



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

Кафедра гидрологии суши

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Водный режим рек Алтайского края**
(на примере реки Чумыш)

Исполнитель _____ Сидоренко М. Е.
(фамилия, имя, отчество)

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

_____ Мякишева Н.В.
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

_____ 
(подпись)

_____ К.Г.Н., ДОЦЕНТ
(ученая степень, ученое звание)

_____ Сикан А.В.
(фамилия, имя, отчество)

«11» июля 2017 г.

Санкт-Петербург
2017

Оглавление

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
1 Основные характеристики водотока	
1.1 Физико-географическая характеристика бассейна р. Чумыш	7
1.1.1 Рельеф	16
1.1.2 Климат	16
1.1.3 Гидрогеология	19
1.1.4 Почвы и растительность	
1.1.5 Гидрологические посты бассейна р. Чумыш	
2 Многолетние колебания водности рек	38
2.1 Квантильный анализ	57
2.2 Выделение трендов фильтров Баттерворта	62
3 Внутригодовые колебания речного стока	
3.1 Методы теории периодически коррелированных случайных процессов	
3.2 Особенности внутригодового хода речного стока	
3.3 Обобщение результатов анализа временной изменчивости речного стока в терминах вероятностной модели	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	63
ПРИЛОЖЕНИЯ	65
Приложение А Среднемесячные расходы воды	65
Приложение Б Среднегодовые расходы воды	66
Приложение В Среднемесячные температуры воздуха	
Приложение Г Месячное и годовое количество осадков	
Приложение Д Расчет вероятностных характеристик внутригодовой изменчивости речного стока для каждого месяца года	
Приложение Е Схема расположения пунктов гидрометрических наблюдений	
Приложение Ж Гидрологическая изученность	
Приложение З Норма и изменчивость годового стока	

Введение

Алтайский край – регион России еще не достаточно изучен в гидрологическом смысле. В Алтайском крае промышленность развита слабо, регион считается аграрным, водные ресурсы этого региона используются в основном для потребительских нужд населения и сельского хозяйства.

Река Чумыш – одна из крупных рек Алтайского региона, по классификации Б. Д. Зайкова относится к Алтайскому типу. Питание реки в основном снеговое. Для Алтайского края характерно: высокое весеннее половодье и очень низкая зимняя межень. Река не зарегулирована водохранилищами, лишь на некоторых её притоках встречаются участки с временными грунтовыми плотинами.

Для обеспечения указанных потребностей в воде, в условиях преобладания сельского хозяйства над промышленностью, необходимо иметь сведения о состоянии водных ресурсов данного района. Поэтому целью настоящей работы является изучение водного режима реки Чумыш в естественных и техногенно-нарушенных условиях.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- а) собрать информацию в различных источниках и подготовить временные ряды расходов и уровней воды;
- б) выполнить анализ многолетних колебаний водности рек;
- в) провести анализ внутригодовых колебаний стока рек;
- г) обобщить результаты анализа в терминах адекватных вероятностных моделей.
- д) оценить влияние антропогенных факторов на естественный режим речного стока;

е) оценить изменения климата бассейна.

Для решения поставленных задач в работе использовались данные наблюдений за расходами воды реки Чумыш и её притокам по 7 постам: с. Ельцовка – р. Чумыш, с. Кытманово – р. Чумыш, г. Заринск – р. Чумыш, пгт. Тальменка – р. Чумыш, с. Казанцево – р. Аламбай, Новоперуново – р. Тальменка, с. Тогул – р. Тогул. Период наблюдений составляет с 1959 по 2015 гг. Данные наблюдений за температурой воздуха и осадками взяты по метеостанциям с. Тогул, г. Заринск и пгт. Тальменка с 1959 по 2016 годы.

Исходные данные: среднегодовые, среднемесячные расходы и уровни воды; годовые и месячные суммы осадков; среднегодовые и среднемесячные температуры воздуха.

