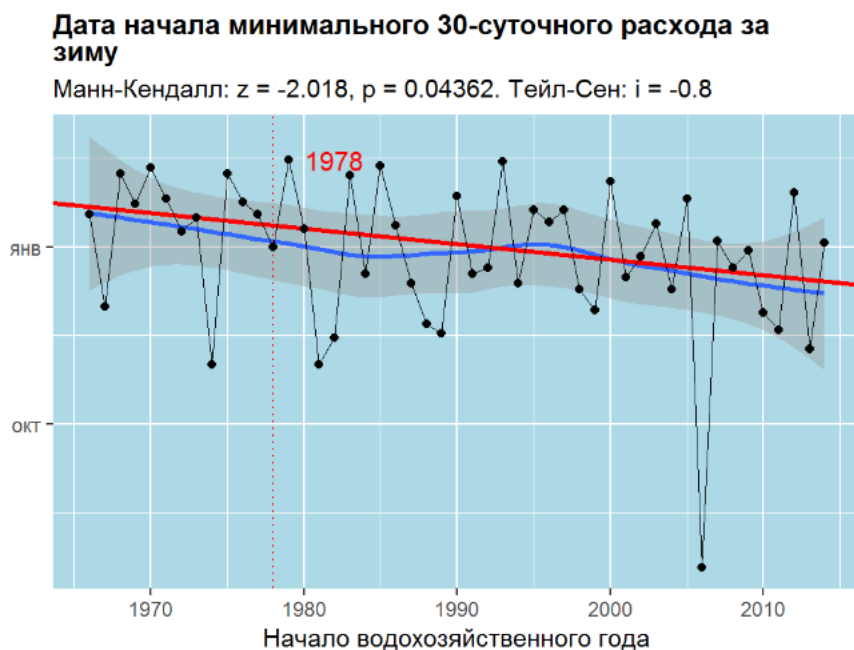


Рис.2.21. Минимальный 30-суточный расход за лето по гидропосту р.Битюг- г.Бобров

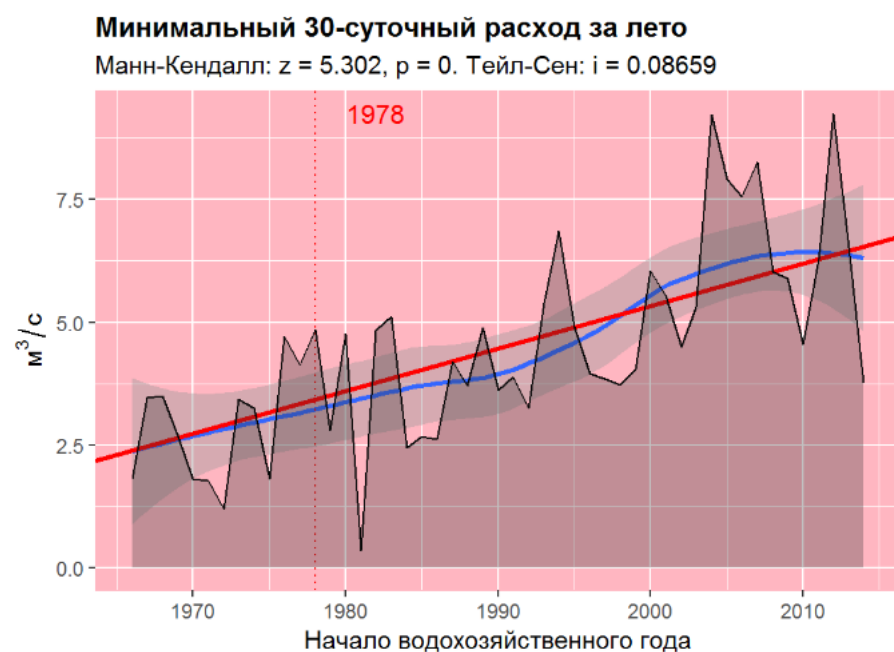
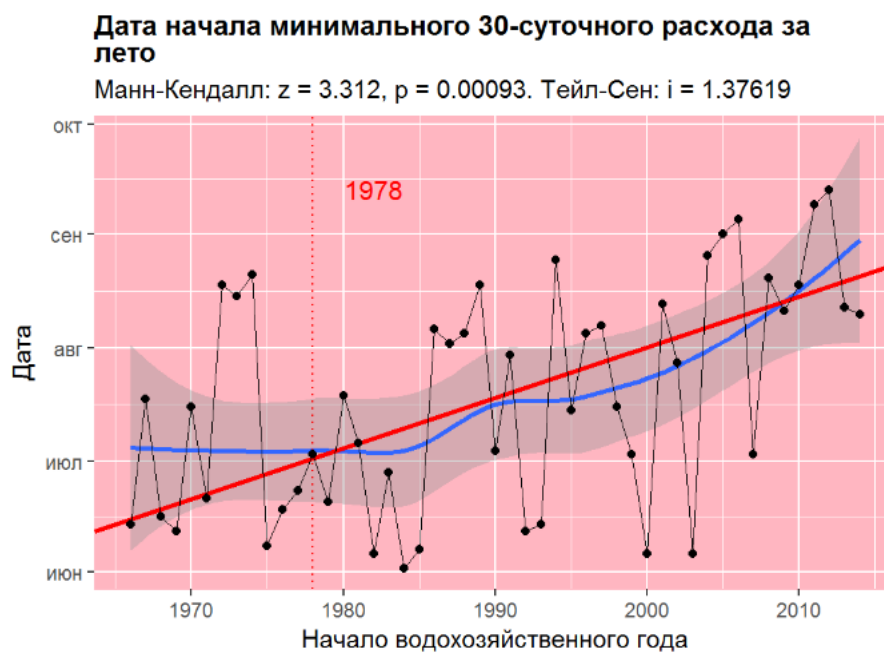


