



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Водный режим разнотипных
рек Северного края**

Исполнитель

Карабанова Виктория Павловна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

д.г.н., профессор
(ученая степень, ученое звание)

Мякишева Наталия Вячеславовна
(фамилия, имя, отчество)

«Я разрешаю допускать»
Заведующий кафедрой

(подпись)

К.Т.Н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

2 05 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Физико-географические особенности Северного Края.....	5
1.1 Рельеф и геологическое строение	5
1.2 Геологическое строение	6
1.3 Климат	8
1.4 Осадки.....	11
1.5 Снежный покров	12
1.6 Почвы и растительность	13
1.7 Гидрография.....	14
1.8 Подземные воды	16
1.9 Водный режим рек.....	16
Глава 2. Многолетние колебания речного стока разнотипных рек	18
2.1 Состояние изученности.....	18
2.2 Квантильный анализ многолетних колебаний речного стока.....	19
2.3 Выделение трендов фильтром Баттерворта	28
Глава 3. Внутригодовой ход речного стока разнотипных рек	30
3.1 Особенности внутригодового хода речного стока	30
3.2 Метод реального года	32
3.3 Метод компоновки по сезонам	36
3.4 Метод теории периодически коррелированных случайных процессов	43
Заключение.....	50
Список использованных источников.....	52

Введение

Северный край – рассматриваемая территория, которая занимает северо-восточную окраину Европейской территории России. С запада на восток Северный край простирается от меридиана г. Каргополя до Уральских гор, на севере омывается Белым и Баренцевым морями.

Данная территория представляет собой почти ничем не защищенную от западных и северо-западных ветров, с которыми связано поступление влажных воздушных масс, огромную лесистую равнину. Для территории такого типа характерны избыточное увлажнение и относительно однообразные климатические условия, которые меняются там, где тайга уступает место лесотундре и тундре, то есть у полярного круга и у восточных ее пределов, где равнина сменяется возвышенностями западного Урала.

В последнее время данная территория используется для размещения объектов хозяйственного назначения: дорог, газопроводов, нефтепроводов и т. д. Как правило, такие объекты пересекают несколько водосборов и рек с различным характером зарегулированности стока.

Обзор справочников «Основные Гидрологические характеристики», «Гидрологические ежегодники», «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» показал, что для строительства трасс и минимизации антропогенной нагрузки на водосборы, рассматриваемая территория в гидрологическом отношении изучена недостаточно. Местоположение участков трасс относительно гидрографической сети определяет необходимость подробного рассмотрения особенностей гидрологического режима вод и водосборных территорий средних водотоков. Это связано с тем, что загрязняющие вещества, связанные со строительством и эксплуатацией этих объектов, могут влиять на водотоки не только попадая в период дождей летом и таяния снега весной, но и поступая непосредственно в русловую сеть.

Поэтому целью настоящей работы является изучение разномасштабной изменчивости водности равнинных и горных рек, протекающих по территории Северного края с использованием информации с разным периодом дискретизации.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Собрать исходные данные по расходам разнотипных рек Северного края.
2. Оценить особенности внутригодовых колебаний водности разнотипных рек.
3. Установить особенности многолетних колебаний водности разнотипных рек.

Для решения поставленных задач использовались данные среднемесячных и годовых расходов рек Усы и Щугора, на разных станциях период наблюдений отличается – в целом он затрагивает временной промежуток с 1933 по 2021 годы. Равнинная река – р. Уса – с. Петрунь имеет площадь водосбора $F = 27500 \text{ км}^2$. Горная река – р. Щугор – д. Мичабичевник имеет площадью водосбора $F = 9220 \text{ км}^2$. Эти реки являются характерными для равнинных и горных условий Северного края. Также данные среднемесячных температур воздуха (апрель, май, июнь) и годовых сумм осадков на станции Усть-Уса.

Для оценки многолетних колебаний водности рек использовался квантильный анализ данных и метод низкочастотной фильтрации Баттерворта. Реализации средних годовых расходов рассматривалась как стационарные случайные процессы. Для характеристики внутригодовых колебаний водности применялись методы реального года, компоновки по сезонам и метод теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСР).

Глава 1. Физико-географические особенности Северного Края

1.1 Рельеф и геологическое строение

Рельеф преимущественно равнинный и однообразный, несмотря на значимые различия в геологическом строении и истории развития. На северо-западной окраине Ветреного пояса и возвышенностей Тимана в центральной части равнинный характер местности почти не нарушается наличием возвышенностей.

Низменные равнины чередуются с невысоким плато и слабоволнистыми возвышенными равнинами на большей части пространства. Рядом с морским побережьем низменности занимают огромные территории; по мере удаления от него их площадь уменьшается, а еще они располагаются полосами вдоль главных рек и их наиболее крупных притоков. (Рисунок 1.1)

Возвышенные равнины приурочены к приводо-разделенным зонам междуречий. Эти участки обширнее на большем расстоянии от морского побережья.

В итоге поверхность Северного края понижается с юга на север, что и определяет общее направление речного стока к Белому и Баренцеву морям.

Абсолютные отметки низменностей 30–80 м, а вблизи морского побережья еще меньше. На возвышенных равнинах и плато, отметки в среднем 100–160 м, местами доходят до 200–250 м.

От низменностей к возвышенным равнинам и плато переходы ярко выражены и имеют характер уступов наветренной экспозиции относительной высотой 50–10 м. Что является причиной местных аномалий речного стока с малых водосборов и осадков.

Поверхность плато и возвышенных равнин пересечена густой сетью глубоковрезанных речных долин, хорошо дренирована и заболочена лишь

местами. В пределах низменностей долины неглубокие, слабо разработанные. Основная масса болот приурочена к низменностям. На морском побережье болот особенно много между Беломорско-Кулойским плато и Тиманом, что связано также и с особенностями климата, более теплого и влажного.

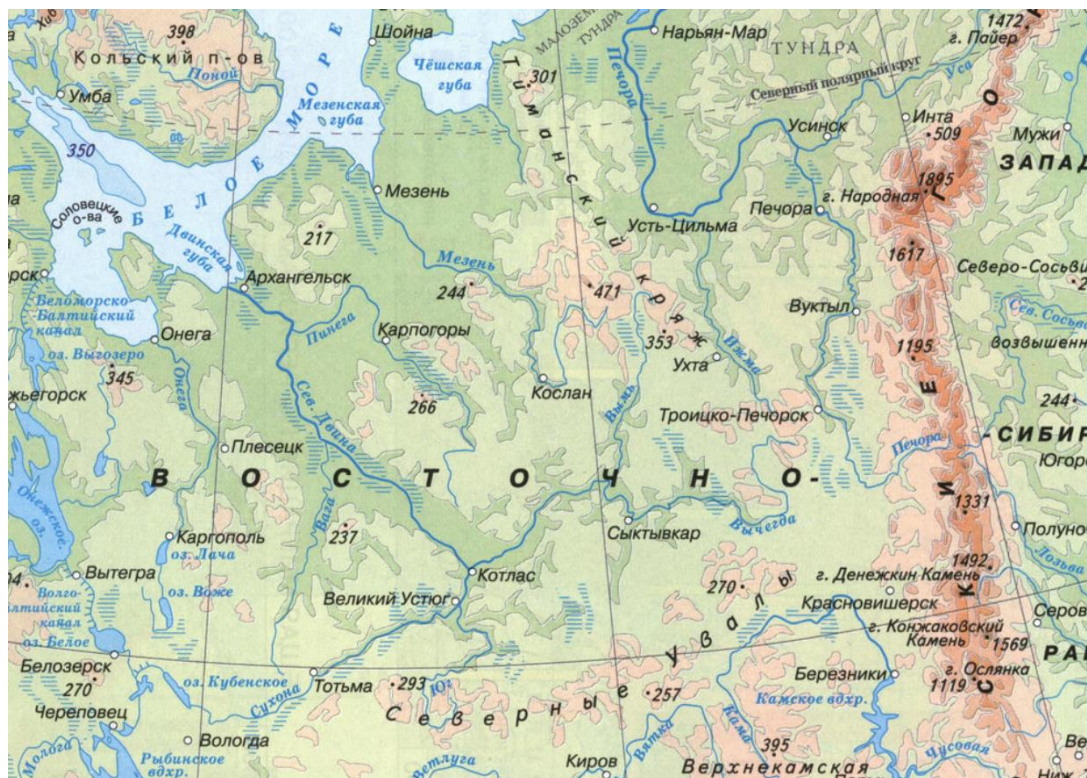


Рисунок 1.1 – Географическая карта Северного Края

1.2 Геологическое строение

Геологическое строение Северного края в пределах его равнинной части характеризуется глубоким залеганием кристаллического фундамента, сформированным в архее и протерозое, который перекрыт мощными толщами осадочных отложений, и преобладанием платформенных структур. Несмотря на глубокое погружение фундамента, разломы и глыбовая структура, являющиеся особенностями его строения, определяют характер чередования низменностей и плато, а также направление течения основных рек.

Перекрывают фундамент осадочные отложения, которые в верхнем своем горизонте, в основном относятся к перми, триасу и юре, к юрской, меловой и четвертичной системам. Карстопоявление, выражающееся в образовании специфических микроформ рельефа (в основном воронок) и заметно влияющее на режим поверхностных и подземных вод, связано с известняками каменноугольной системы, которые залегают вблизи дневной поверхности и являются сильно трещиноватыми, пещеристыми и кавернозными.

На равнинной части территории коренные породы до четвертичного возраста перекрыты плащом четвертичных отложений ледникового и послеледникового периода, в основном валунными суглинками ледниковой морены, а в пределах низменностей песчано-глинистыми осадками морских трансгрессий или древнеозерными и флювиогляциальными отложениями.

Верхняя морена и отложения приледниковых озер и потоков часто прикрыты сверху слоем покровных безвалунных суглинков, имеющих мощность 2–4 м и почти повсеместно являющихся материнской породой для почв. В горной части территории коренные отложения чуть прикрыты элювиально-делювиальным плащом четвертичных отложений. В межгорных долинах они покрыты более значительным слоем морены древних горно-долинных ледников, а в приречной полосе аллювиальными песчано-глинистыми и торфяными отложениями сверху. Породы представлены в основном валунными суглинками в предгорной полосе. Элювиальные и делювиальные отложения, которые образованы за счет разрушения местных коренных пород, заменяют их на склонах и вершинах парм.

1.3 Климат

Особенности климата определяются малым количеством солнечной радиации зимой, заметным в северной части воздействием северных морей, и интенсивным западным переносом воздушных масс.

Для Северного края характерна частая смена воздушных масс при прохождении циклонов со стороны Атлантики. С циклонами связана пасмурная погода с осадками, теплая и нередко с оттепелями зимой и прохладная летом. Циклоническая деятельность летом ослабевает, она наиболее развита зимой и осенью. [1]

В течение всего года погода имеет большую неустойчивость, так как происходит частная смена воздушных масс. На распределение температуры воздуха по территории сильно сказывается влияние морей. Зимой температура воздуха на побережьях морей выше, чем в удалении от моря, а летом – ниже. Влияние Атлантики ослабевает в глубь материка в направлении с запада на восток. Следовательно, с севера на юг и с запада на восток нарастает континентальность климата, что можно проследить по изменению годовой амплитуды температуры воздуха, полученной как разность между средней месячной температурой июля и января.

Совокупность перечисленных факторов приводит к короткому прохладному лету и длинной холодной зиме с устойчивым снежным покровом.

Зима продолжается пять – шесть месяцев на западе территории, шесть – семь месяцев на востоке. Характерны частые метели; зимой преобладают ветры южного, юго-западного направлений, средняя скорость которых 3 м/с, выпадает 110–200 мм осадков.

Лето продолжается три – четыре месяца в юго-западных районах, один – два месяца в северо-восточных. Заморозки возможны в любом из летних месяцев. Ветры преимущественно северного и северо-восточного направлений. Летом выпадает 400–500 мм осадков. Весна непродолжительная. Средняя

многолетняя температура воздуха с марта по май отрицательная и составляет пять градусов.

На рисунках 1.2–1.4 приведены хронологические графики среднемесячной температуры воздуха за апрель — июнь (1954–2022 годы) на станции Усть-Уса.