Речной сток рассматривается, как вероятностный полициклический процесс с основными энергонесущими зонами в диапазонах частот, соответствующих многолетними колебаниями ($T > 1$ года) и внутригодовыми колебаниями ($T < 1$ года). Для анализа многолетней изменчивости использовались ряды среднегодовых расходов и уровней воды, которые рассматривались как стационарные случайные процессы. Также для анализа многолетнего изменения речного стока использовались ежегодные последовательности значений для характерных месяцев года, которые рассматривались как стационарные случайные процессы. Для их анализа привлекался квантильный анализ данных и методы низкочастотной фильтрации Баттерворта. Для установления особенностей внутригодовых колебаний использовались ряды среднемесячных расходов, которые интерпретировались как периодически коррелированные случайные процессы. Для обобщения результатов анализа использовались данные многолетних уровней и расходов воды, чтобы установить влияние природных и антропогенных факторов на водный режим реки.

1 Основные характеристики водотока

1.1 Физико-географическая характеристика бассейна р. Чумыш

Чумыш – река, протекающая главным образом в северо-восточной части Алтайского края, один из крупных правых притоков верхней Оби, впадает в неё в 88 км ниже Барнаула. Чумыш берёт начало на границе Алтайского края и Кемеровской области, на Салаирском кряже. В верховьях реки рельеф имеет горный характер, а в низовье равнинный. Чумыш образуется в результате слияния двух рек – Кара-Чумыш и Томь-Чумыш. Длина Чумыша составляет 644 км, площадь бассейна реки 20390 км², площадь водосбора – 23900 км². общее падение реки составляет 167 м, средний уклон – 0,26%. Река Чумыш имеет множество притоков.

Главные притоки Чумыша:

Кара-Чумыш – 173 км;

Томь-Чумыш – 110 км;

Сара-Чумыш – 98 км;

Ангуреп – 48 км;

Яма – 67 км;

Уксунай – 165 км;

Тараба – 70 км;

Сунгай – 103 км;

Аламбай 140 км;

Каменка – 78 км;

Тальменка – 84 км;

Кашкарагаиха 84 км;

Воды Чумыша достаточно богаты фауной. Из рыб в реке обитают ерши, ельцы, язи, лещи, окуни, щуки. В донных отложениях реки Чумыш обнаружены

54 вида макробеспозвоночных: ручейники, хирономиды, подёнки, олигохеты и один вид клопов.

1.1.1 Рельеф

Для Салаирского кряжа характерен низкогорный лесной ландшафт с платообразными возвышенностями, расчлененными сетью небольших речек. Салаирский кряж окаймляет Западно-Сибирскую низменность с юго-востока и тянется почти на 300 км до нижнего течения р. Иня в виде широкой дуги. Высоты кряжа незначительны, они колеблются от 420 до 470 м, и только в северной части достигают 600 м. Наивысшие точки – это г. Барсук, г. Гусек, Тягун и т.д. А самая высокая точка это гора Кивда с высотой 618 м. Юго-западный склон кряжа пологий, расчленен долинами рек Берди, Суенги и других и постепенно сливается с Западно-Сибирской равниной; восточный склон более крутой и высокий. Ширина Салаирского кряжа в среднем от 15 до 40 метров, На Салаирском кряже очень много различных кастовых образований, а именно пещер, логов, воронок. Это результаты эрозионных процессов. Также на Салаирском кряже сохранился участок реликтовой черневой тайги.

В среднем и нижнем течении реки Чумыш рельеф преимущественно равнинный, но иногда встречаются небольшие возвышенности. Эта равнина намного меньше покрыта лесом, в основном здесь преобладают поля, луга и берёзовые колки хотя ниже села Тальменка и до оби бассейн Чумыша покрыт берёзово-сосновым лесом.

1.1.2 Климат

Из-за особенностей рельефа бассейна реки климат района сильно отличается.