Рис.2.22.Дата минимального 30-суточного расхода за зиму по гидропосту р.Битюг- г.Бобров



3. Анализ межгодовых изменений р.Хопер- х. Бесплемяновский

Рис.2.21. Минимальный 30-суточный расход за лето по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский

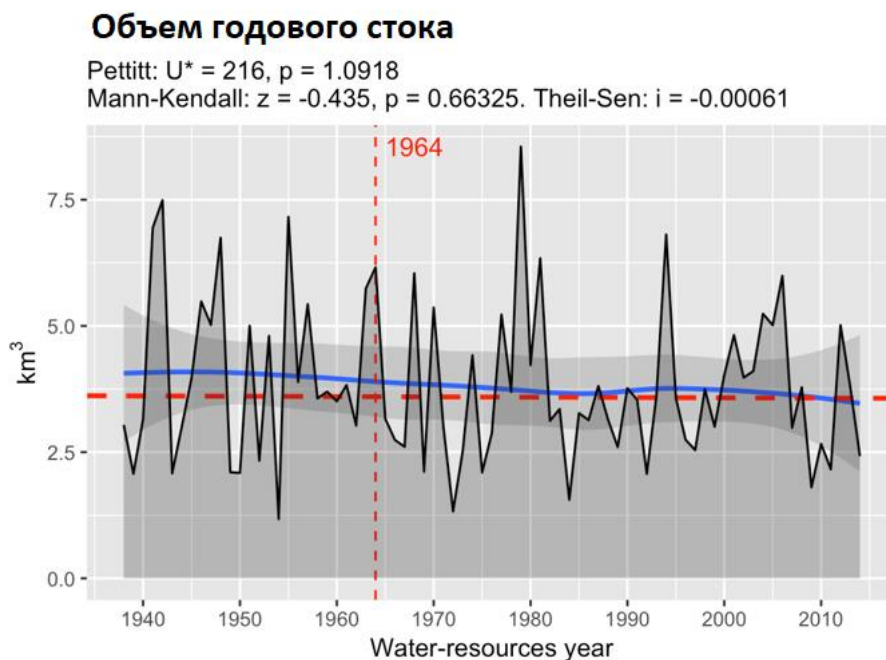


Рис.2.22. Объем дождевого стока без грунтовой составляющей по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский



Рис.2.23.Объем дождевого стока вместе грунтовой составляющей по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский



Рис.2.24.Объем зимней межени по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский



Рис.2.25.Объем стока лентей межени по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский

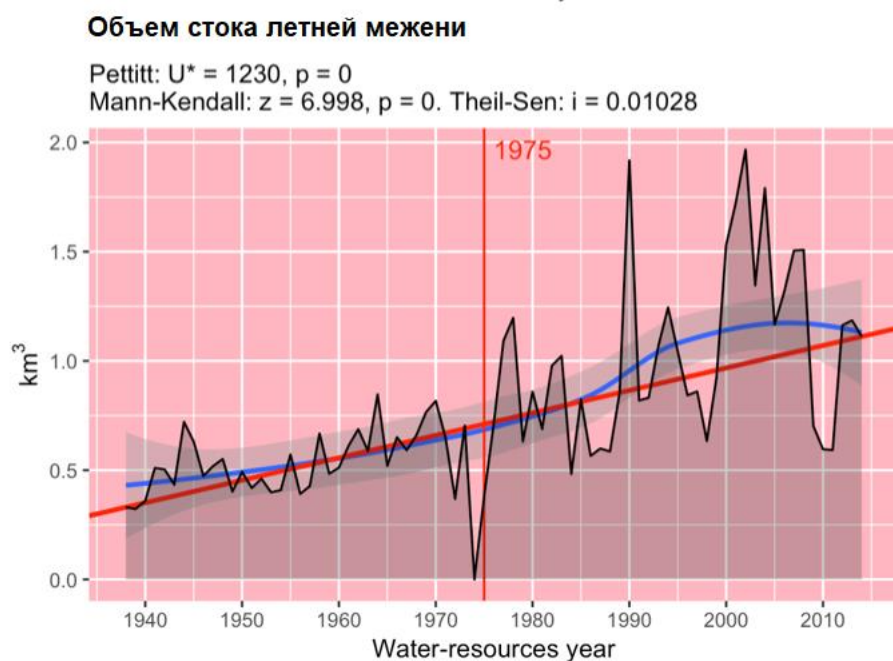


Рис.2.26.Продолжительность зимней межени по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский

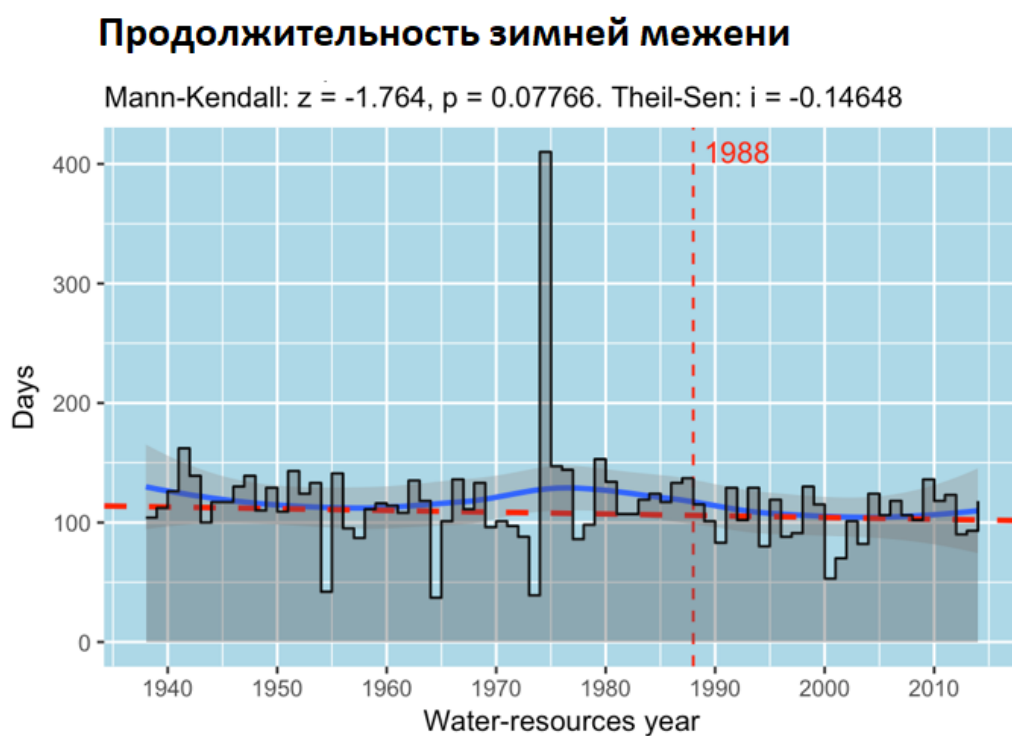


Рис.2.27.Продолжительность летней межени по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский

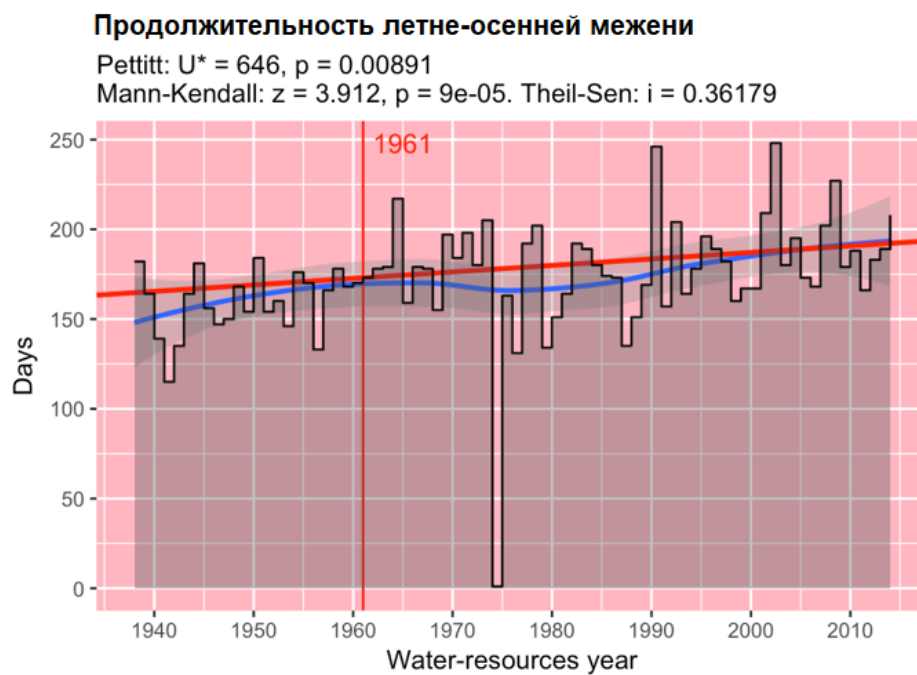


Рис.2.28. Минимальный месячный расход за зиму по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский



Рис.2.29. Минимальный месячный расход за лето по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский

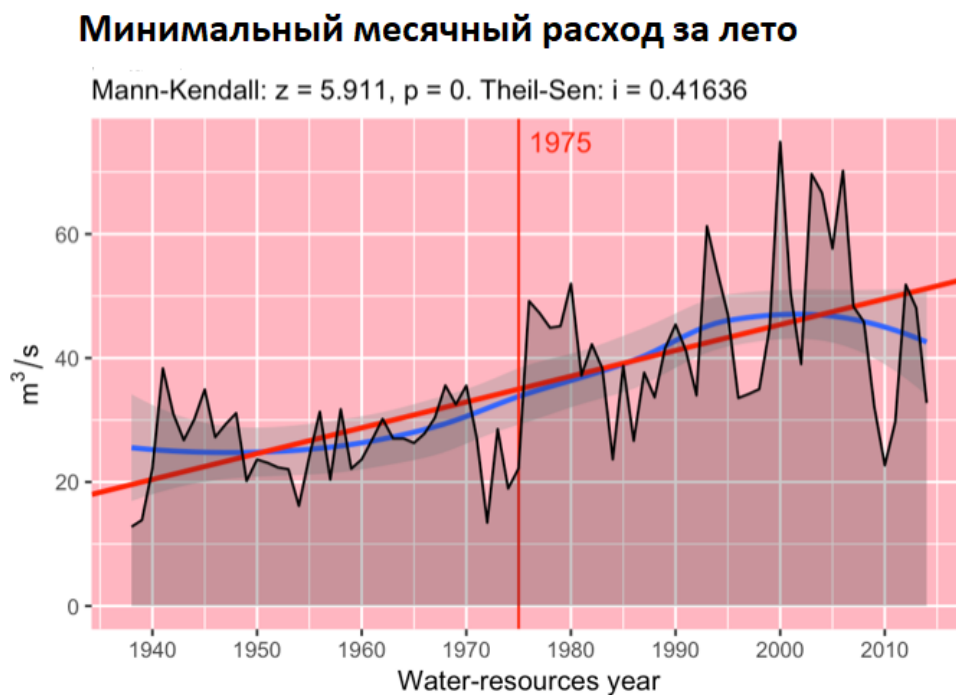


Рис.2.30. Минимальный 30-суточный расход за зиму по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский

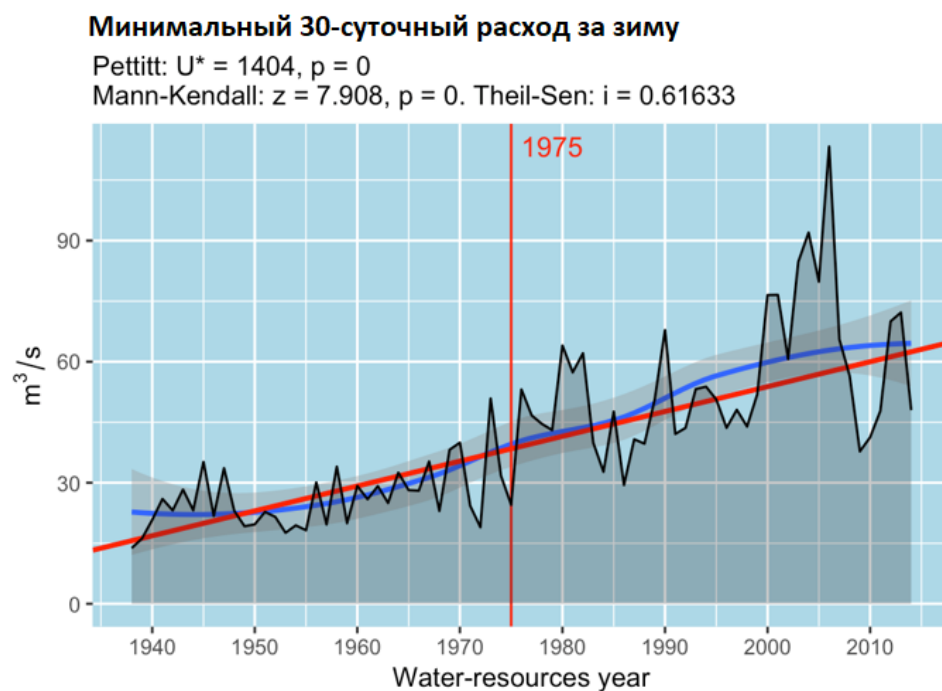


Рис.2.31.Дата начала минимального 30-суточного расхода за зиму по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский

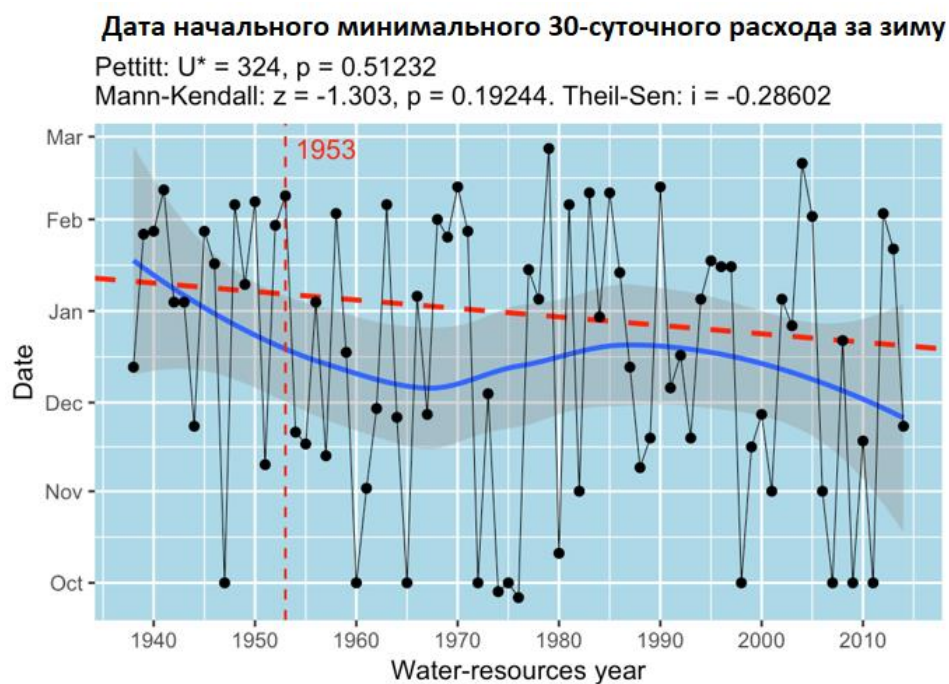


Рис.2.32.Минимальный 30-суточный расход за лето по гидропосту р.Хопер- х. Бесплемяновский