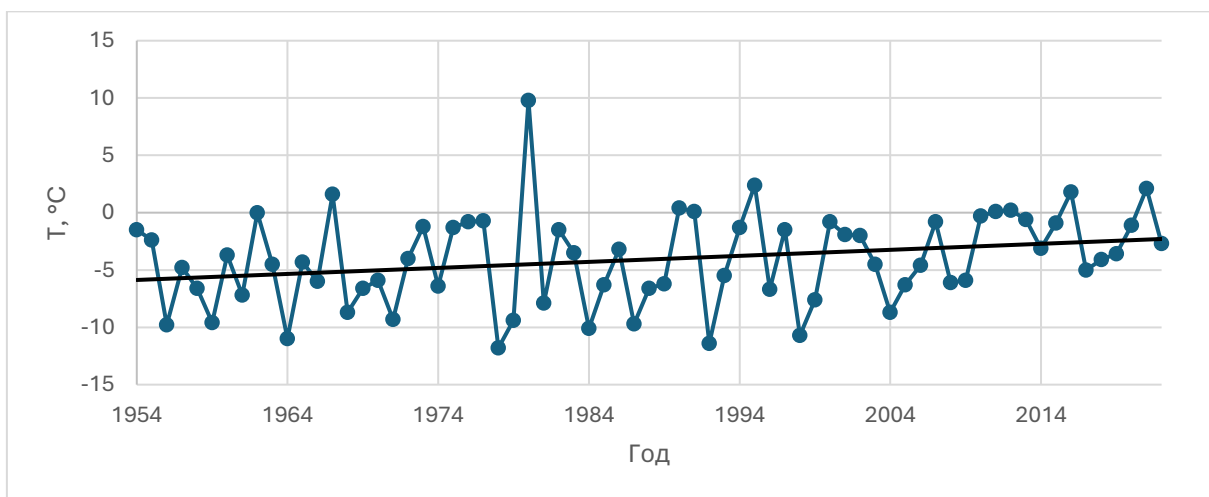


Рисунок 1.2 – Многолетняя среднемесячная температура апреля

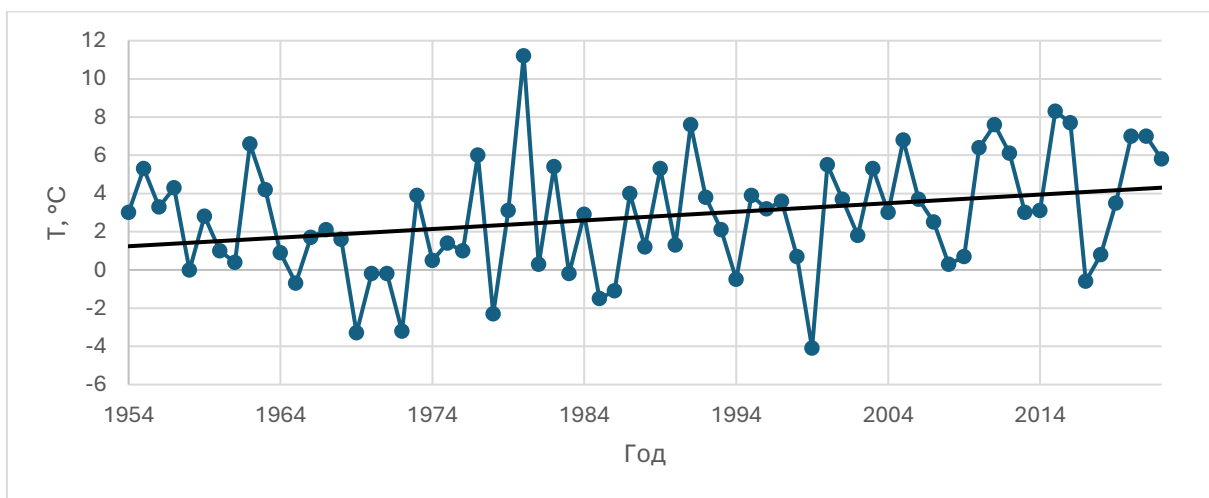


Рисунок 1.3 – Многолетняя среднемесячная температура мая

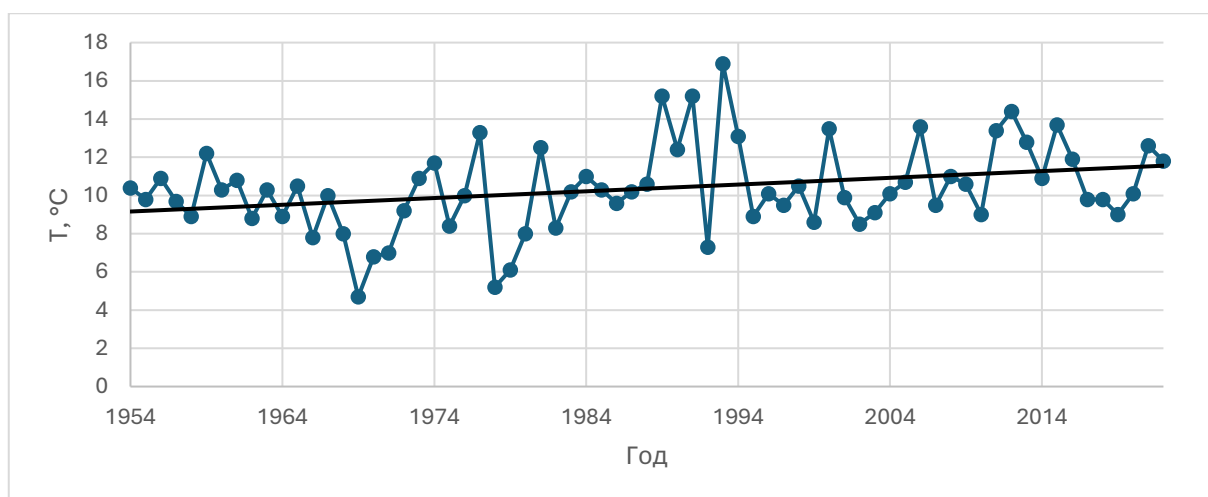


Рисунок 1.4 – Многолетняя среднемесячная температура июня

Как видно из рисунков, апрельская температура изменяется от минус 10–14 °С до 2–3 °С выше нуля. При этом среднемесячное значение температуры остается отрицательным на всем рассматриваемом временном промежутке. Среднемесячная температура в мае, как правило, является положительной, но в отдельные годы может достигать до 5 °С ниже нуля. Стоит отметить холодный период начала семидесятых - тогда среднемесячная температура достигала минус четырех градусов. Июньская температура наиболее стабильна и отличается намного меньшей амплитудой - до семидесятых годов она в среднем составляла плюс десять градусов. Так же как в апреле и мае можно выделить холодный период семидесятых. Начиная с восьмидесятых годов, аналогично всем другим рассмотренным месяцам начинается плавное повышение температуры, которая в максимумах достигает семнадцати градусов выше нуля.

На рассматриваемой территории самый холодный месяц считается – январь, на побережьях морей – февраль. Самый теплый месяц – июль.

1.4 Осадки

Рассматриваемая территория находится в зоне избыточного увлажнения. Годовое количество осадков изменяется с северо-востока на юго-запад от 550–600 до 750–800 мм.

Особенности распределения осадков по территории определяются рельефом. В течение года осадки выпадают неравномерно. Основная их часть (65–70 %) приходится на теплый период года.

Суточные максимумы в летнее время формируются за счет ливневых дождей, которые связаны с прохождением фронтов. В осенне-зимний период чаще наблюдаются длительные осадки обложного характера и слабой интенсивности. (Рисунок 1.5) [1]

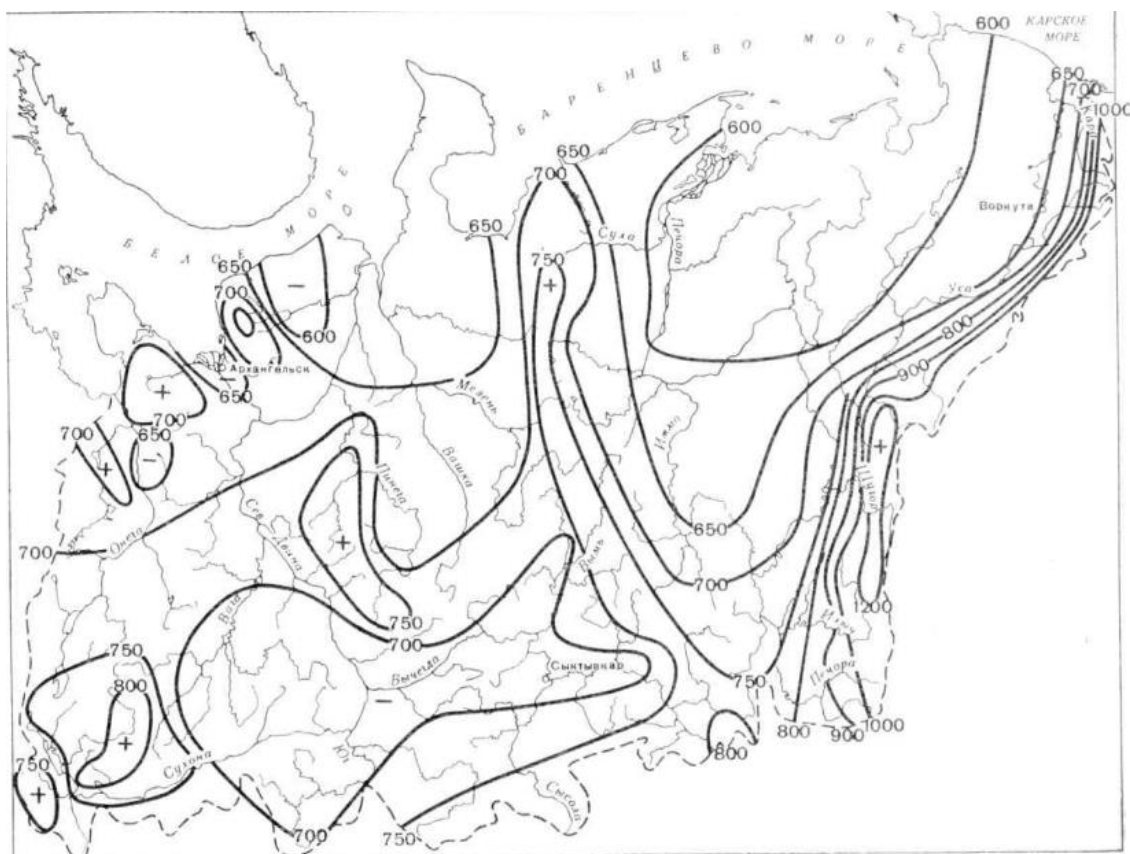


Рисунок 1.5 – Годовая сумма осадков, мм

На рисунке 1.6 приведен хронологический график сумм осадков за 1967–2022 годы.

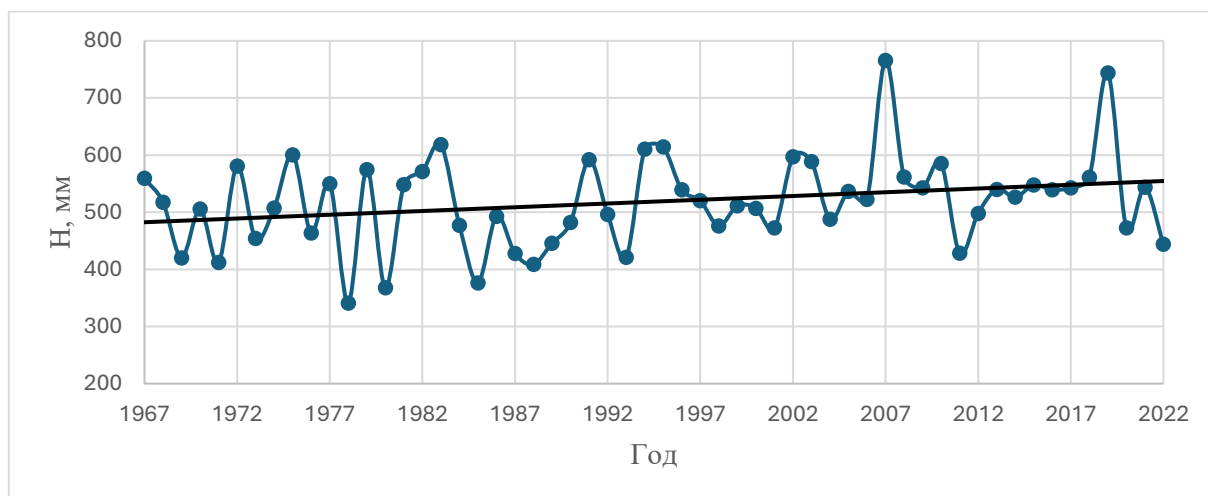


Рисунок 1.6 – Многолетний ход годовой суммы осадков с. Усть-Уса

Как видно из рисунка наблюдается незначительный тренд на увеличение сумм осадков.

1.5 Снежный покров

Снежный покров появляется в конце сентября – начале октября. Во второй-третьей декадах марта он достигает максимальной высоты. На защищенных лесом участках снежный покров составляет 75–85 см, на открытых участках на 10–20 см меньше. Большая часть территории освобождается от снега к третьей декаде апреля – первой декаде мая.

В снежном покрове запас воды к началу снеготаяния в лесу 140–200 мм, на полях и болотах 120–180 мм.

В конце октября – начале ноября начинается промерзание почво-грунтов, а в первой декаде мая происходит полное оттаивание на большей части территории.

Обычно наибольшая глубина промерзания наблюдается в феврале-марте и достигает 120–200 см, а на северо-восточной окраине до 240 см. В теплые зимы почва промерзает всего на 30–40 см.

1.6 Почвы и растительность

На большей части территории почвы супесчаные, подзолистые или суглинистые, изредка торфянистые или песчаные, к северу от полярного круга в тундрах – глеево-болотные. В изменении почвенного покрова обнаруживается широтная зональность: севернее 64 градусов широты почвы преимущественно глеево-подзолистые; южнее, до 60 градусов широты, - типичные подзолистые, на юго-западе периферии Северного края дерново-подзолистые. Из-за неоднородности геолого-геоморфологических условий, которые создают большую пестроту распределения почв, на равнине нарушается широтная зональность.

В лесной зоне преобладают подзолы на песках и глеево-подзолистые почвы на суглинках. Широко распространены обширные торфяники на плоских водоразделах.

В тундре почвы формируются на рыхлых наносах в условиях застоя влаги, недостатка кислорода, низких температур и медленного накопления органического вещества, в результате чего процесс почвообразования идет по типу болотно-глеевого. Горно-тундровые почвы занимают верхние части склонов, выше границы леса, вплоть до начала гольцовой зоны.

В основном растительный покров представлен хвойными лесами, а к северу от полярного круга – мхами, лесотундровым редколесьем и лишайниками в комбинации с кустарничковыми и кустарниковыми зарослями. Пояс горных гольцовых пустынь с пятнами лишайников, подушками мхов или кустиками травянистых растений (папоротников, некоторых цветковых) в расщелинах скал

простирается на плоских вершинах, иногда и по склонам наиболее высоких хребтов.

Леса в основном еловые с примесью сосны, березы, иногда и осины; существенное распространение имеют сосновые леса, которые чаще всего приурочены к обширным речным террасам. Рядом с северной границей таежной зоны наблюдается редколесье по причине большей заболоченности и более суровых климатических условий. На более теплой и сухой юго-западной окраине Северного края леса еловые или елово-пихтовые с примесью липы (подзона южной тайги).

В таежной зоне лесопокрываемость водосборов в основном более 80 %, местами до 95–99 %. Большинство безлесных площадей приходится на болота 5–10 %.

Болота чаще встречаются на северо-западе территории, где влажный климат, а земная поверхность представляет обширные низменности, хотя распространены повсеместно.

Болота в тундровой зоне обычно неглубокие, мохово-осоковые, преимущественно имеют реликтовый характер, одни из них подвергаются разрушению, другие связаны с современным болотообразовательным процессом.

Луговая растительность встречается в поймах рек и по расчисткам от леса и кустарника на склонах речных долин, распространена как в лесной, так и в тундровой зоне. Общая площадь, занятая луговой растительностью, незначительна (менее 0,3 %).

1.7 Гидрография

Речная сеть густая и развита довольно равномерно, что связано с практически однородными природными условиями на большей части

территории и избыточным увлажнением. Заметно разрежена она только в карстовых районах.

Всего в пределах Северного края насчитывается 138,5 тысяч рек, общая протяженность которых 521,2 тыс. км². Преобладают малые реки и ручьи длиной менее 10 км (93.6 % общего количества рек). Рек длиной более 100 км всего 280, а свыше 500 км — 14. Главные реки: Онега, Северная Двина, Мезень и Печора — берут начало близ южных границ Северного края, текут в северо-западном направлении и впадают в Белое и Баренцево моря. Северная Двина и Печора являются крупнейшими судоходными реками. Их основные притоки — Пинега, Вага, Сухона, Вычегда, Пинега, Ижма, Юг, Уса — так же являются крупными речными магистралями.

Широкие пойменные долины с террасированными склонами характерны для большинства равнинных рек. Течение их спокойное; длинные плесы чередуются с песчаными перекатами; в верховьях рек перекаты нередко гравелисто-галечные, иногда встречаются небольшие пороги, которые образованы скоплением в русле валунов, вымытых из морены или выходами твердых коренных пород.

В районах сосредоточения озер реки образуют озерно-речные системы. На западной окраине Северного края они имеют значительное распространение. Всего насчитывается около 232 тысяч озер общей площадью зеркала 13,8 тыс. км². Три самых крупных — Лача, Воже и Кубинское, расположены близко друг к другу в верховьях рек Онеги и Сухоны.

Большинство озер ледникового происхождения; наиболее крупные из них занимают тектонические впадины, сильно преобразованные процессами эрозии и аккумуляции. [2]

Болота распространены по территории неравномерно и занимают около 6 % площади. Наиболее часто встречаются верховые болота, которые питаются атмосферными осадками. [6]

1.8 Подземные воды

В основном распространены порово-пластовые подземные воды, которые содержатся в рыхлых песчано-глинистых четвертичных отложениях или в отложениях мезозойского и палеозойского возраста. Грунтовые воды – безнапорные, в сглаженном виде их поверхность повторяет очертания рельефа и местами смыкается с болотными водами во впадинах между холмами и грядами и на низменных плоских и слабоволнистых равнинах.

Как правило, подземные водоразделы совпадают с поверхностными. Питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков. Сток направлен к местам разгрузки.

Запасы подземных вод интенсивно пополняются весной с началом интенсивного снеготаяния и с исчезновением слоя сезонной мерзлоты, сдерживающего инфильтрацию. В засушливые периоды летом и зимой они в основном расходуются.

Амплитуда колебаний уровня на плоских междуречьях 1–3 м, вблизи мест разгрузки до 5–10 м.

1.9 Водный режим рек

Реки Северного края относятся к рекам преимущественно снегового питания. Их водный режим характеризуется высоким весенним половодьем и низкой зимней меженью. В летне-осенний период часто проходят дождевые паводки, особенно частые осенью, поэтому водность рек в этот период значительно больше, чем в зимний сезон.

По территории наблюдается закономерность в распределении годового стока воды, отвечающая ее климатическим и гипсометрическим особенностям. В пределах равнинной территории он несколько уменьшается с севера на юг,

несмотря на некоторое увлечение в том же направлении годовой суммы осадков, в соответствии с увеличением испарения с поверхности водосборов.

Отмеченная закономерность, имеющая зональный характер, местами нарушается влиянием рельефа: сток заметно больше на плато и возвышенностях, чем на соседних низменностях.