На равнинной части осадков выпадает меньше, а среднегодовые температуры ниже, чем в горной части. А в верховьях реки все наоборот. К тому же ре-

ка течёт с юго-востока на северо-запад, что тоже сказывается на разнице среднегодовых температур. На восточном склоне Салаирского кряжа максимум осадков выпадает в августе месяце. Устойчивый снежный покров устанавливается, как правило, в первой половине ноября, хотя в отдельные годы может и в конце октября или, наоборот, во второй половине ноября.

1.1.3 Гидрогеология

Салаирский кряж также как и Бийско-Чумышская возвышенность, это позднекаледонская складчатость (конец селлура-девон), это почти полностью разрушенные горы.

Кряж сложен осадочными породами – рыхлый четвертичный покров, и породами нижнего палеозоя: кристаллическими известняками, песчаниками, сланцами, туфами и гранитами, которые во многих местах выходят на поверхность.

Подземные воды приурочены к известнякам, трещиноватым песчаникам, сланцам и эффузивам. Наиболее водообильными являются известняки, а вот мраморизованные трещиноватые закарстованные известняки менее водообильны. Водообильны также известняки нижнего девона. Известняки перекрыты мезокайнозойскими глинами и суглинками.

На отдельных участках Салаирского кряжа из закарстованных известняков девона в долинах выходит множество источников.

Подземные воды обнаружены и в закарстованных известняках нижнего карбона. Особенно водообильны эти породы вблизи крупных тектонических разломов. Слабо закарстованные известняки и подобные им породы, характеризуются неравномерной обводностью. Обычно из этих пород подземные воды дают источники лишь там, где породы трещиноваты в результате разломов или ветровой эрозии.

Питание подземных вод Салаирского кряжа происходит за счет атмосферных и таяния снега осадков, которые легко проникают в трещины пород палеозоя.

На площадях, где зона выветривания палеозоя имеет значительную мощность и с поверхности развиты глиняные породы, водность нижележащих толщ слабая.

1.1.4 Почвы и растительность

На Салаирском кряже, в долине реки Чумыш, почвенный покров представлен серыми лесными почвами и выщелоченными черноземами. В пойме реки Чумыш, главным образом в среднем и нижнем течении распространены аллювиальные, луговые и лугово-болотные почвы.

Для Салаирского кряжа характерно развитие формации черневой тайги. Это в основном пихтово-осиновый лес, с подлеском из крупных кустарников, таких как черёмуха, рябина, сибирская калина и высокого травяного покрова. На юго-востоке края есть ещё один такой же участок тайги. Ученые считают, что когда-то между ними была связь, и этот лес занимал очень большую территорию, но со временем остались два небольших участка.

1.1.5 Гидрологические посты бассейна р. Чумыш

Пост Ельцовка был открыт 05.08.1959 г.

Пост Кытманово был открыт 23.09.1963 г, начиная с 2014 года только уровенный пост.

Пост Заринск, ранее именованный Сорокино, был открыт 01.04.1924 г, затем пост закрывался, непрерывные наблюдения начались с 27.07.1931 г.

Пост Тальменка был открыт 13.11.1934 г, но непрерывные наблюдения велись с 19.12.1942 г.

Пост Новоперуново на реке Тальменка был открыт в 1959 г, затем с 25.08.1982 г и по настоящее время начали вести наблюдения.