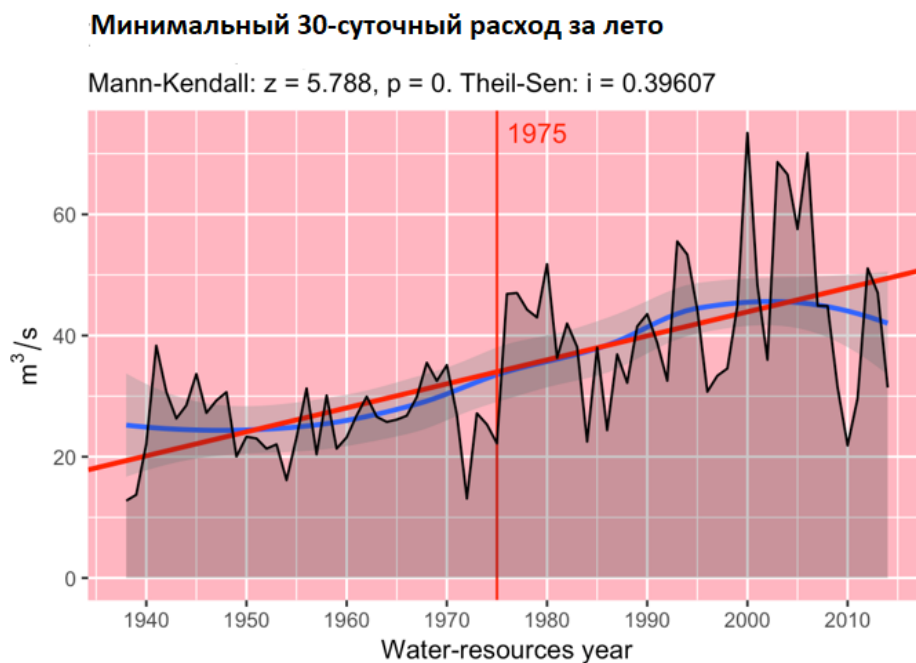


Рис.2.33.Дата минимального 30-суточного расход за зиму по гидропосту р.Хопер- х. Беспле- мяновский