На юго-западе рассматриваемой территории весеннее половодье обычно начинается 10–15 апреля, в центральной ее части 20–30 апреля, а на юго-востоке 10–15 мая. В годы с ранней или сильно запаздывающей весной сроки наступления половодья сдвигаются на 20–30 дней.

В период половодья наблюдаются максимальные расходы воды и проходит 40–60 % годового стока. Наибольшая часть суммарного стока за весну приходится на талые снеговые воды (60–80 %), доля дождевого стока обычно составляет 10–30 %, а грунтового 5–10 % общего объема стока за половодье.

Формирование высоких половодий в основном определяется величиной снегозапасов и дружностью снеготаяния. Продолжительность половодья 1,5–2 месяца; на больших реках с озерным регулированием 2,5–3 месяца.

Дождевые паводки летом обычно одиночные, продолжительностью 1–2 недели, осенью проходят сериями, длящимися 3–6 недель и больше. Вызываемые ими подъемы уровня воды ниже весенних, но в годы с относительно маловодными половодьями могут даже превышать весенние подъемы.

По мере истощения запасов подземных вод сток воды уменьшается к концу зимы, минимальным бывает обычно в марте. Низшие уровни воды чаще наблюдаются в самом начале периода до установления ледяного покрова. При ледоставе уровни повышаются за счет подпорных явлений.

Глава 2. Многолетние колебания речного стока разнотипных рек

2.1 Состояние изученности

Исследуемые реки находятся в Республике Коми и являются притоками Печоры. Река Уса равнинная, образуется слиянием Большой Усы и Малой Усы, и является крупнейшим притоком. Берега в верховьях высокие, скалистые; в среднем и нижнем течении, в основном, низменные и сильно заболоченные. Река Щугор, является горной, отличается исключительной чистотой и прозрачностью воды. Практически на всем своем протяжении река мелководна, встречаются пороги. Карта рассматриваемого участка приведена на рисунке 2.1.

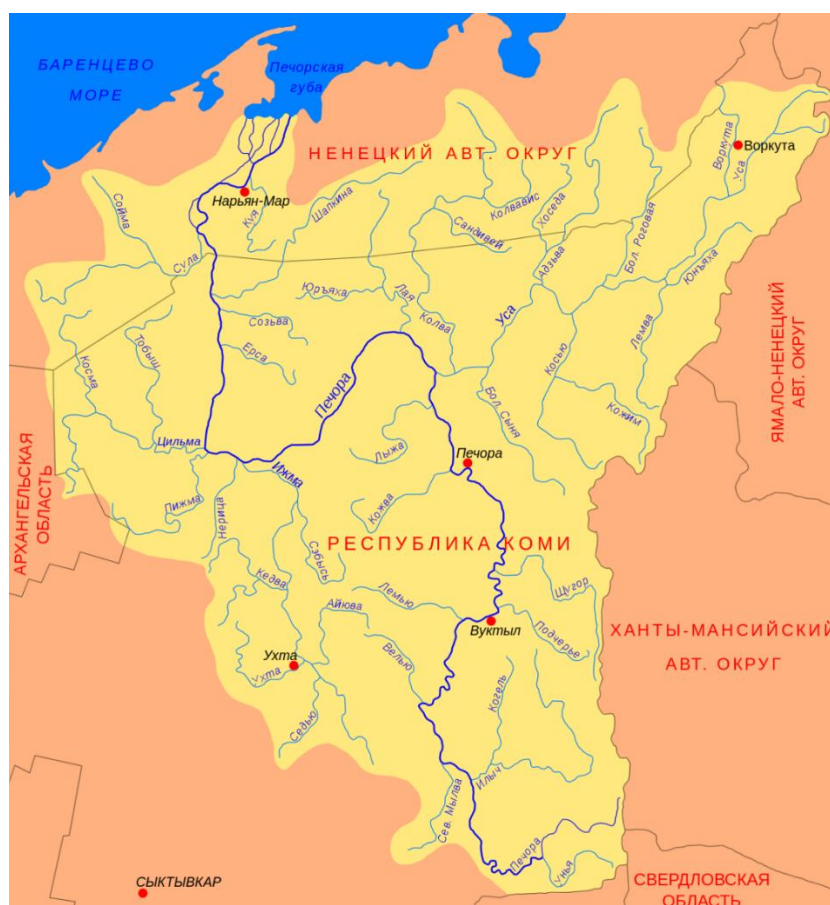


Рисунок 2.1 – Карта района исследований

Реки данного района, в соответствии с классической классификацией М. И. Львовича, относятся к рекам преимущественно снегового питания, которому придается примерно 50–80 % годового стока. Их водный режим характеризуется высоким весенним половодьем и низкой зимней меженью. В летне-осенний период нередко проходят дождевые паводки, особенно частые осенью. Водность рек в летне-осенний период благодаря этому гораздо больше, чем в зимний. [5]

В качестве исходной информации для количественной оценки в настоящей работе использованы средние месячные расходы воды разнотипных рек Северного края, горной реки Щугор и равнинной реки Уса.

2.2 Квантильный анализ многолетних колебаний речного стока

Межгодовая (многолетняя) изменчивость стока традиционно анализируется по рядам среднегодовых и экстремальных расходов и характеризуется наличием многоводных и маловодных лет. Для характеристики «нормы» и изменчивости годового стока используются среднегодовые расходы.

Гидрологические ряды необходимо проверить на однородность по двум параметрическим критериям – Фишера и Стьюдента. Оба критерия относятся к категории стандартных и рекомендуются в большинстве нормативных документов в качестве официального теста на однородность. Критерий Стьюдента позволяет проверить ряд по среднему значению, критерий Фишера используется для проверки на однородность гидрологического ряда по дисперсии. [8]

Проверка рядов исходных данных анализируемых рек показала, что все ряды однородны. (Таблицы 2.1–2.2)

Таблица 2.1 – Проверка ряда на однородность реки Уса

Критерий	$t_{\text{крит}}$	$t_{\text{стат}}$	Результат	
Стьюдент	1,99	1,48	$t_{\text{крит}} > t_{\text{стат}}$	Ряд однороден
Фишер	2,05	1,65	$F_{\text{крит}} > F$	Ряд однороден

Таблица 2.2 – Проверка ряда на однородность реки Щугор

Критерий	$t_{\text{крит}}$	$t_{\text{стат}}$	Результат	
Стьюдент	2,01	1,79	$t_{\text{крит}} > t_{\text{стат}}$	Ряд однороден
Фишер	2,60	1,94	$F_{\text{крит}} > F$	Ряд однороден

Анализ хронологических графиков хода среднегодовых расходов воды (Рисунки 2.2, 2.3), для равнинной рассматриваемой реки – р. Уса – с. Петрунь, так и для горной реки – р. Щугор – д. Мичабичевник показывает, что на протяжении всего периода наблюдений, начиная с 1933 года, прослеживается небольшой тренд на увеличение.

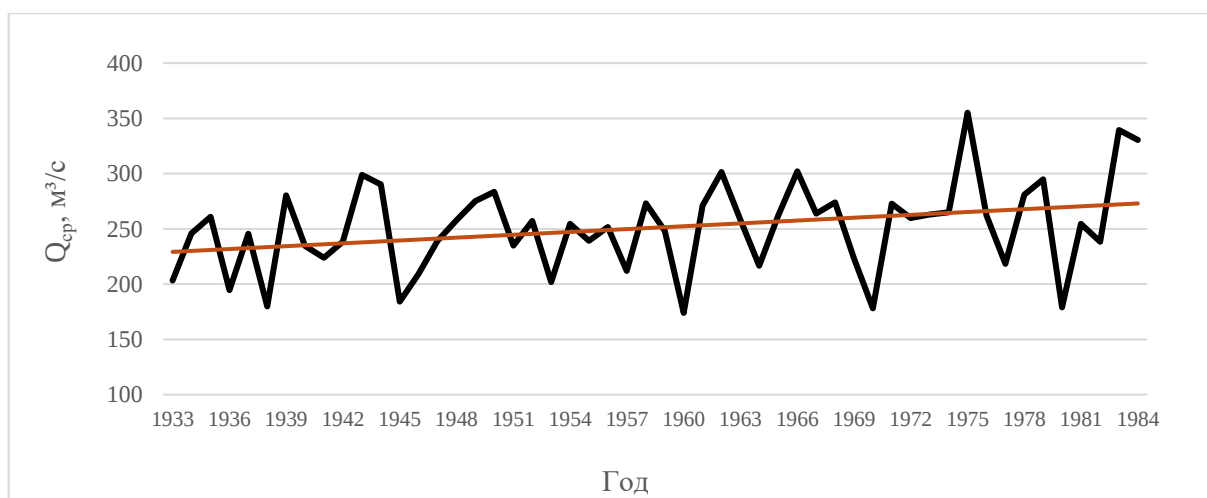


Рисунок 2.2 – Хронологический график среднегодовых расходов р. Щугор

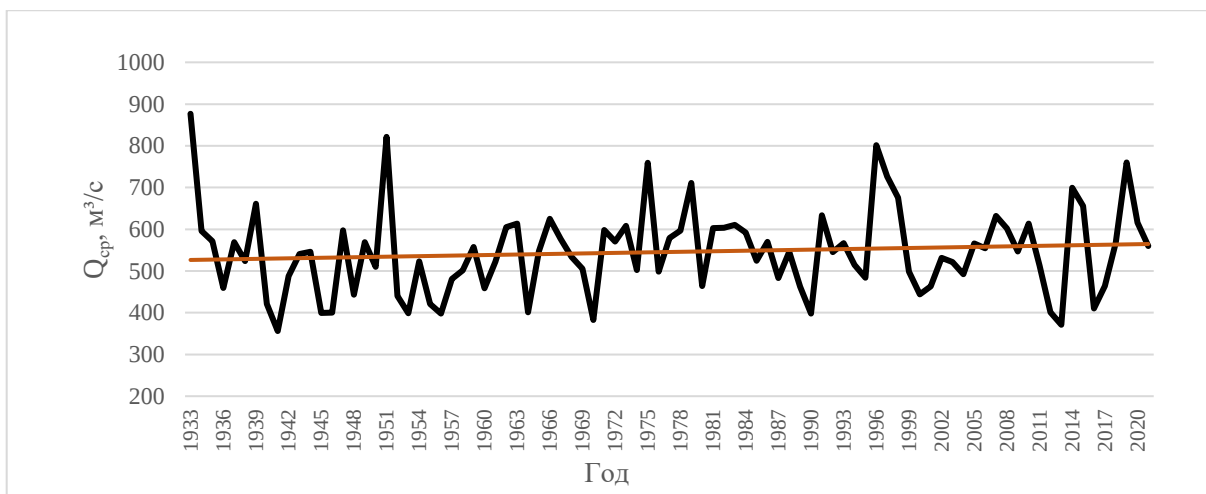


Рисунок 2.3 – Хронологический график среднегодовых расходов р. Уса

Квантильный анализ заключается в нахождении и построении на графиках реализаций пяти расчетных квантилей $Q_{0,25}$, $Q_{0,50}$, $Q_{0,75}$, $Q_{\text{нижняя}}$, $Q_{\text{верхняя}}$, определяющие зоны многоводных, экстремально-многоводных, маловодных, экстремально-маловодных и групп лет. Многоводными или маловодными годами будут считаться те годы, в которых значения стока выходят за квантили $Q_{0,75}$ и соответственно $Q_{0,25}$. Следовательно, годы, когда значения расходов выходят за верхнюю ($Q_{\text{верхняя}} = Q_{0,75}$) и нижнюю ($Q_{\text{нижняя}} = Q_{0,25}$) границы, определяемые по следующим формулам:

$$Q_{\text{верхняя}} = Q_{0,75} + 1,5Q$$

$$Q_{\text{нижняя}} = Q_{0,25} - 1,5Q$$

Где Q – интерквантильное состояние определяется по следующей формуле ($Q = Q_{0,75} - Q_{0,25}$)

Для анализа особенностей многолетнего хода колебаний водности использовались данные наблюдений среднегодовых расходов воды рек (равнинной р. Уса и горной р. Щугор).

Ранжируем ряды рек по возрастанию (Таблицы 2.3, 2.4)

Таблица 2.3 – Ранжированные ряды среднегодовых расходов реки Уса

№	год	Q, м³/с	№	год	Q, м³/с
1	1941	356	46	1944	546
2	2013	371	47	2009	547
3	1970	383	48	1965	547
4	1956	398	49	2006	555
5	1990	398	50	1959	558
6	1953	399	51	2021	560
7	1945	399	52	2005	566
8	1946	400	53	1993	567
9	2012	401	54	2018	568
10	1964	401	55	1937	569
11	2016	410	56	1949	569
12	1940	421	57	1986	570
13	1955	421	58	1972	570
14	1952	440	59	1935	572
15	1948	443	60	1967	577
16	2000	444	61	1977	579
17	1960	458	62	1984	592
18	1936	459	63	1934	596
19	1989	463	64	1978	596
20	2001	463	65	1947	598
21	1980	464	66	1971	598
22	2017	464	67	2008	602
23	1957	481	68	1981	603
24	1987	483	69	1982	603
25	1995	484	70	1962	605
26	1942	488	71	1973	608
27	2004	493	72	1983	610
28	1976	498	73	1963	613
29	1999	499	74	2010	614
30	1958	502	75	2020	616
31	1974	503	76	1966	625
32	1969	505	77	2007	632
33	1950	510	78	1991	634
34	2011	513	79	2015	655
35	1994	515	80	1939	661
36	2003	522	81	1998	676
37	1961	522	82	2014	699
38	1954	523	83	1979	711
39	1938	524	84	1997	726
40	1985	524	85	1975	759
41	2002	532	86	2019	760
42	1968	534	87	1996	801
43	1943	541	88	1951	821

№	год	Q, м³/с	№	год	Q, м³/с
44	1992	545	89	1933	877
45	1988	546			

Таблица 2.4 – Ранжированные ряды среднегодовых расходов реки Щугор

№	год	Q, м³/с	№	год	Q, м³/с
1	1960	174	27	1952	257
2	1970	178	28	1948	258
3	1980	179	29	1963	258
4	1938	180	30	1972	260
5	1945	184	31	1935	261
6	1936	195	32	1965	262
7	1953	202	33	1976	262
8	1933	203	34	1973	263
9	1946	209	35	1967	264
10	1957	212	36	1974	265
11	1964	217	37	1961	271
12	1977	218	38	1971	273
13	1969	223	39	1958	273
14	1941	224	40	1968	274
15	1940	235	41	1949	275
16	1951	235	42	1939	280
17	1982	238	43	1978	281
18	1942	238	44	1950	284
19	1955	239	45	1944	290
20	1947	239	46	1979	295
21	1937	245	47	1943	299
22	1934	246	48	1962	301
23	1959	248	49	1966	302
24	1956	252	50	1984	330
25	1981	255	51	1983	340
26	1954	255	52	1975	355

Расчет параметров для построения графика многолетней изменчивости расходов воды.

Р. Уса – с. Петрунь

$$x_{0,5} = 0,5 \cdot \left(x_{\frac{N}{2}} + x_{\frac{N}{2+1}} \right) = 546 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$x_{0,25} = 0,5 \cdot \left(x_{\frac{N_1}{2}} + x_{\frac{N_1}{2+1}} \right) = 464 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$x_{0,75} = 0,5 \cdot \left(x_{\frac{N_2}{2}} + x_{\frac{N_2}{2+1}} \right) = 602 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$Q = x_{0,75} - x_{0,25} = 138 \text{ м}^3/\text{с}$$

Границы:

$$x_B = x_{0,75} + 1,5Q = 809 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$x_H = x_{0,25} - 1,5Q = 257 \text{ м}^3/\text{с}$$

Р. Щугор – д. Мичабичевник

$$x_{0,5} = 0,5 \cdot \left(x_{\frac{N}{2}} + x_{\frac{N}{2+1}} \right) = 255 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$x_{0,25} = 0,5 \cdot \left(x_{\frac{N_1}{2}} + x_{\frac{N_1}{2+1}} \right) = 223 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$x_{0,75} = 0,5 \cdot \left(x_{\frac{N_2}{2}} + x_{\frac{N_2}{2+1}} \right) = 273 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$Q = x_{0,75} - x_{0,25} = 50 \text{ м}^3/\text{с}$$

Границы:

$$x_B = x_{0,75} + 1,5Q = 348 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$x_H = x_{0,25} - 1,5Q = 148 \text{ м}^3/\text{с}$$

На рисунках 2.4 и 2.5 приведены квантильные диаграммы среднегодовых расходов рассматриваемых рек.