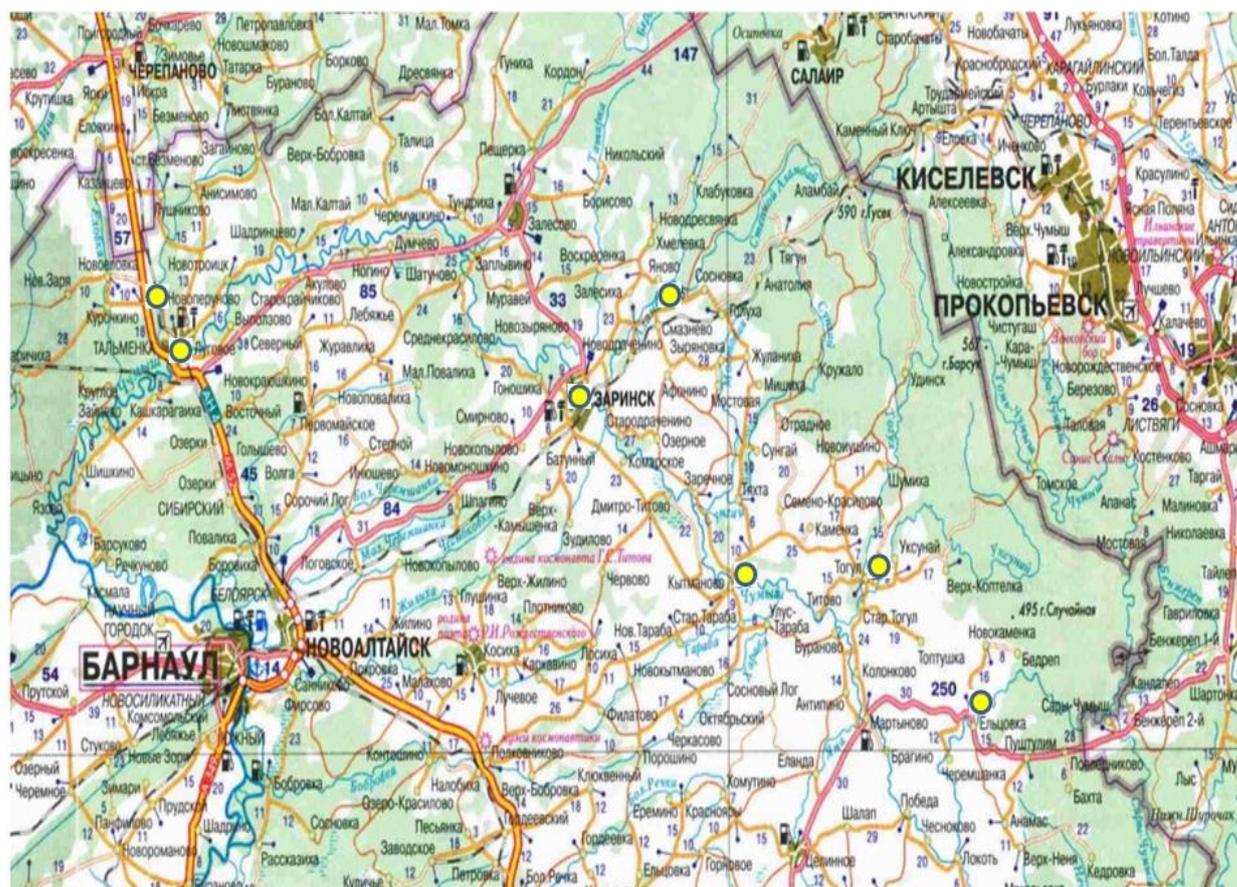


Рисунок 1.1 – Карта расположение гидрологических постов и метеостанций

Название водного объекта	Местоположение поста	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Отметка нуля поста, м
Р. Чумыш	с. Ельцовка	488	4340	206,22
Р. Чумыш	с. Кытманово	353	11000	170,01
Р. Чумыш	г. Заринск	249	15900	160,33
Р. Чумыш	пгт. Тальменка	74	20600	132,35
Р. Тогул	с. Тогул	4	1200	179,21
Р. Аламбай	с. Казанцево	40	1440	171,76
Р. Тальменка	с. Новоперуново	15	1550	146,15

р. Чумыш – с. Ельцовка, пост расположен на северо-восточной окраине села, в 300 м ниже впадения р. Маховки, в 1.6 км выше автодорожного моста.