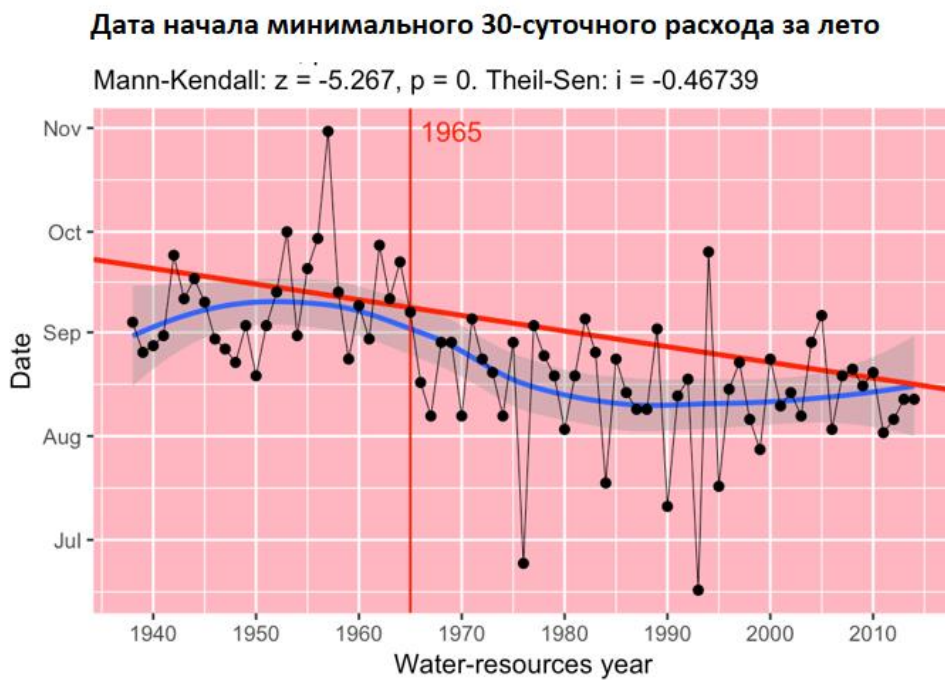


Рис.2.34.Объем годового стока по гидропосту. р.Сосна- г. Елец

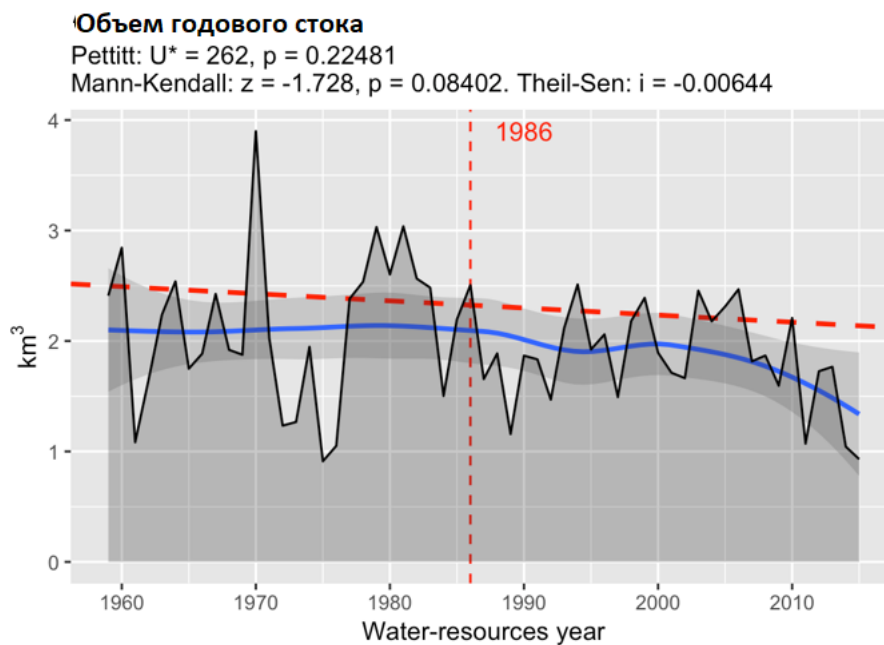


Рис.2.35.Объем дождевого стока по гидропосту р.Сосна- г. Елец без грунтовой составляющей



Рис.2.36.Объем дождевого стока вместе грунтовой составляющей по гидропосту р.Сосна- г. Елец