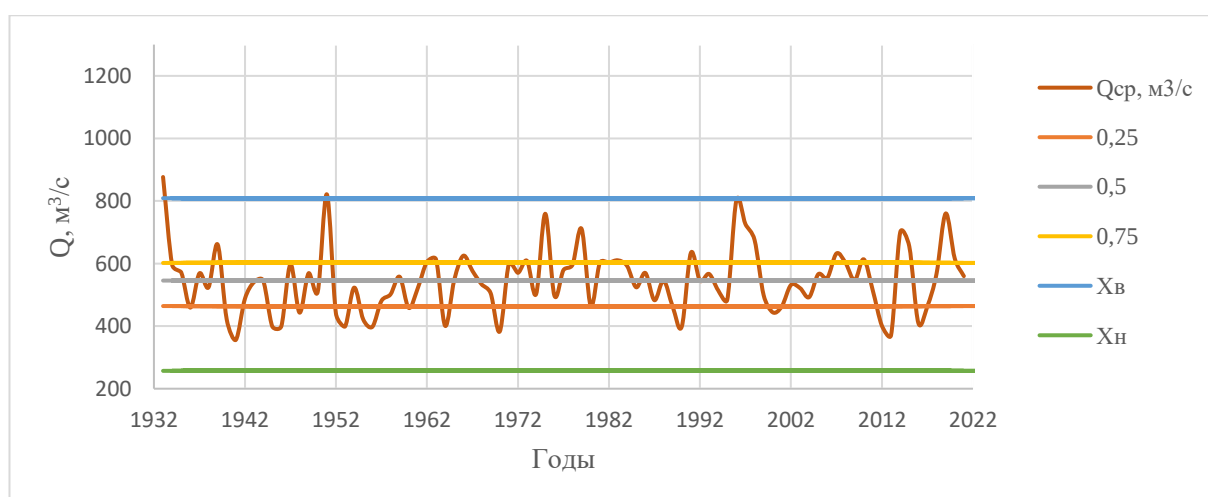


Рисунок 2.4 – Квантильная диаграмма среднегодовых расходов р. Уса

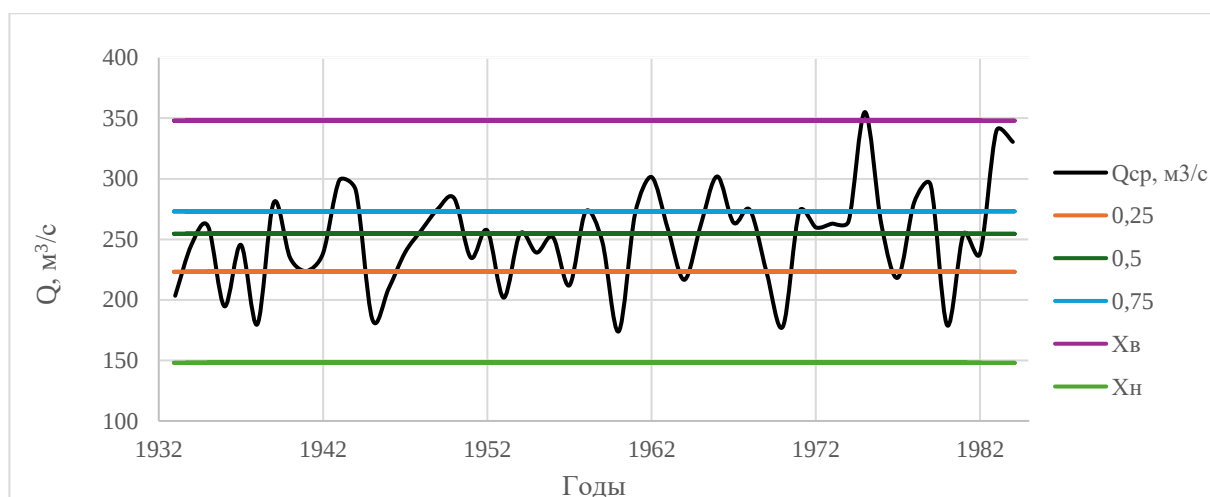


Рисунок 2.5 – Квантильная диаграмма среднегодовых расходов р. Щугор

Квантильный анализ среднегодовых расходов анализируемых рек показал, что экстремально маловодных лет не наблюдалось на обеих реках. На равнинной реке Уса 1933 и 1951 годы и на горной реке Щугор 1975 год стали экстремально многоводными (Рисунки 2.4–2.5). Сведения о многоводных и маловодных годах, которые в стоке рек наблюдались как разрозненно, так и группировались в фазы и циклы продолжительностью от двух до трех-четырёх лет приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Сведения о многоводных и маловодных годах в стоке рек

Многоводные годы	
р. Уса (1933–2021)	р.Щугор (1933–1984)
1939	1939
1951	1943–1944
1962–1963	1949–1950
1966	1958
1973	1962
1975	1966
1979	1968
1981–1983	1975
1991	1978–1979
1996–1998	1983–1984
2007–2008	
2010	
2014–2015	
2019–2020	

Экстремально многоводные годы	
1933	1975
1951	
Маловодные годы	
1936	1933
1940–1941	1936
1945–1946	1937–1938
1948	1945–1946
1952–1953	1953
1955–1956	1955–1957
1960	1959–1960
1964	1964
1970	1969–1970
1980	1977
1989–1990	1980
2000–2001	
2012–2013	
2016–2017	

Анализ таблицы 2.5 показывает, что синхронные многоводные условия на двух рассматриваемых реках наблюдались в 1939, 1962, 1966, 1975, 1979, 1983 годах. Синхронные маловодные условия наблюдались: 1936, 1945–1946, 1953, 1955–1956, 1960, 1964, 1970, 1980. На равнинной реке Уса за весь период наблюдений зафиксировано 2 экстремально многоводных года – 1933 и 1951, на горной реке Щугор таким был 1975 год.

Гидрограф многоводных и маловодных лет реки Уса представлен на рисунках 2.6–2.7.

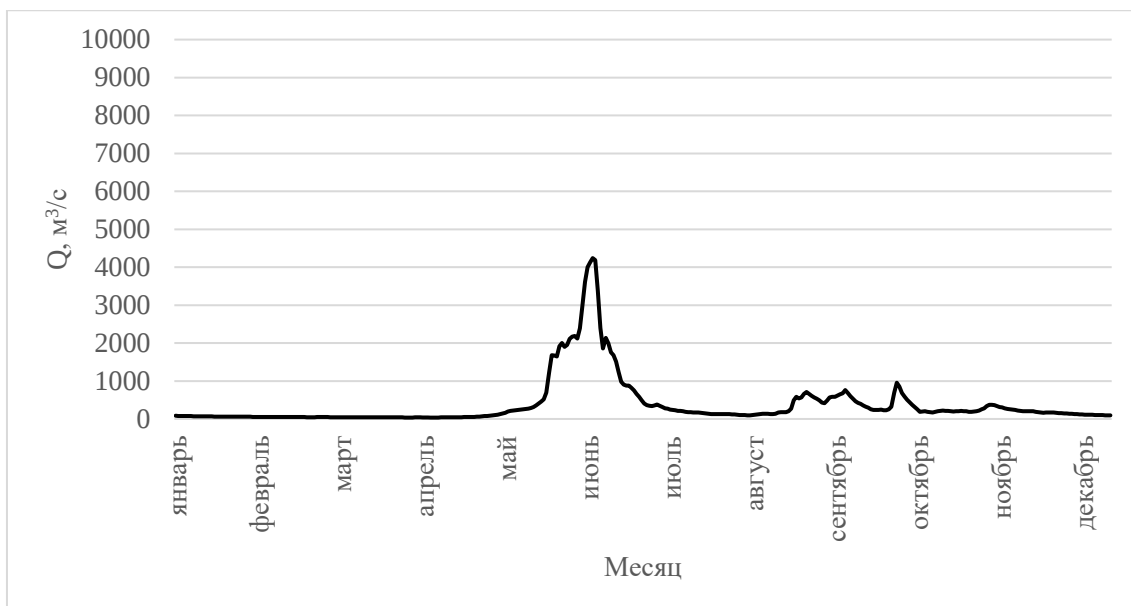


Рисунок 2.6 – Гидрограф реки Уса за маловодный год (2013 г.)

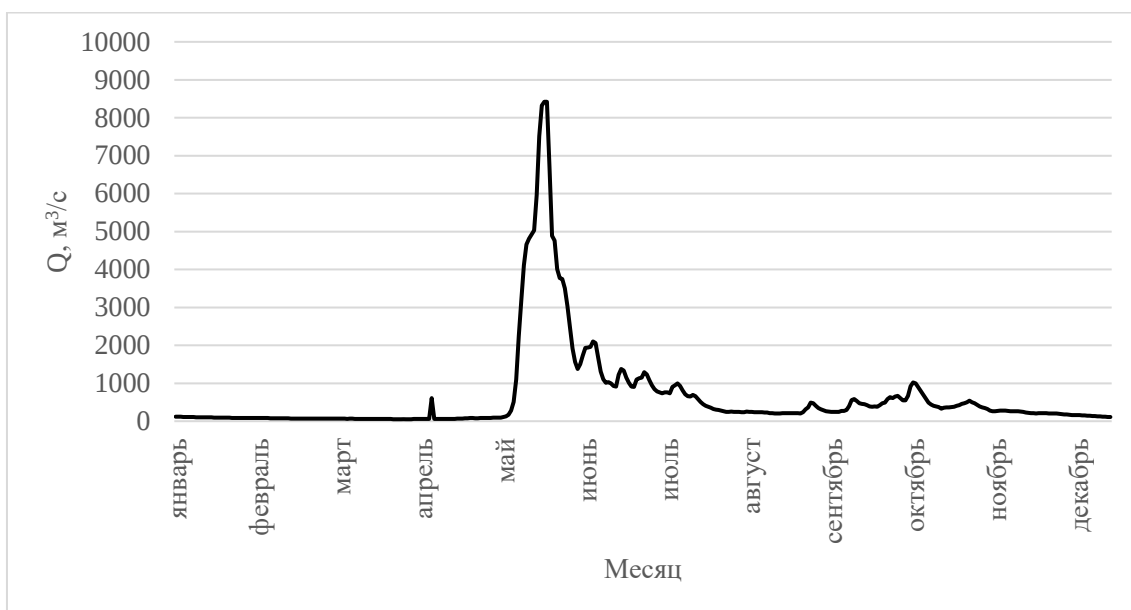


Рисунок 2.7 – Гидрограф реки Уса за многоводный год (2020 г.)

2.3 Выделение трендов фильтром Баттерворта

Для анализа временных рядов с целью выделения периодов локальной нестационарности (повышение или понижение значений на отрезках в несколько лет или десятилетий) используется фильтрация. Различают фильтрации низко и высокочастотные. При низкочастотной фильтрации временной ряд преобразуется путем исключения высокочастотных составляющих. В данной работе применяется цифровая низкочастотная фильтрация, анализируя многолетнюю изменчивость гидрометеорологических величин. Выбор обусловлен тем, что данная фильтрация обладает такими преимуществами как простота вычисления коэффициентов передаточной функции фильтра и большая крутизна амплитудно-частотной характеристики вблизи частоты среза.

На рисунках 2.8, 2.9 представлены результаты низкочастотной фильтрации Баттерворта среднегодовых расходов воды рассматриваемых рек.

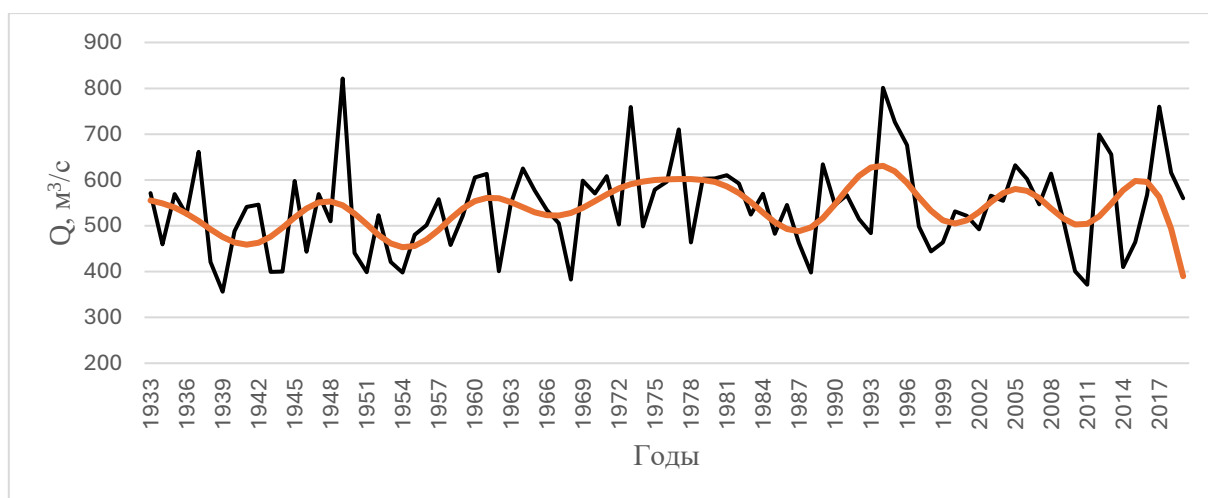


Рисунок 2.8 – Реализация среднегодовых расходов воды реки Уса

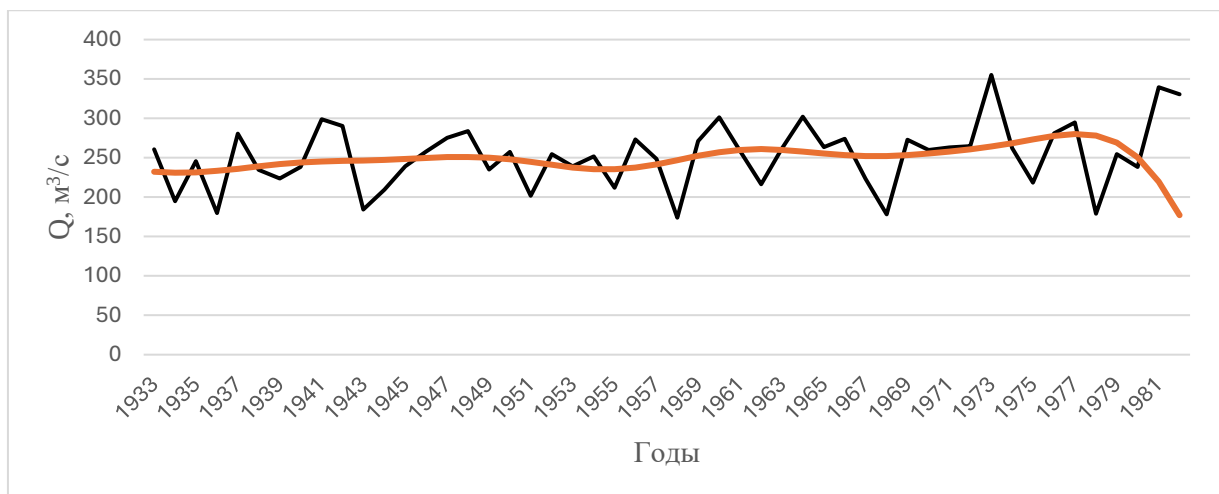


Рисунок 2.9 – Реализация среднегодовых расходов воды реки Щугор

Можно заметить, что на рисунке 2.8 периоды повышения и понижения значений формируют циклы изменения водности продолжительностью от 9 до 18 лет.