На участке поста речная долина шириной около 2 км. В припойменной части левый склон долины крутой, высотой до 10 – 12 м, сложен суглинками, выше постепенно сливается с окружающей местностью. Правый склон пологий, сложен галькой с глиной, переходит в гору высотой около 60 м. В 130 м ниже и в 200 м выше поста с правого берега к реке подходят отвесные выступы скал высотой от 40 до 50 м.

Пойма левобережная, высокая, затопляется при уровне 800 см над нулем поста. Русло прямолинейное, шириной в межень от 70 до 80 м, галечное, местами каменистое. У правого берега в русле местами встречаются большие валуны, в 130 м ниже поста – навалы камней. В 200 м ниже поста расположен песчаный остров, поросший мелким кустарником, возвышающийся над меженим руслом на 1 м. Летом русло у правого берега до половины реки зарастает водной растительностью. Левый берег зарос густым кустарником.

Пост свайный, расположен на правом берегу.

Отметка нуля поста 206.22 м БС – 77.

Уклонный пост расположен в 1.2 км ниже поста.

Гидроствор №1 совмещен с постом, оборудован тросовой переправой, гидроствор № 2 расположен в 12 м выше поста, оборудован дистанционной гидрометрической установкой ГР-64 М.

Температура воды измеряется в створе поста, в 2 – 3 м от берега, толщина льда – в 30 м выше поста, на середине реки.

р. Чумыш – с.Кытманово. Пост расположен в селе, у железобетонного моста, в 14 км ниже впадения р. Тарабы.

Прилегающая местность средне холмистая, степная, открытая, занята пахотными угодьями, местами встречаются березовые колки с кустарником.

Долина реки шириной 5 км, трапецеидальная. Через долину проложена шоссейная дорога, которая через реку в створе поста проходит по семи пролетному железобетонному мосту длиной 170 м.

Пойма правобережная, шириной до 140 м, поросла тальником, затопляется при уровне воды 450 см над нулем поста. Левый берег крутой, местами обрывистый, высотой от 7 до 8 м, открытый, размываемый, правый – пологий, песчано-илистый, заросший тальником.

Русло на участке поста слабоизвилистое, песчаное, деформирующееся. Ниже поста на протяжении 300 м берег укреплен. В 460 м ниже поста расположен остров, возвышающийся над меженным уровнем на 1 – 2 м и делящий русло на две протоки.

В зимний период возможно образование полыней, наледей, в весенне-осенний период – заторов, зажоров льда.

Пост смешанного типа, расположен на левом берегу.

Отметка нуля поста 170.01 м БС–77.

В 1.02 км ниже поста оборудован уклонный пост. В отдельные годы сваи уклонного поста в паводок заиливаются.

Гидроствор № 3 совмещен с постом (железобетонный автодорожный мост).

Температура воды измеряется в створе поста, в 2 – 3 м от берега, толщина льда – в 1.02 км ниже поста, на середине реки.

р. Чумыш – г.Заринск. Пост расположен у села Сорокино, в 7 км ниже впадения р. Аламбай, в 230 м ниже автотранспортного моста.

Долина реки шириной 3 км, плоская, луговая, местами заболоченная, поросшая кустарником. Склоны высокие (от 40 до 90 м), крутые, сильно рассеченные протоками и логами. Ярко выраженной поймы на участке поста нет; левобережная пойма ниже поста начинает затопляться при уровне воды 750 см над нулем поста, на участке поста – при 780 см.

Русло прямолинейное, песчаное, деформирующееся. В межень в районе поста, ниже и выше образуется ряд песчаных островов. Расположенные у правого берега каменные гряды вызывают постепенное смещение русла влево. Берега крутые, в паводок размываются.

При ледоходе вероятны заторы льда, зимой – наледи, полыньи.

Пост свайный, расположен на правом берегу.

Отметка нуля поста 160.33 мБС.