Рис.2.37.Объем зимней межени по гидропосту р.Сосна- г. Елец



Рис.2.38.Объем стока лентей межени по гидропосту р.Сосна- г. Елец

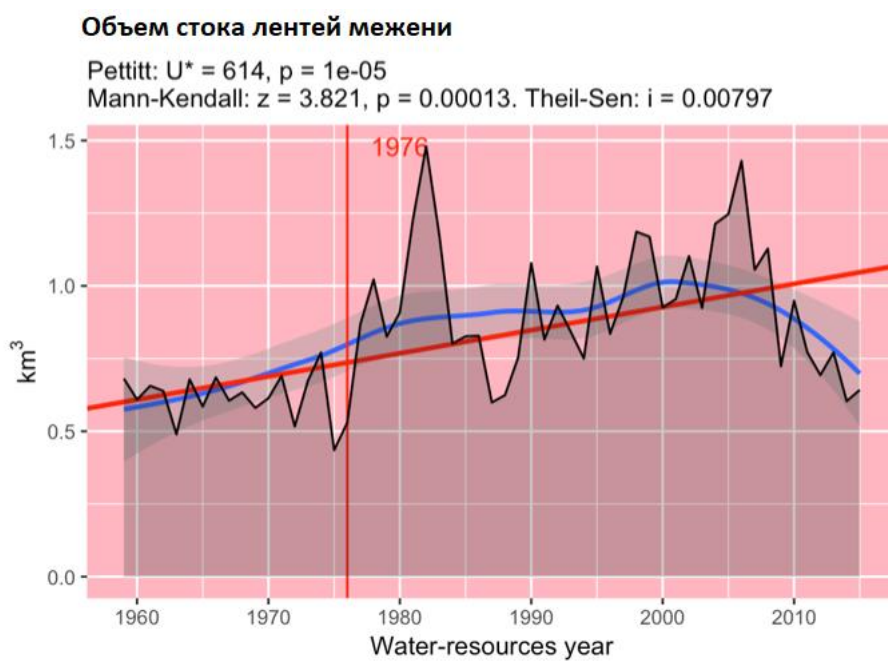


Рис.2.39.Продолжительность зимней межени по гидропосту р.Сосна- г. Елец

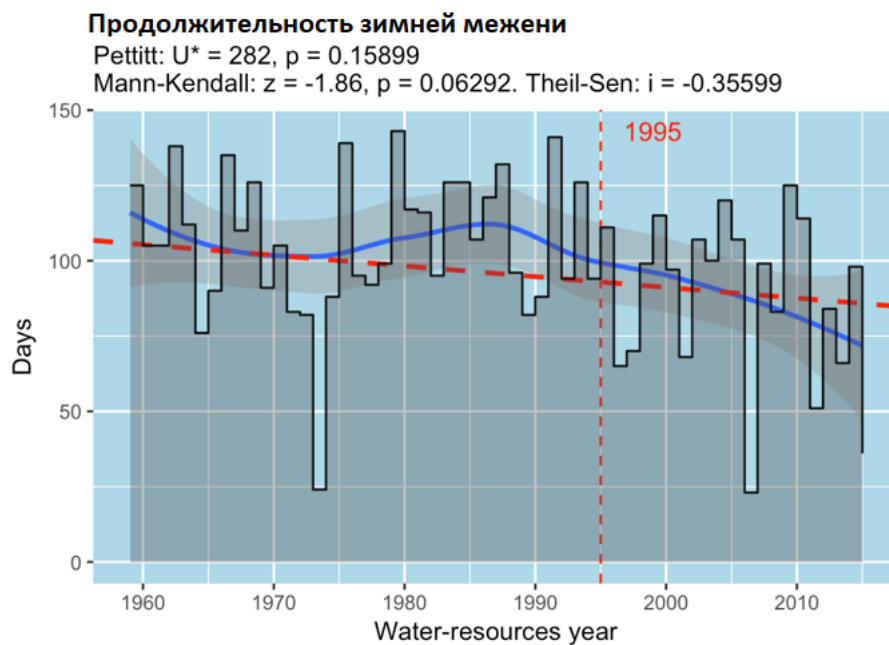
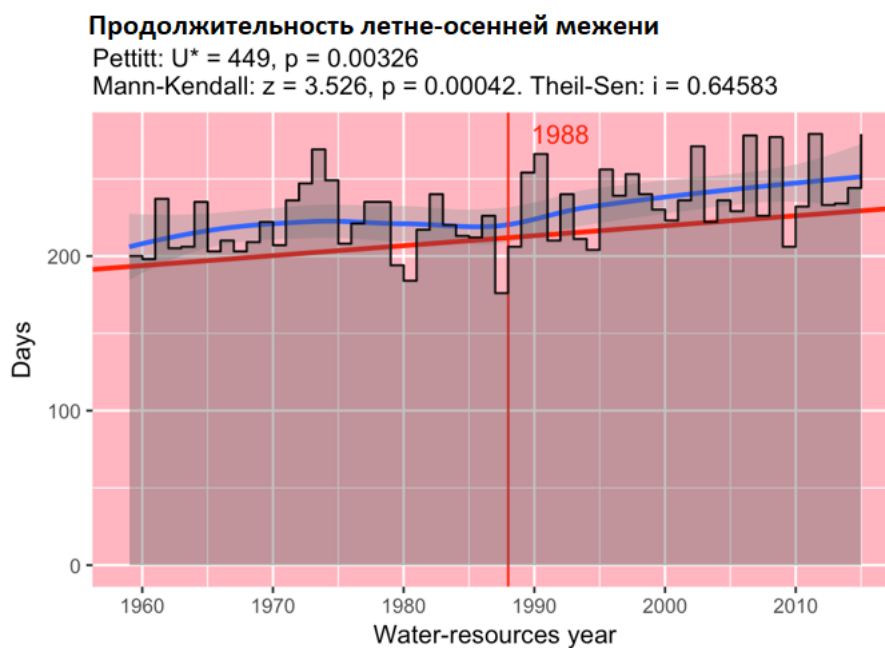


Рис.2.40.Продолжительность летней межени по гидропосту р.Сосна- г. Елец



Приложение Д.Параметра расчета испаряемости и прогнозного коэффициента вариации для рядов минимального стока

№	Река Пункт	T	X	Тп р	Хп р	q	hм м	Cv	k	Кпр Пост- ни- ков	Кпр Тюрк	Кпр (Ме- зен- цев)	кпр Одель коп	c	m2	Gn	спр	m1пр , мм	m1пр, м3/с	m2пр	Cvпр Тюр- к	Cv Пост- ников	Cv(Мез)	Cvпр(Оль- декоп)
1	р.Дон-г.За- донск 1	-6.7	354	-7.2	379	1.64	13	0.30	0.04	0.50	0.99	0.51	1.01	27.8	17 7	811	0.99	383	377.0 0	14676 8	0.1	0.1	0.1	0.05
	р.Дон-г.За- донск 2	-6.7	354	-7.2	379	1.64	10	0.30	0.03	0.90	0.99	0.02	1.00	36.0	10 5	626	1.00	379	379.0 0	143 787	0.1	0.1	0.3	0.05
2	р.Девица- с.Девица	-6.7	354	-7.2	379	0.30	9	0.30	0.03	0.90	0.90	0.02	1.00	39.9	86	565	1.00	379	17.92	143 857	1	0.1	0.3	0.04
3	р.Битюг- г.Бобров 1	-6.7	354	-7.2	379	0.87	7.00	0.50	0.02	0.90	0.70	0.02	0.88	53.2	57	1200	1.14	333	77.70	111 635	0.1	0	0.5	0.07
	р.Битюг- г.Бобров 2	-6.7	354	-7.2	379	0.37	3.00	0.40	0.01	0.90	0.70	0.02	0.88	123. 0	9	324	1.14	333	77.00	111 249	0.04	0.07	0.47	0.07
4	р.Битюг- пгт.Мор- дово 1	-6.7	354	-7.2	379	0.78	6	1.30	0.02	0.90	0.70	0.02	0.88	58.7	98	7212	1.14	333	9.56	114 280	0.07	0.02	1.15	0.17
	р.Битюг- пгт.Мор- дово 2	-6.7	354	-7.2	379	0.78	6	1.30	0.02	0.90	0.70	1.15	0.88	58.7	98	7212	1.14	333	9.56	120	0.07	0.02	1.15	0.17
5	р.Хопер- х.Беспле- мянковский	-6.7	354	-7.2	379	0.92	7	0.4	0.02	0.05	0.7	0.38	1	49.0	60	812	1	379	539	143 880	0.06	0.1	0.38	0.07
6	р.Сосна- г.Елец	-6.7	354	-7.2	379	1.17	9	0.3	0.03	0.9	0.7	0.02	1	39.0	90	577	1.11	341	176	116 474	0.05	0.1	0.33	0.04
	р.Сосна- г.Елец	-6.7	354	-7.2	379	1.88	15	0.2	0.04	0.9	0.7	0.02	1	24.2	22 2	413	1	379	196	143 681	0.7	0.1	0.55	0.4
7	р.Красивая Меча-г.Еф- ремов	-6.7	354	-7.2	379	2.87	22	0.45	0.06	0.68	0.7	0.02	1	15.9	62 3	3950	0.95	398	40.9	160 254	0.13	0.3	0.85	0.11
8	р.Тихая Сосна-г. Алексеевка 1	-6.7	354	-7.2	379	0.73	6	0.7	0.73	0.9	0.7	0.02	1	62.5	48	1964	1	379	24.7	144 456	0.1	0.1	0.6	0.08
	р.Тихая Сосна-г. Алексеевка 2	-6.7	354	-7.2	379	1.17	9	0.4	0.03	0.9	0.7	0.02	1	62.5	37	641	1	379	24.7	143 795	0.05	0.5	0.43	0.05