На рисунке 2.9 слабо выражены циклы, расходы стационарны.

Глава 3. Внутригодовой ход речного стока разнотипных рек

3.1 Особенности внутригодового хода речного стока

Внутригодовое распределение стока необходимо знать в случаях, когда какая-либо хозяйственная деятельность может быть ограничена максимальным или минимальным характеристиками стока, или от величины характеристик стока зависит экономическая эффективность хозяйственной деятельности. Примерами могут служить ГЭС, водозаборы крупных городов, судоходство и др. Важно знать внутригодовое распределение стока и в экологических целях, например, для расчета предельно допустимого сброса загрязняющих веществ. Сведения необходимы при проектировании водохранилищ сезонного, месячного или декадного регулирования, для определения гарантированных минимальных расходов воды, для оценки баланса притока и потребления воды. По внутригодовому распределению стока устанавливается гарантированная отдача воды из водохранилищ. Данные используются при разработке мероприятий по борьбе с наводнениями, при осушении болот и заболоченных земель, при орошении и разработке проектов промышленного и хозяйственного водоснабжения.

Характер распределения стока внутри года зависит от водного режима реки, который в свою очередь определяется типом ее питания. Различные виды классификации рек по типу питания и характеру водного режима показывают, что водный режим рек формируется под влиянием климатических факторов и факторов подстилающей поверхности. Осадки, испарение и температура воздуха являются основными климатическими факторами, определяющими фазу стока, а также их распределение по сезонам года. [7]

Отрезки реализаций средних месячных расходов анализируемых рек за произвольно взятое десятилетие приведены на рисунке 3.1–3.2.

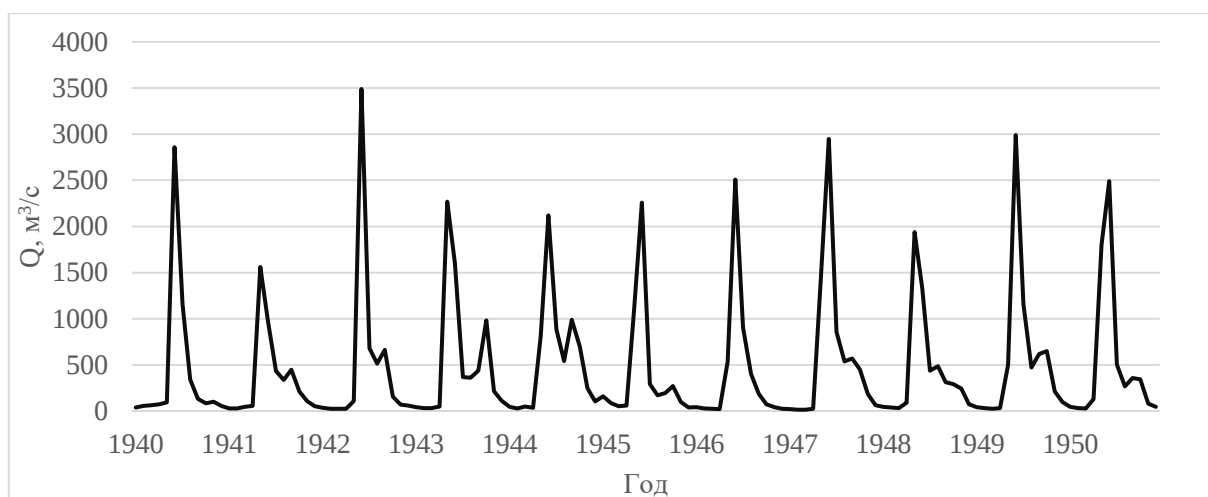


Рисунок 3.1 – Гидрограф реки Уса за произвольно взятое десятилетие

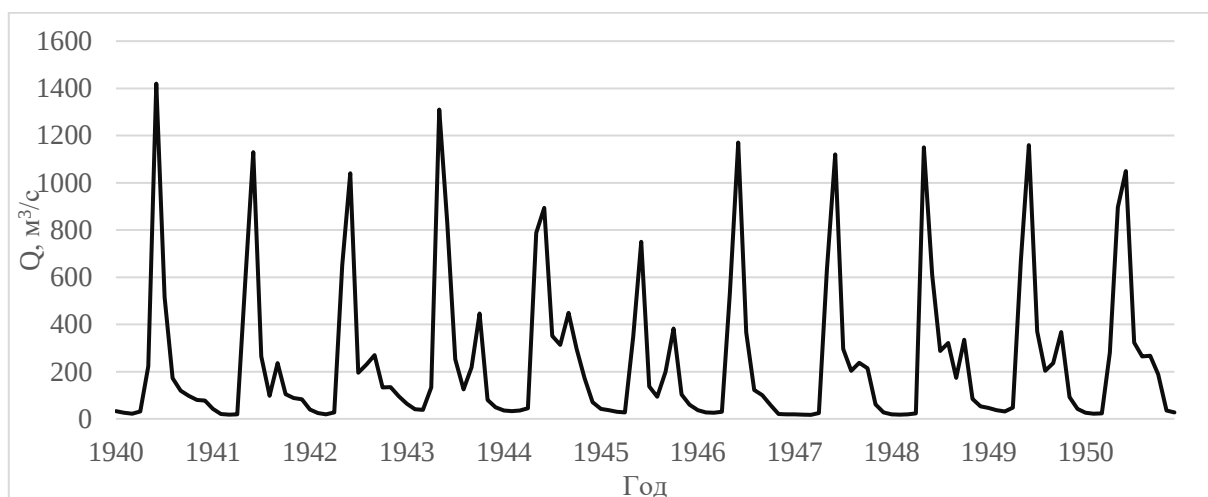


Рисунок 3.2 – Гидрограф реки Щугор за произвольно взятое десятилетие

Как видно из рисунков в стоке рек Уса и Щугор ежегодно наблюдаются основные фазы водного режима: весеннее половодье, дождевые паводки, летняя и зимняя межень. При этом на равнинной реке весеннее половодье, как правило, однопиковое. На горной реке половодье чаще всего имеет многовершинную форму. Дождевые паводки летом обычно одиночные, осенью проходят сериями. К концу зимы по мере истощения запасов подземных вод уменьшается сток воды, минимальным бывает обычно в марте.

3.2 Метод реального года

Определение внутригодового распределения стока методом реального года основано на выборе расчетного водохозяйственного года из числа фактических с использованием принципа наибольшей близости вероятностей превышения стока за водохозяйственный год, лимитирующий период, лимитирующий сезон и лимитирующий месяц к расчетной вероятности. Сравнительное однообразие климата позволило принять общие границы сезонов для рассматриваемых рек Северного края. В весенний сезон включены май-июль. Лимитирующий маловодный период (межень) принят с августа по апрель, а лимитирующий сезон – с декабря по апрель (зимний сезон). [8]

Расчетное распределение стока в этом методе вычисляют путем умножения месячных долей стока на годовой объем стока расчетной вероятности превышения, определяемый по аналитической кривой обеспеченности. [9]

На рисунках 3.3 и 3.4 представлены гидрографы среднемесячных расходов воды рассматриваемых рек, которые помогают определить сезоны и периоды.

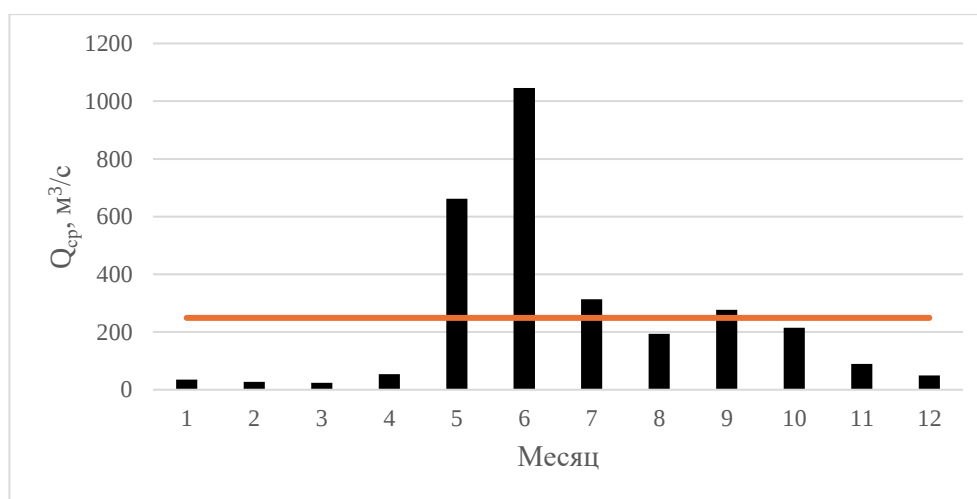


Рисунок 3.3 – Гидрограф среднемесячных расходов воды реки Щугор

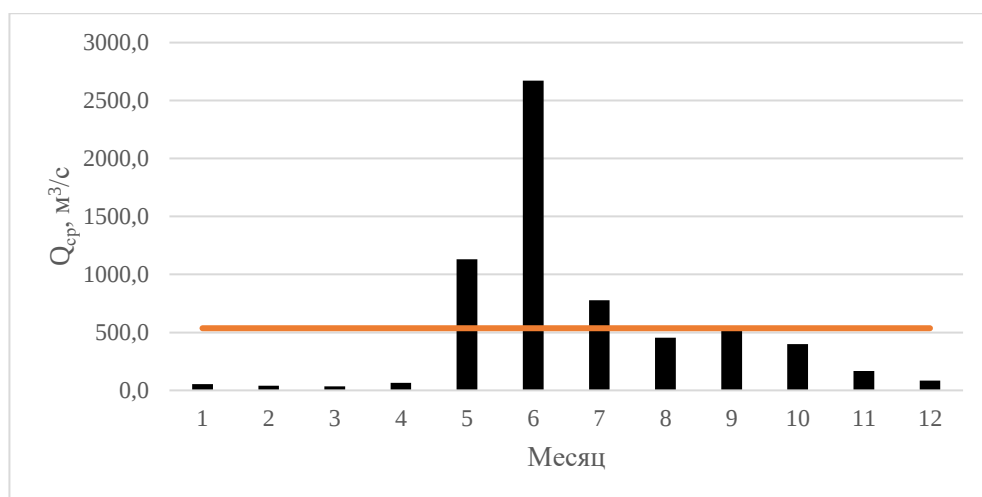


Рисунок 3.4 – Гидрограф среднемесячных расходов воды реки Уса

Далее производится расчет месячных сумм расходов за водохозяйственный год, лимитирующий период, лимитирующий сезон, не лимитирующий период и не лимитирующий сезон.

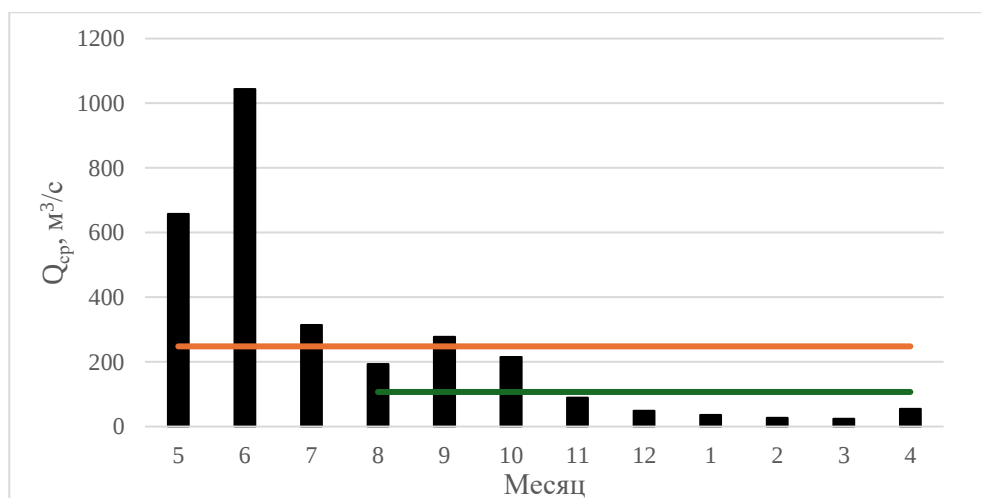


Рисунок 3.5 – Гидрограф средних месячных расходов воды за водохозяйственный год реки Щугор

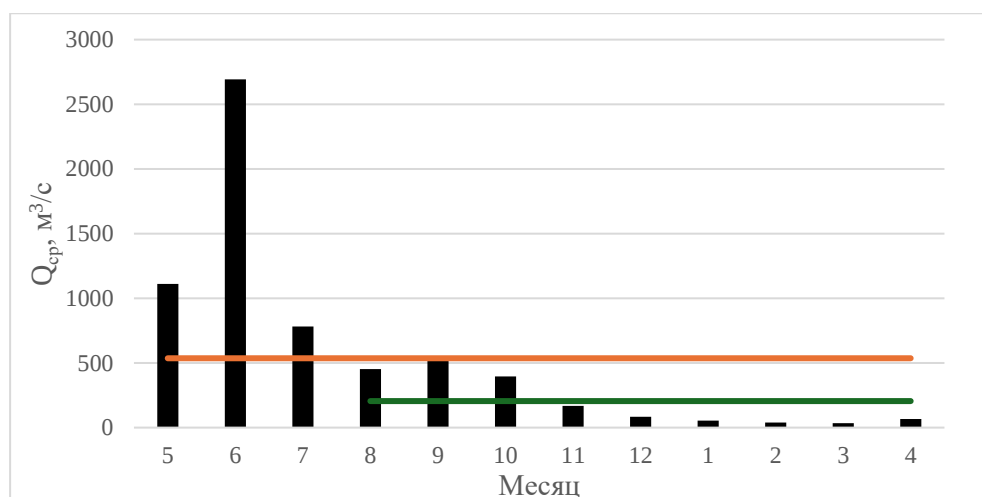


Рисунок 3.6 – Гидрограф среднемесячных расходов воды за водохозяйственный год реки Уса

По рисункам 3.5, 3.6 можно определить маловодные и многоводные месяцы.

Составляется таблица ранжированных сумм месячных расходов за год, лимитирующий период и лимитирующий сезон, с указанием водохозяйственного года, когда эта сумма наблюдалась, выделяется маловодная группа, для которой обеспеченность превышает значение 66.7 %. [3]

В маловодной группе выбирается реальный водохозяйственный год, для которого обеспеченность сумм месячных расходов за водохозяйственный год, лимитирующий период и лимитирующий сезон наиболее близка к расчетной обеспеченности. Для объективного выбора расчетного года используется критерий ΔP :

$$\Delta P = (P_{\Gamma} - P_{90\%})^2 + (P_{\text{ЛП}} - P_{90\%})^2 + (P_{\text{ЛС}} - P_{90\%})^2 \quad (1)$$

Таблица 3.1 – Расчет критерия ΔP для маловодной группы лет для реки Щугор

водохозяйственный год	обеспеченность				ΔP
	расчетная	водохозяйственный год	лимитирующий период	лимитирующий сезон	
1936–1937	90	84,6	76,9	67,3	716,1
1938–1939	90	94,2	92,3	98,1	88,5
1967–1968	90	90,4	98,1	96,2	104,2

Таблица 3.2 – Расчет критерия ΔP для маловодной группы лет для реки Уса

водохозяйственный год	обеспеченность				ΔP
	расчетная	водохозяйственный год	лимитирующий период	лимитирующий сезон	
1960–1961	90	77,5	86,5	71,9	496,1
1956–1957	90	88,8	68,5	89,9	463,7
1941–1942	90	94,4	80,9	79,8	206,2
1957–1958	90	69,7	71,9	80,9	822,5

В качестве расчетного года принимается 1938–1939 водохозяйственный год для реки Щугор и 1941–1942 год для реки Уса, для которых значения ΔP считается минимальным. Эти водохозяйственные годы принимают в качестве моделей относительного внутригодового распределения стока (в долях годового объема стока).