Гидроствор № 2 совмещен с постом, оборудован дистанционной гидрометрической установкой ГР–64М.

Единичные пробы воды на мутность берутся в гидростворе № 2, на 63 м от п.н. в межень и на 92 м от п.н. в паводок.

Температура воды измеряется в створе поста, в 2 – 3 м от берега, толщина льда – в створе поста, на середине реки.

р. Чумыш – пгт Тальменка. Пост расположен на южной окраине поселка, в 1,31 км выше впадения р. Тальменки. В 2006г. выше поста построен новый железнодорожный мост, в результате чего расстояние от моста до поста сократилось с 53 м до 17 м.

Прилегающая местность слабовсхолмленная, местами поросшая хвойным лесом. Долина пойменная, трапецеидальная, правый склон высотой от 40 до 50 м, очень крутой, сильно рассечен оврагами, сложен суглинками, левый – пологий, плавно поднимаясь от поймы, незаметно сливается с прилегающей местностью. Оба склона заросли хвойным лесом.

Пойма двухсторонняя, изрезана старицами, заболочена, заросла хвойным лесом и кустарником, начинает затопляться при уровне воды 935 см, полное затопление – при уровне 1000 см над нулем поста. Ширина правобережной поймы до 3.5 км, левобережной – до 3 км.

Русло слабоизвилистое, песчано-илистое, деформирующееся. Оба берега крутые, подвержены деформации.

В период ледохода бывают заторы льда, зимой – наледи.

Пост свайный, расположен на правом берегу.

Отметка нуля поста 132.35 мБС.

Гидроствор № 2 расположен в 98 м ниже поста, оборудован дистанционной гидрометрической установкой ГР–64 М.

Единичные пробы воды на мутность отбираются на гидростворе № 2 на 55 м от п.н..

Температура воды измеряется в створе поста, в 2 – 3 м от берега, толщина льда – в створе поста, на середине реки.

р. Тогул – с. Тогул. Пост расположен на юго-западной окраине села, в 4.5 км выше впадения р. Уксунай.

Прилегающая к долине местность средне холмистая, открытая, лишь местами встречаются небольшие лиственные перелески.

Долина реки на участке поста ящикообразная, шириной около 4.0 км. Дно долины местами поросло кустарником, склоны открыты.

Пойма высокая, слабовыраженная, шириной от 30 до 50 м. Уровень выхода воды на пойму – 639 см над нулем поста.

Русло шириной в межень от 20 до 30 м, извилистое, песчано-галечное, слабо деформирующееся. Берега высокие (8 – 10 м), крутые, местами обрывистые, поросли кустарником, в половодье местами размываются. В отдельные годы уровень в период половодья находится в подпоре от р. Уксунай.

Зимой ледостав устойчивый, возможна наледь, в период весеннего ледохода – заторы льда.

Пост свайный, находится на правом берегу.

Отметка нуля поста 179.21 мБС.

Уклонный пост расположен в 698 м ниже поста.

Гидроствор № 2 расположен в 69 м выше поста, оборудован гидрометрической дистанционной установкой ГР–70. Сток в гидростворе № 2 учитывается полностью.

Гидроствор № 3 находится в створе основного поста.

Единичные пробы воды на мутность отбираются в гидростворе № 2, на 32 км от ПН.

Температура воды измеряется в створе поста, в 1 – 2 м от берега, толщина льда – в створе поста, на середине реки.

р. Аламбай – с. Казанцево. Пост расположен на западной окраине села, в 1.6 км ниже впадения р. Каменушки.

Прилегающая местность средне холмистая, местами покрыта смешанным лесом.

Долина реки на участке поста шириной около 3.0 км. Дно долины и ее склон поросли хвойным лесом и кустарником.