Продолжение таблицы Д.

№	Река Пункт	T	X	Tпр	Xпр	q	hмм	Cv	k	Кпр Пост- ников	Кпр Тюрк	Кпр Ме- зен- цев	кпр (Одель- коп)	c	m2	Gп	cпр	m1пр, мм	m1пр, м3/с	m2пр	Cvпр Тюрк	Cv Пост- ников	Cv Мез	Cvпр Ольдекоп
9	р.Воронеж-г.Ли- пецк-2 (1)	-6.7	354	-7.2	379	1.03	8	0.4	0.02	0.9	0.7	0.02	1	44.1	75	909.0	1	379	183	183	0.07	0.03	0.41	0.06
	р.Воронеж-г.Ли- пецк-2 (1)	-6.7	354	-7.2	379	1.03	8	0.4	0.02	0.9	0.7	0.02	1	44.1	1	48.0	1.42	267	129	####	0.02	0	0.41	0.06
10	р.Воронеж- с.Чертовикское	-6.7	354	-7.2	379	1.5	12	0.3	0.03	0.9	0.7	0.02	1	29.0	162	776.0	52	267	4.8	59	0.06	0.1	0.38	0.05
11	р.Воронеж- сл.Заворонежская 1	-6.7	354	-7.2	379	0.04	14	0.6	0.04	0.9	0.7	0.02	1	26.0	252	3468.0	1	267	379	24	0.13	0.1	0.8	0.11
	р.Воронеж-сл.Заво- ронежская 2	-6.7	354	-7.2	379	1.75	14	0.3	0.04	0.9	0.7	0.02	1	26.0	202	867.0	1.42	267	16.9	####	0.07	0.1	0.4	0.05
12	р. Россошь-пгт. Подгоренский 1	-6.7	354	-7.2	379	0.33	3	0.6	0.01	1	0.7	0.02	1	137.0	9	657.0	1.42	267	3.83	####	0.06	0.1	0.34	0.05
	р. Россошь-пгт. Подгоренский 2	-6.7	354	-7.2	379	0.44	3	0.6	0.01	0.9	0.7	0.02	1	137.0	9	657.0	1.42	267	3.83	####	0.06	0.1	0.34	0.05
13	р. Подгорная-г. Ка- лач 1	-6.7	354	-7.2	379	0.11	1	0.6	0	0.9	0.7	0.02	1	407.0	58	221.0	1.42	267	7	58	0.03	0	0.2	0.02
	р. Подгорная-г. Ка- лач 2	-6.7	354	-7.2	379	0.11	1	0.6	0	0.9	0.7	0.02	1	81.0	26	1107.0	1.42	267	345	19	0.07	0.1	0.3	0.06
14	р. Ворона- г. Уварово 1	-6.7	354	-7.2	379	0.59	5	0.4	0.01	0.9	0.7	0.02	1	77.0	57	516.0	1.42	267	7	57	0.05	0.1	0.3	0.06
	р. Ворона- г. Уварово 2	-6.7	354	-7.2	379	0.59	5	0.4	0.01	0.9	0.7	0.02	1	77.0	57	516.0	1.42	267	7	57	0.05	0.1	0.3	0.06
15	р. Ворона-с.Мор- дово 1	-6.7	354	-7.2	379	1.99	15	0.5	0.04	0.9	0.7	0.02	1	22.9	299	2735.0	1.42	267	7	68	0.07	0.1	0.57	0.06
16	р. Ворона- с.Мордово 2	-6.7	354	-7.2	379	1.03	8	0.3	0.02	0.9	0.7	0.02	1	44.4	69	508.0	1.11	341	7	####	0.07	0.1	0.57	0.06
17	р.Хопер-Ново- хоперск 1	-6.7	354	-7.2	379	1.43	11	0.3	0.01	0.9	0.7	0.02	1	31.0	136	710.0	52.6	267	7	59	0.04	0	0.24	0.06
18	р.Хопер-Ново- хоперск 2	-6.7	354	-7.2	379	1.43	11	0.3	0.01	0.9	0.7	0.02	1	31.0	136	795.0	52.6	193	7	59	0.01	0.1	0.38	0.06