На рисунках 3.7, 3.8 представлены расчетные гидрографы по моделям реального года рассматриваемых рек.

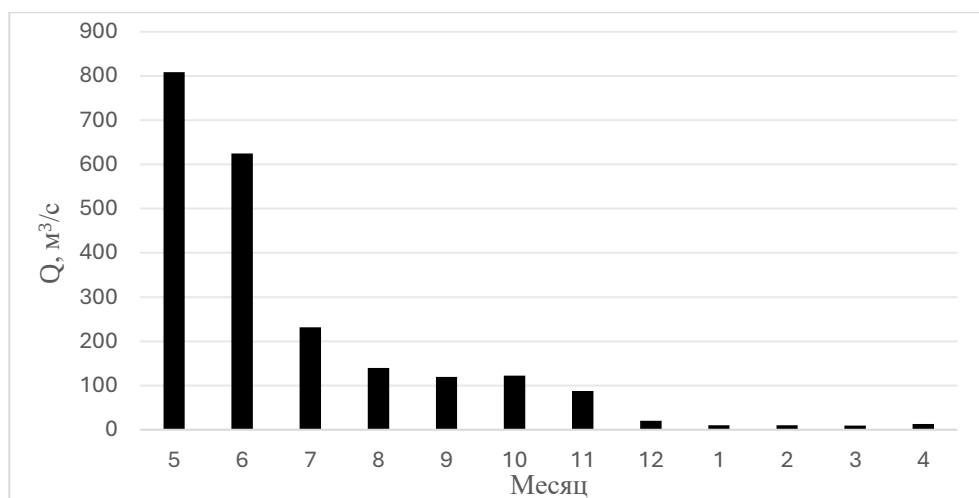


Рисунок 3.7 – Расчетный гидрограф по модели реального водохозяйственного 1938–1939 года реки Щугор – д. Мичабичевник

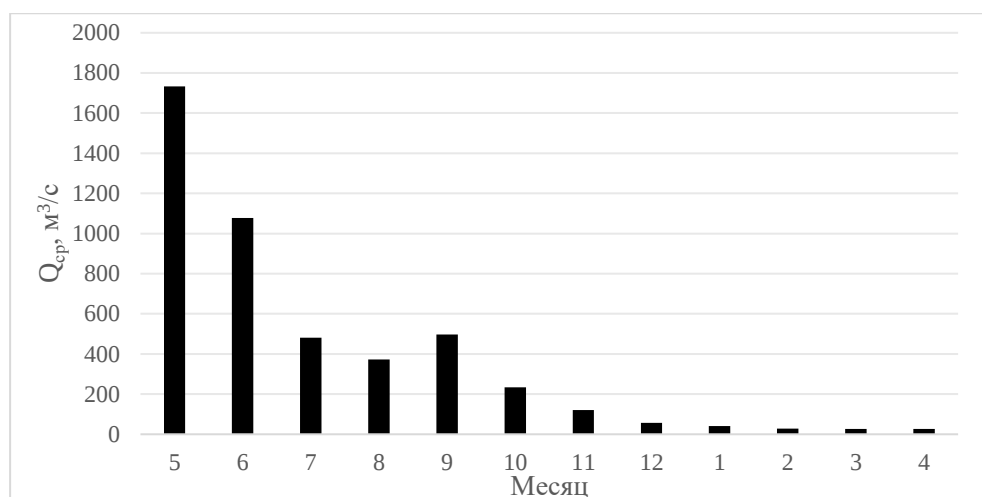


Рисунок 3.8 – Расчетный гидрограф по модели реального водохозяйственного 1941–1942 года реки Уса – с. Петрунь

3.3 Метод компоновки по сезонам

При использовании этого метода расчет распределения выполняется по гидрологическим годам, который начинается с многоводного сезона. Сроки сезонов назначаются едиными для всех лет наблюдений с округлением их до целого месяца. Продолжительность многоводного сезона назначается так, чтобы в границах сезона помещалось половодье как в годы с наиболее ранним сроком наступления, так и с наиболее поздним сроком окончания. [3]

Для значений стока за водохозяйственный год, лимитирующий период, лимитирующий сезон и лимитирующий месяц рассчитываются суммы и выделяется маловодная группа. После чего суммы компоуются по периодам и сезонам, рассчитываются суммы за каждый месяц в %. Таблицы 3.3–3.8.

Таблица 3.3 – Расчет внутригодового распределения стока по месяцам маловодной группы (случай несоставного сезона) реки Щугор – д. Мичабичевник

		1		2		3		4	
год	$\Sigma Q_{\text{осень}}$	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц
1953–1954	660	88,3	8	357	9	165	10	49,3	11
1972–1973	634	150	8	267	9	145	10	71,5	11
1981–1982	624	159	8	145	9	219	10	101	11
1977–1978	589	92,6	8	235	9	183	10	78,4	11
1936–1937	584	85,8	8	254	9	149	10	94,8	11
1973–1974	564	115	8	170	9	157	10	122	11
1970–1971	564	119	8	159	9	198	10	87,5	11
1957–1958	550	87,3	8	184	9	141	10	138	11
1934–1935	543	162	8	103	9	152	10	126	11
1941–1942	528	97,7	8	236	9	105	10	88,9	11
1976–1977	475	129	8	296	9		10	50,4	11
1940–1941	471	174	8	120	9	97,5	10	80,3	11
1960–1961	452	89,7	8	160	9	139	10	62,9	11
1938–1939	449	134	8	114	9	117	10	83,8	11
1946–1947	302	122	8	101	9	58,9	10	19,9	11
1967–1968	220	84,4	8	136	9		10		11
1980–1981	212		8		9	136	10	75,8	11
Σ в группе	8419	1890		3037		2162		1331	
в % от $Q_{\text{осень}}$	100	22,4		36,1		25,7		15,8	

Таблица 3.4 – Расчет внутригодового распределения стока по месяцам маловодной группы (случай несоставного сезона) реки Щугор – д. Мичабичевник

		1		2		3		4		5	
год	$\Sigma Q_{\text{зима}}$	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц
1936–1937	156	56,5	12	37,8	1	25,5	2	18,7	3	17,7	4
1960–1961	153	44,5	12	33,9	1	25,6	2	22,9	3	25,6	4
1971–1972	151	48,1	12	29,8	1	22,6	2	22,4	3	27,8	4
1973–1974	149	43,4	12	32,4	1	26,6	2	22,9	3	23,8	4
1934–1935	148	37,1	12	30,1	1	27,3	2	26,0	3	27,6	4
1969–1970	148	39	12	34,0	1	25,7	2	22,4	3	26,8	4
1933–1934	146	51,9	12	28,0	1	24,7	2	20,3	3	21,2	4
1968–1969	144	35,3	12	32,4	1	26,3	2	25,8	3	24,1	4
1955–1956	130	30	12	30,8	1	22,8	2	22,6	3	23,8	4
1937–1938	128	33,1	12	22,1	1	19,9	2	19,9	3	33,2	4
1970–1971	126	37,3	12	23,2	1	24,0	2	20,8	3	20,8	4
1935–1936	121	28	12	25,1	1	21,3	2	22,5	3	24,4	4

1951–1952	116	33,6	12	27,6	1	21,7	2	17,4	3	15,4	4
1947–1948	106	27,4	12	18,5	1	17,8	2	19,4	3	22,9	4
1946–1947	98	19,7	12	19,6	1	17,3	2	17,0	3	24,7	4
1967–1968	67		12		1		2	28,1	3	39,0	4
1938–1939	61	19,4	12	9,9	1	9,8	2	9,4	3	12,6	4
Σ в группе	2148	584		435		359		358		411	
в % от Qзима	100	27,2		20,3		16,7		16,7		19,2	

Таблица 3.5 – Расчет внутригодового распределения стока по месяцам маловодной группы (случай составного сезона) реки Щугор – д. Мичабичевник

год	$\Sigma Q_{\text{сост}}$	весна		лето			
		1		1		2	
		Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц
1967–1968	1876	1030	5	571	6	275	7
1968–1969	1843	668	5	884	6	291	7
1977–1978	1830	1250	5	474	6	106	7
1957–1958	1794	821	5	686	6	287	7
1969–1970	1723	69	5	1120	6	534	7
1951–1952	1722	391	5	976	6	355	7
1955–1956	1688	1050	5	475	6	163	7
1964–1965	1654	589	5	907	6	158	7
1956–1957	1611	738	5	514	6	359	7
1936–1937	1603	350	5	1130	6	123	7
1938–1939	1594	774	5	598	6	222	7
1933–1934	1515	413	5	823	6	279	7
1960–1961	1468	384	5	940	6	144	7
1970–1971	1426	317	5	876	6	233	7
1953–1954	1367	723	5	477	6	167	7
1945–1946	1235	348	5	750	6	137	7
1980–1981	1215	598	5	617	6		7
Σ в группе	27164	10513		12818		3833	
в % от Qсост	100	38,7		47,2		14,1	

Таблица 3.6 – Расчет внутригодового распределения стока по месяцам маловодной группы (случай несоставного сезона) реки Уса – с. Петрунь

год	$\Sigma Q_{\text{осень}}$	1		2		3		4	
		Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц
1974–1975	1317,3	187	8	612	9	422	10	96,3	11
1952–1953	1299	394	8	617	9	199	10	89	11
1959–1960	1281	259	8	644	9	265	10	113	11
2012–2013	1280	501	8	296	9	352	10	131	11

2013–2014	1263	161	8	523	9	329	10	250	11
1954–1955	1200	370	8	451	9	254	10	125	11
1972–1973	1183,5	474	8	427	9	214	10	68,5	11
1988–1989	1140	205	8	166	9	641	10	128	11
1961–1962	1122	272	8	286	9	387	10	177	11
1953–1954	1103	198	8	483	9	303	10	119	11
1941–1942	1102	336	8	447	9	210	10	109	11
1995–1996	1059	494	8	565	9		10		11
1950–1951	1047,3	266	8	359	9	343	10	79,3	11
2016–2017	1036	215	8	339	9	324	10	158	11
1977–1978	1028	221	8	498	9	207	10	102	11
1973–1974	1014	309	8	373	9	226	10	106	11
1985–1986	1013	344	8	298	9	266	10	105	11
1998–1999	950	286	8	664	9		10		11
1960–1961	906,8	237	8	366	9	331	10	82,8	11
1978–1979	878,9	449	8	214	9	137	10	78,9	11
1990–1991	872,4	255	8	324	9	205	10	88,4	11
1984–1985	860,7	236	8	407	9	155	10	62,7	11
1976–1977	833,2	201	8	400	9	160	10	72,2	11
1987–1988	780	260	8	185	9	212	10	123	11
1970–1971	773	231	8	282	9	156	10	104	11
1997–1998	757	472	8	285	9		10		11
1945–1946	734,5	171	8	194	9	271	10	98,5	11
1946–1947	708,7	404	8	189	9	72,6	10	43,1	11
1940–1941	652,8	339	8	131	9	82,8	10	100	11
∑ в группе	29196	8747		11025		6724		2809	
в % от Qосень	100	30,0		37,8		23,0		9,6	

Таблица 3.7 – Расчет внутригодового распределения стока по месяцам маловодной группы (случай несоставного сезона) реки Уса – с. Петрунь

		1		2		3		4		5	
год	∑Qзима	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц
1948–1949	201	71,5	12	40,1	1	32	2	25,9	3	31,5	4
1988–1989	200,8	71,2	12	38,5	1	26,6	2	28,3	3	36,2	4
1976–1977	191,5	60,7	12	42,4	1	25,8	2	24,7	3	37,9	4
1974–1975	190,8	50,8	12	43,1	1	34,9	2	27,8	3	34,2	4
1960–1961	187,2	54,5	12	43,2	1	31	2	28,1	3	30,4	4
1955–1956	181,6	77,5	12	34,9	1	24	2	19,9	3	25,3	4
1959–1960	178,1	55,9	12	38,6	1	27,9	2	21,3	3	34,4	4
1971–1972	178	64,1	12	32,5	1	24,6	2	26,2	3	30,6	4
1973–1974	171,6	55,1	12	38,7	1	28,6	2	24,4	3	24,8	4
1958–1959	171,2	65,2	12	34,8	1	24,1	2	20,7	3	26,4	4
1985–1986	163,6	53,9	12	33,1	1	29,4	2	23,5	3	23,7	4
1941–1942	160,2	51	12	36,4	1	25,4	2	23,2	3	24,2	4
1957–1958	157,7	60,9	12	36,2	1	25,7	2	17,1	3	17,8	4
1986–1987	155,2	63,5	12	24,5	1	21,1	2	21,6	3	24,5	4
1945–1946	155,1	39,4	12	42,1	1	27,6	2	23,7	3	22,3	4

1984–1985	149,2	45,5	12	34	1	24,9	2	21,4	3	23,4	4
1970–1971	145,5	46,8	12	32,8	1	25,3	2	19,6	3	21	4
1964–1965	143,5	55,8	12	33,5	1	18,1	2	14,5	3	21,6	4
1972–1973	143,4	36,2	12	29,2	1	23,5	2	21,4	3	33,1	4
1978–1979	133,9	44,4	12	26,5	1	22	2	18,8	3	22,2	4
1956–1957	117,6	38,5	12	28,3	1	22,3	2	15,9	3	12,6	4
1965–1966	114,3	43,4	12	28	1	18,8	2	12,1	3	12	4
1963–1964	108,1	34,1	12	32,5	1	17,4	2	12,3	3	11,8	4
1969–1970	104,9	35,4	12	23,2	1	15,1	2	13	3	18,2	4
1946–1947	98,6	25,3	12	20,8	1	14,3	2	14,6	3	23,6	4
1968–1969	73,8	22,7	12	15,8	1	13,3	2	10,8	3	11,2	4
1995–1996	0		12		1		2		3		4
1996–1997	0		12		1		2		3		4
1998–1999	0		12		1		2		3		4
$\sum$ в группе	3976	1323		864		624		531		635	
в % от Qзима	100	33,3		21,7		15,7		13,3		16,0	

Таблица 3.8 – Расчет внутригодового распределения стока по месяцам маловодной группы (случай составного сезона) реки Уса – с. Петрунь

год	$\sum Q_{\text{сост}}$	весна		лето			
		1		1		2	
		Q	месяц	Q	месяц	Q	месяц
2003–2004	4238	1987	5	1801	6	450	7
2005–2006	4195	2560	5	1100	6	535	7
1940–1941	4112,5	92,5	5	4400	6	1020	7
2001–2002	4000	2090	5	1390	6	520	7
1989–1990	3965	1730	5	1720	6	515	7
1946–1947	3949	534	5	2510	6	905	7
1980–1981	3946	640	5	2500	6	806	7
2017–2018	3864,6	82,6	5	3160	6	622	7
1944–1945	3816	811	5	2120	6	885	7
1952–1953	3730	394	5	2860	6	476	7
1948–1949	3708	1940	5	1330	6	438	7
1970–1971	3704,1	74,1	5	2540	6	1090	7
1945–1946	3663	1110	5	2260	6	293	7
1990–1991	3642	1310	5	1880	6	452	7
1936–1937	3622	413	5	2760	6	449	7
2004–2005	3618	963	5	2390	6	265	7
2016–2017	3449	1960	5	1220	6	269	7
1956–1957	3197	1400	5	1260	6	537	7
2012–2013	3156	1710	5	1140	6	306	7
1964–1965	3077	970	5	1590	6	517	7
1995–1996	3024	614	5	1390	6	1020	7

1953–1954	3015	1460	5	1160	6	395	7
1941–1942	2963	1560	5	970	6	433	7
1955–1956	2926	1560	5	769	6	597	7
2013–2014	2847	463	5	2130	6	254	7
2000–2001	2822	1750	5	908	6	164	7
1997–1998	2147		5	1520	6	627	7
1999–2000	993		5		6		7
1996–1997	843		5		6	843	7
Σ в группе	96232	3017		50778		15683	
в % от Qсост	100	31,4		52,8		16,3	

Расчетное внутригодовое распределение стока по месяцам и сезонам года в значениях и процентах приведены в таблицах 3.9, 3.10.