Русло реки извилистое, песчано-галечное, слабо деформирующееся, берега высокие (до 13 м), крутые, обрывистые. В 1.5 км выше и в 300 м ниже поста расположены перекаты, в 1 км выше поста у правого берега при уровне 160 см над нулем поста образуется остров. На участке поста поймы нет.

Зимой на реке бывают промоины, пропарины, полыньи. На участке поста наблюдается выход грунтовых вод.

Пост свайный, расположен на левом берегу.

Отметка нуля поста 171.76 мБС.

В 1.04 км выше поста расположен уклонный пост, на участке уклонного поста наблюдается размыв левого берега. В 100 м выше уклонного поста в летний период ежегодно проводятся работы по выравниванию брода бульдозером.

Гидроствор № 1 совмещен с постом, оборудован дистанционной гидрометрической установкой ГР–70, гидроствор № 2 (меженный) расположен в 1.04 км выше поста.

Температура воды измеряется в створе поста, в 2 – 3 м от берега, толщина льда – в створе поста, на середине реки.

р. Тальменка – с. Новоперуново. Пост находится на северной окраине села, в 1 км выше железобетонного автодорожного моста.

Долина реки извилистая, шириной от 0.5 до 0.6 км. Склоны высотой от 25 до 30 м, сильно расчленены логами и балками. У подножья склонов наблюдаются выходы грунтовых вод.

Пойма шириной от 50 до 120 м, большей частью односторонняя (левобережная), слабопересеченная. Местами пойма низкая, заболоченная, кочковатая, поросшая кустарником, начинает затопляться при уровне 330 см над нулем поста.

Русло очень извилистое, преобладающая ширина от 25 до 40 м. Берега песчаные и гравийные, высотой 2 – 4 м. Дно неровное, песчаное, местами песчано-гравийное.

Летом река не пересыхает, зимой не замерзает, бывают наледи.

Весной сток начинается поперек льда.

Пост свайный, расположен на правом берегу.

Отметка нуля поста 146.15 мБС – 77.

Расходы воды измеряются: в паводок в гидростворе №6 в 1 км ниже поста, в межень во временном гидростворе в 6 м выше поста.

Температура воды измеряется в створе поста, в 2 – 3 м от берега, толщина льда – на середине реки.

2 Многолетние колебания водности рек

2.1 Квантильный анализ

При изучении климатической системы часто используется эквидистантная информация – информация, полученная через равные промежутки времени (срочные данные) при анализе гидрохимических, гидробиологических показателей климатической системы часто приходится использовать не эквидистантные ряды наблюдений (сезонные съемки). При неравномерном характере реализации малого объема рекомендуется рассчитывать квантили χ_{min} , $\chi_{0.25}$, $\chi_{0.5}$, $\chi_{0.75}$, χ_{max} .

Каждый временной ряд рассматривается как реализация случайного процесса $x(t)$, за основную вероятностную характеристику которого принимается функция распределения $F(x_p)$ и ее квантили x_p .

Алгоритм оценивания перечисленных характеристик: χ_{min} и χ_{max} – min и max значения данных в выборке, $\chi_{0.5}$ – медиана. Если количество членов в выборке нечетное, то медиана – центральное значение выборки, если количество членов в выборке четное, то медиана – среднее между двумя центральными значениями.

$\chi_{0.25}$ и $\chi_{0.75}$ – характеризуют центр верхней и нижней половины выборки. Анализ крайних членов χ_{min} и χ_{max} требуют чрезвычайной внимательности, так как они подвержены значительному влиянию выборочной изменчивости, обусловленной ошибками измерений исходных данных. Более высокой устойчивостью обладает размах (R), характеризующий ширину выборочного распределения данных:

$$R = \chi_{max} - \chi_{min} \quad (2.1)$$

- где – χ_{max} – крайний нижний член ранжированного ряда;
 – χ_{min} – крайний верхний член ранжированного ряда.

Ранжировка ряда идет в порядке возрастания.