Таблица 3.9 – Расчетное внутригодовое распределение стока по месяцам и сезонам года реки Щугор – д. Мичабичевник

	месячный сток												сезонный			год
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	в-л	осень	зима	
%	28,4	34,6	10,3	4,7	7,6	5,40	3,32	1,56	1,16	0,96	0,96	1,10	73,3	21,0	5,7	100
Q	623	760	227	104	167	119	73	34	26	21	21	24	1610	462	126	2198

Таблица 3.10 – Расчетное внутригодовое распределение стока по месяцам и сезонам года реки Уса – с. Петрунь

	месячный сток												сезонный			год
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	в-л	осень	зима	
%	22,0	41,2	12,2	6,6	8,3	5,07	2,12	0,82	0,53	0,38	0,33	0,39	75,5	22,0	2,5	100
Q	1035	1933	574	309	390	238	99	38	25	18	15	15	3545	1034	115	4694

Расчетные гидрографы внутригодового распределения стока по месяцам, рассчитанные методом компоновки представлены на рисунках 3.9, 3.10.

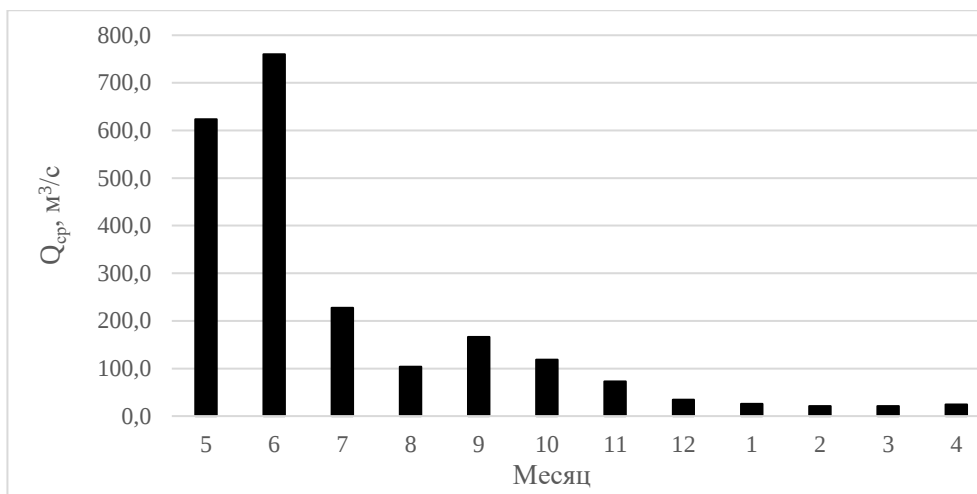


Рисунок 3.9 – Расчетный гидрограф внутригодового распределения стока по месяцам года для реки Щугор – д. Мичабичевник

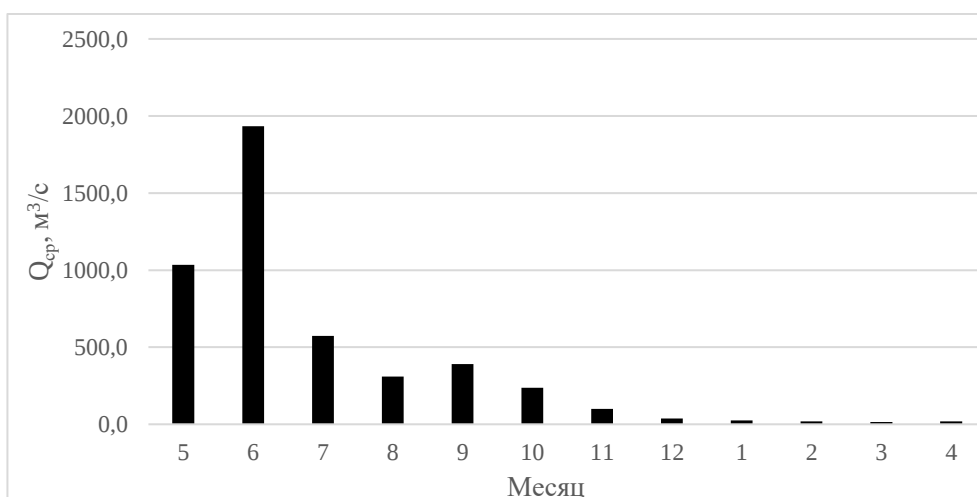


Рисунок 3.10 – Расчетный гидрограф внутригодового распределения стока по месяцам года для реки Уса – с. Петрунь

3.4 Метод теории периодически коррелированных случайных процессов

Для анализа внутригодового хода речного стока воспользуемся методом теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП). Характеристики ПКСП описывают так называемую повторяемость «в среднем» свойств гидрометеорологических процессов. Случайный процесс называется периодически нестационарным, если существует такое положительное число T , при сдвиге на которое характеристики остаются неизменными или инвариантными. Периодически коррелированный случайный процесс будет периодически нестационарным, в узком смысле, если инварианты, конечномерные распределения и периодически коррелированный случайный процесс будет периодически нестационарным, в широком смысле, если инвариантны математическое ожидание, дисперсия и корреляционная функция.

На рисунках 3.11–3.18 представлены совмещенные графики оценок математического ожидания и дисперсии внутригодового хода стока анализируемых рек по данным с различной дискретностью.

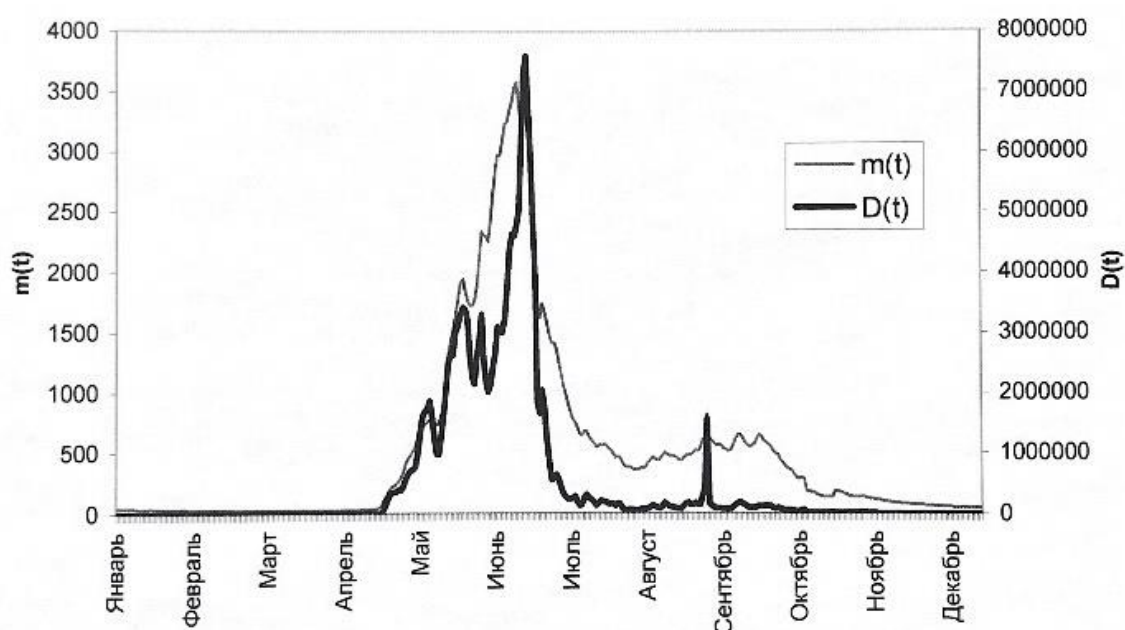


Рисунок 3.11 – Совмещенный график оценок математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ внутригодового хода стока реки Уса по данным среднесуточных значений

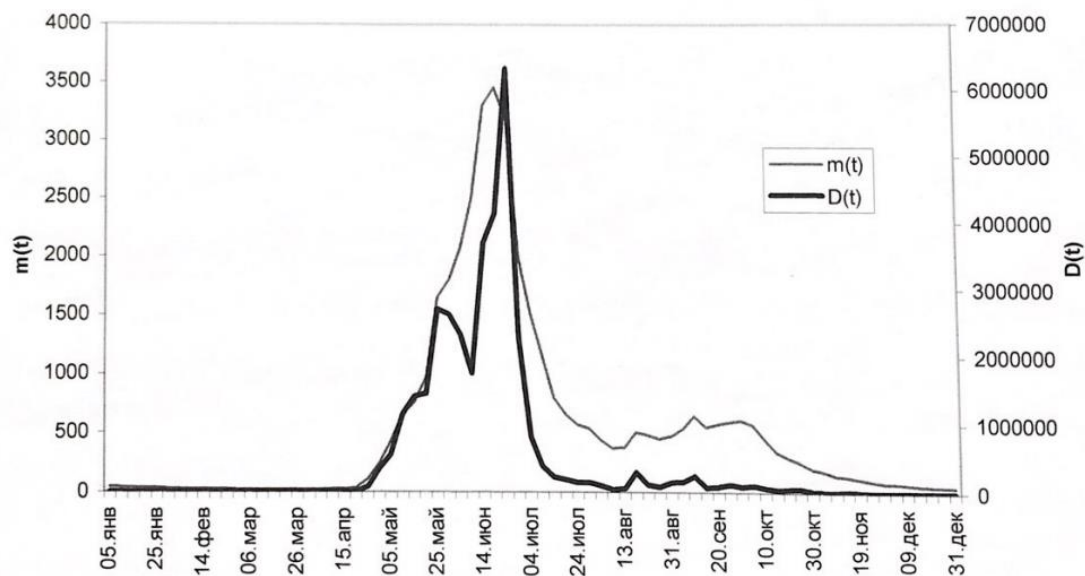


Рисунок 3.12 – Совмещенный график оценок математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ внутригодового хода стока реки Уса по данным пентадных значений

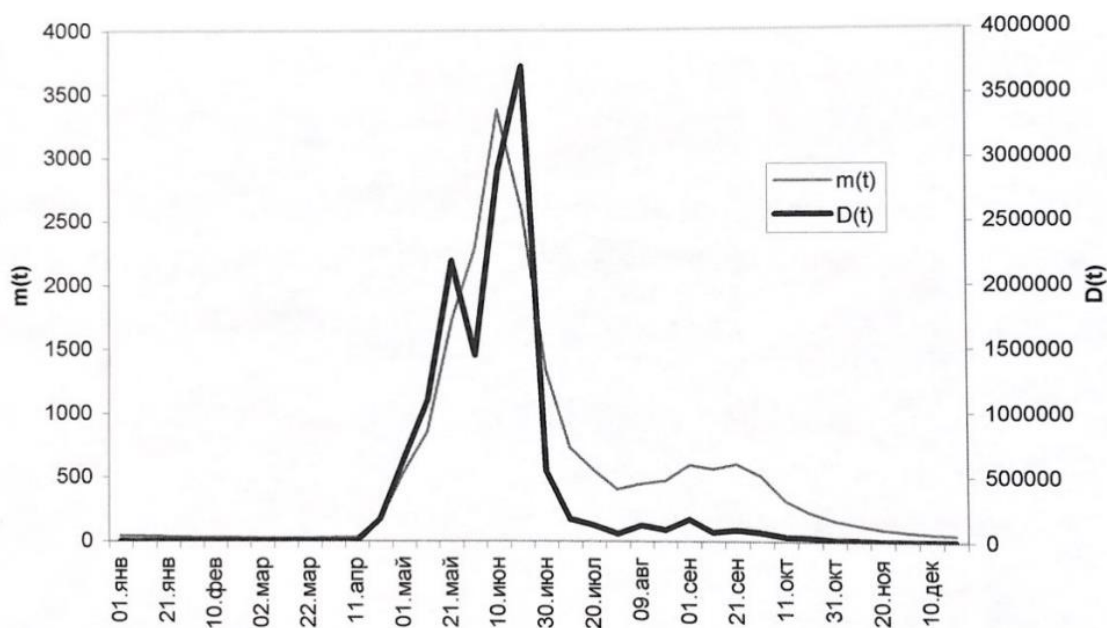


Рисунок 3.13 – Совмещенный график оценок математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ внутригодового хода стока реки Уса по данным декадных значений

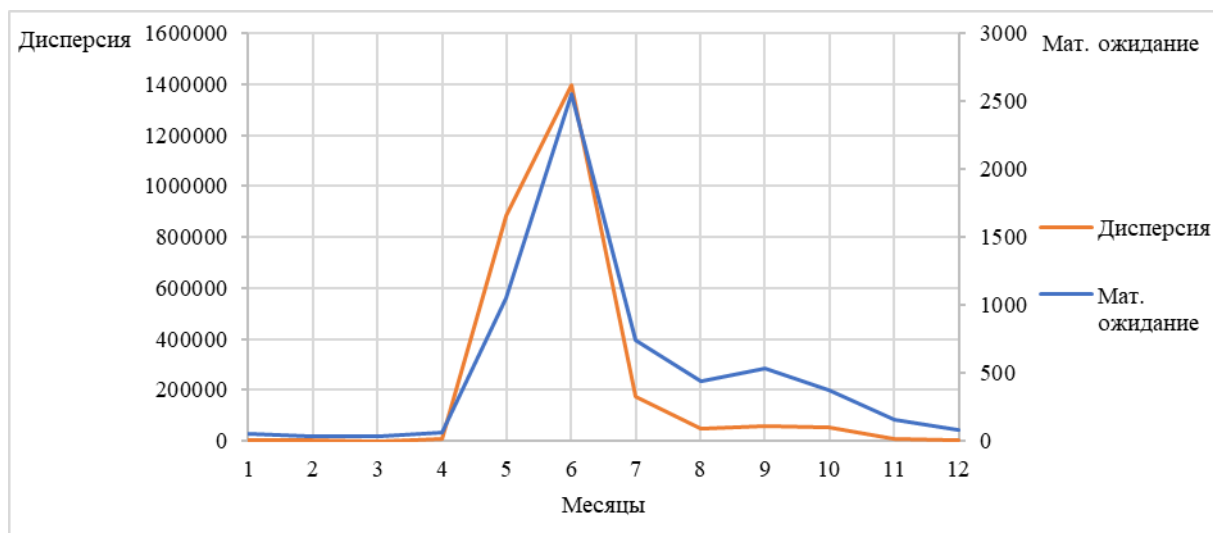


Рисунок 3.14 – Совмещенный график оценок математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ внутригодового хода стока реки Уса по данным месячных значений

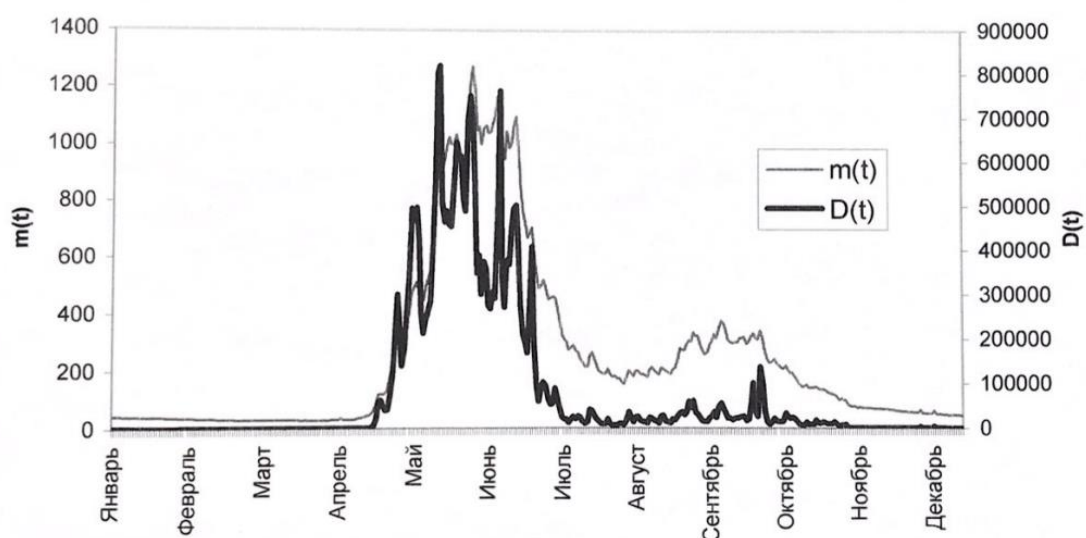


Рисунок 3.15 – Совмещенный график оценок математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ внутригодового хода стока реки Щугор по данным среднесуточных значений

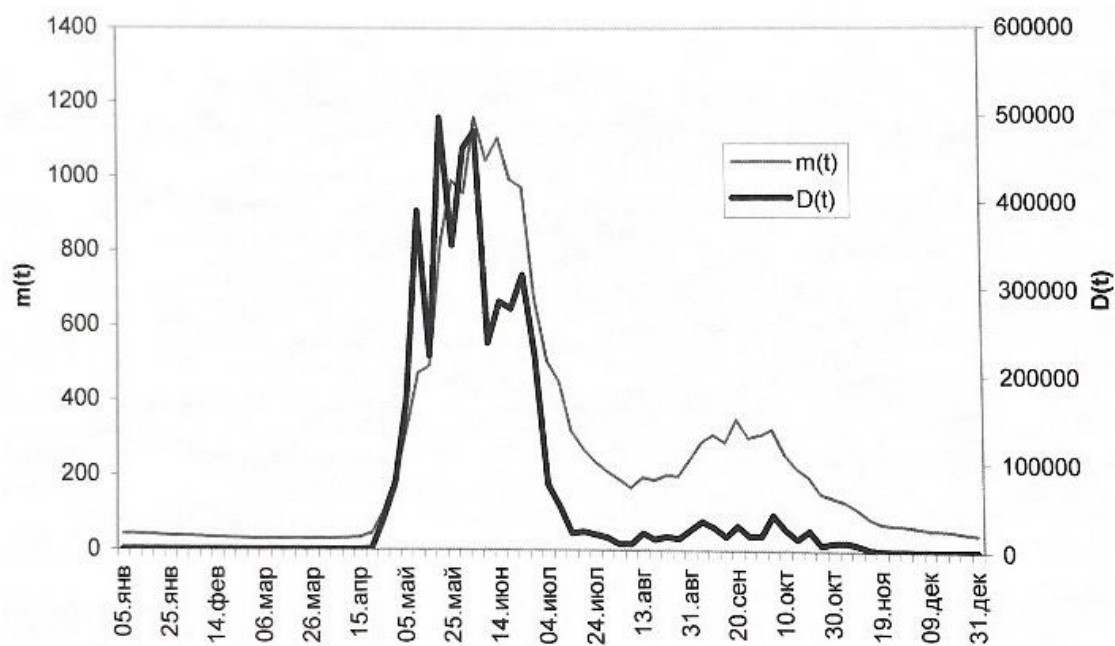


Рисунок 3.16 – Совмещенный график оценок математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ внутригодового хода стока реки Щугор по данным пентадных значений

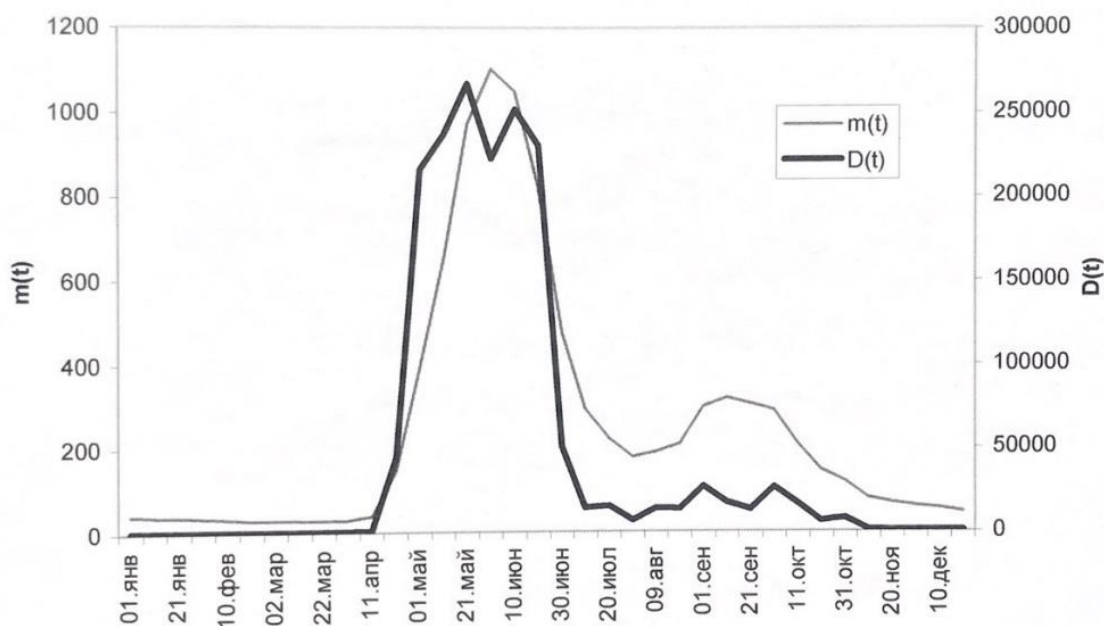


Рисунок 3.17 – Совмещенный график оценок математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ внутригодового хода стока реки Щугор по данным декадных значений

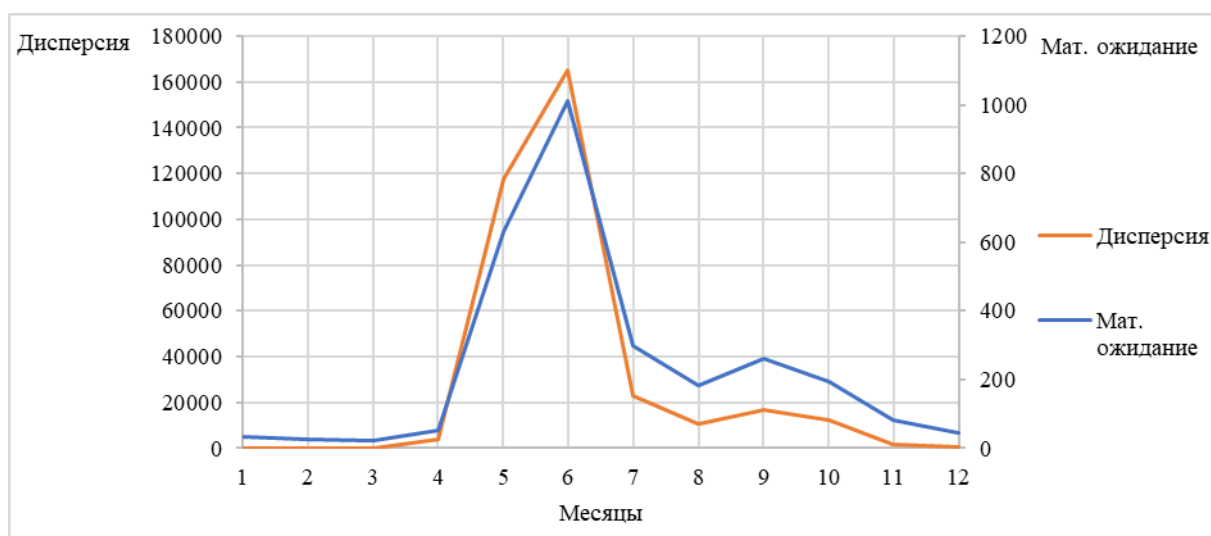


Рисунок 3.18 – Совмещенный график оценок математического ожидания $m(t)$ и дисперсии $D(t)$ внутригодового хода стока реки Щугор по данным месячных значений

Статистические характеристики внутригодовой изменчивости стока анализируемых рек приведены в таблицах 3.11 и 3.12.

Таблица 3.11 – Численные значения оценок математического ожидания $m(t)$, дисперсии $D(t)$ и параметров авторегрессии Φ_1 , Φ_2 стока реки Уса для каждого месяца года.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m(t)$ м³/с	50,0	36,8	31,9	61,2	1053,4	2555,4	744,1	442,1	535,9	373,6	155,3	77,3
$D(t)$ (м³/с)²	760	371	260	8012	882640	1393913	172221	47532	58534	51681	9935	1657
Φ_1	0,94	0,93	0,15	0,24	-0,48	0,37	0,38	0,52	0,24	0,75	0,85	0,77
Φ_2	0,47	0,54	0,62	0,04	0,08	0,28	0,10	0,05	-0,09	0,22	0,30	0,52

Таблица 3.12 – Численные значения оценок математического ожидания $m(t)$, дисперсии $D(t)$ и параметров авторегрессии Φ_1 , Φ_2 стока реки Щугор для каждого месяца года.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m(t) \text{ м}^3/\text{с}$	33,6	26,0	23,5	53,4	630,6	1013,0	298,1	183,7	260,2	195,1	80,2	45,6
$D(t) (\text{м}^3/\text{с})^2$	166	81	49	3757	117709	165257	22957	10327	16869	12151	1745	401
Φ_1	0,88	0,83	0,18	0,38	-0,34	0,60	0,52	0,61	0,40	0,53	0,70	0,84
Φ_2	0,29	0,17	0,25	0,16	0,09	0,10	0,02	-0,09	0,06	0,16	0,20	0,44

При практически неизменном уровне меженного стока из года в год происходит изменение амплитуды половодий и паводков. Таким образом, межгодовая изменчивость происходит в виде амплитудной модуляции характерных фаз водного режима.

Кривая оценки математического ожидания $m(t)$ (рисунок 3.11) равнинной р. Уса имеет вид сложной периодической кривой с основным максимумом в период весеннего половодья (июнь) и вторичным – в период осеннего дождевого паводка (сентябрь). Минимумы на кривой $m(t)$ соответствуют зимней (март) и летней (август) межени. Кривая оценки дисперсии $D(t)$ повторяет особенности кривой $m(t)$, что свидетельствует о межгодовой изменчивости этой реки преимущественно в виде модуляции характерных элементов внутригодового хода. Смещение кривой $D(t)$ связано с фазовой модуляцией, в данном случае наступлением весеннего половодья раньше (май) среднемноголетнего срока.

Кривая оценки математического ожидания $m(t)$ (рисунок 3.15) горной р. Щугор также имеет вид сложной периодической кривой с основным максимумом в период весеннего половодья (июнь) и вторичным – в период осеннего (сентябрь). Минимумы на кривой $m(t)$ соответствуют зимней (март) и летней (август) межени. Кривая оценки дисперсии $D(t)$ смещена по отношению к кривой $m(t)$, что свидетельствует о межгодовой изменчивости, связанной с фазовой модуляцией – наступлением весеннего половодья раньше или позже

среднемноголетнего срока (апрель-июнь). Так же наблюдается широкий весенний максимум дисперсии, что скорее всего связано с продолжительным таянием льда в горах.

Таким образом, анализ вероятностных характеристик многолетней и внутригодовой изменчивости рассматриваемых рек Северного края позволил выявить общие особенности и различия в их водном режиме.

При анализе оценок $m(t)$ и $D(t)$ пентадных, декадных и месячных расходов воды рек наблюдается сглаживание внутригодового хода. Таким образом, пентадное, декадное и месячное осреднение исходной реализации являются своеобразным фильтром, который подавляет паводки продолжительностью менее пяти, десяти и тридцати суток соответственно.

Максимумы в период весеннего половодья для обеих рек наблюдаются в июне. Но кривые дисперсии $D(t)$ показывают, что максимумы в период весеннего половодья могут смещаться (апрель, май, июнь, июль) для анализируемых рек.

Для рек Уса и Щугор минимальный сток в период летней и зимней межени наблюдается в августе и декабре соответственно.

Как видно из таблиц 3.11–3.12, параметры авторегрессии первого порядка, аппроксимирующие корреляционные зависимости внутригодовой изменчивости стока анализируемых рек значимы (значения больше 0,6) для р. Уса с октября по февраль, для р. Щугор с декабря по февраль за счет питания рек грунтовыми водами в период межени. Эти данные можно использовать для прогнозирования.

Заключение

В Северном крае участки трасс проходят через области питания (водосбор) средних водотоков, которые играют важную роль в изменении их водности. Поэтому большее значение для экосистем средних рек имеет регламентация хозяйственной деятельности на этой территории.

В данной работе анализ многолетних и внутригодовых колебаний водности разнотипных рек Северного края выполнен на основе вероятностных характеристик с использованием данных среднегодовых и годовых расходов воды.

Многолетние колебания анализировались по данным среднегодовых расходов воды, а также по ежегодным последовательностям значений для характерных месяцев года. Для установления многоводных и маловодных лет в стоке анализируемой реки привлекался квантильный анализ данных. Выполненный анализ показал, что синхронные многоводные условия на двух рассматриваемых реках наблюдались в 1939, 1962, 1966, 1975, 1979, 1983 годах. Синхронные маловодные условия наблюдались: 1936, 1945–1946, 1953, 1955–1956, 1960, 1964, 1970, 1980. Экстремально маловодных обстановок не наблюдалось, а многоводными были 1933 и 1951 года на реке Уса и 1975 год на реке Щугор.

Для выделения трендов использовалась низкочастотная фильтрация Баттерворта, результаты показали, что на горной реке Щугор не образуются циклы, расходы стабильны. На равнинной реке Уса формируются циклы продолжительностью от 8 до 18 лет.

На графиках реализации среднесуточных расходов воды видно, что ежегодно повторяются все максимумы, связанные с прохождением весеннего половодья и дождевых паводков. При этом из года в год происходит изменение амплитуды половодий и паводков при практически неизменном уровне

меженного стока. Таким образом, межгодовая изменчивость происходит в виде амплитудной модуляции характерных фаз водного режима. Межгодовая модуляция внутригодовой изменчивости речного стока свидетельствует о не стационарности процесса, а ежегодная повторяемость – о его цикличности.

Отличия в особенностях внутригодового хода рассмотренных рек проявляются на кривых дисперсии $D(t)$. Так на кривой $D(t)$ горной реки Щугор наблюдается широкий весенний максимум дисперсии, что может быть связано с продолжительным таянием льда в горах. Совместный анализ оценок математического ожидания и дисперсии показывает, что ход их когерентен. Это свидетельствует о проявлении межгодовой изменчивости преимущественно в виде амплитудной модуляции основных фаз водного режима.

Таким образом, анализ вероятностных характеристик многолетней и внутригодовой изменчивости рассматриваемых рек Северного Края позволил выявить общие особенности и различия в их водном режиме.

Список использованных источников

1. Жил И.М., Алюшинская Н.М. Ресурсы поверхностных вод СССР Том3. Северный край. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 663 с.
2. Великанов М.А. Гидрология суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1948.- 403 с.
3. Свод Правил 33-101-2003 Определение основных расчетных гидрологических характеристик
4. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации, – СПб.: изд. РГГМУ. 2007. - 279 с.
5. Орлов В.Г. Основы гидрологии суши, -Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 79 с.
6. Догановский, А.М. Сборник задач по определению основных характеристик водных объектов суши, – СПб.: РГГМУ, 2011. – 315 с.
7. Сикан, А. В. Методические указания по дисциплине «Гидрологические расчёты», – СПб.: РГГМУ, 2012. – 52 с.
8. А.В. Сикан, Дрегваль М.С, И.О. Винокуров Лабораторный практикум «Статистические методы анализа гидрометеорологической информации», – СПб.: РГГМУ, 2021. – 48 с.
9. В.Г. Андреянов Внутригодное распределение речного стока, – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 320 с.