Медиана $X_{0.5}$ – середина ранжированного ряда, характеризующая центр распределения значений в выборке. Квантили, $\chi_{0.25}$, $\chi_{0.5}$, $\chi_{0.75}$ фиксирует «норму» изменчивости анализируемого параметра, $\chi_{0.25}$ – нижний, а $\chi_{0.75}$ – верхний ее пределы.

Q – интерквантильное расстояние, является мерой разброса в пределах «нормы».

Интерквантильное расстояние находится по формуле:

$$Q = \chi_{0.75} - \chi_{0.25} \quad (2.2)$$

Для $\chi_{0.25}$ и $\chi_{0.75}$, – вводятся барьерные значения:

$$\chi_{В} = \chi_{0.75} + 1.5Q \text{ (верхний)} \quad (2.3)$$

- где – $\chi_{В}$ – расход верхнего барьера, м³/с;
 – $\chi_{0.75}$ – медиана нижней половины ранжированного ряда;
 – Q – интерквантильное расстояние

$$\chi_{Н} = \chi_{0.25} - 1.5Q \text{ (нижний)} \quad (2.4)$$

- где – $\chi_{Н}$ – расход нижней границы, м³/с;
 – $\chi_{0.25}$ – медиана верхней половины ранжированного ряда;
 – Q – интерквантильное расстояние.

Для оценки центра распределения данных в выборке можно рассматривать математическое ожидание m и трехсреднее значение T^* , а в качестве оценок масштаба распределения – дисперсию D либо стандарт $\sigma = \sqrt{D}$. Оценки математического ожидания и дисперсии обычно вычисляются как среднее арифметическое значение и квадрат отклонений от него, трехсреднее значение – по формуле Тьюки:

$$T^* = 0.25(\chi_{0.25} + 2 \times \chi_{0.5} + \chi_{0.75}) \quad (2.5)$$

Сопоставление среднего m с медианой $\chi_{0.5}$ и σ с $0,74 Q$ дает возможность получить предварительную информацию о типе и параметрах распределения в данной выборке.

Если распределение симметрично, то m и $\chi_{0.5}$ равны с точностью до выборочной изменчивости. Сопоставление m и $\chi_{0.5}$, σ и $0,74Q$ удобно проводить графически. Для этого на график наносятся точки, абсциссы которых соответствуют m или σ , а ординаты $\chi_{0.5}$ или $0,74Q$. Если точки группируются около биссектрисы координатного угла, то $0,74Q$ и σ , а также m и $\chi_{0.5}$ такие же, как и у нормального распределения.

В качестве другой характеристики асимметрии полезно использовать следующий параметр:

$$As = [(\chi_{0.75} - \chi_{0.5}) - (\chi_{0.5} - \chi_{0.25})] / (2Q) \quad (2.6)$$

Расчеты доверительных интервалов As вычисленные по смоделированным нормальным рядам показали, что выборку целесообразно считать симметричной, если $-0.31 < As < 0.25$; имеющий левую асимметрию, если $As < -0.31$ или правую при $As > 0.25$.

Многолетнее изменение стока рек традиционно анализируется по рядам среднегодовых, экстремальных расходов и характеризуется наличием маловодных и многоводных лет. Среднегодовые расходы используются для

характеристики «нормы» и изменчивости годового стока. Считается, для того чтобы получить достаточно надежную норму стока необходимо выбирать такой период наблюдений, который включал бы одинаковое количество многоводных и маловодных лет. Экстремальные расходы используются для характеристики максимального стока дождевых паводков, весеннего половодья и минимального стока. В этой работе для анализа многолетних изменений используются данные среднегодовых значений и последовательности ежегодных значений для всех месяцев года.

Гидрологические ряды прошли проверку на однородность. Для чего были использованы две параметрические критерия – критерий Фишера и Стьюдента. Два этих критерия относятся к стандартным критериям, и рекомендуются в большинстве нормативных документов как официальный способ проверки на однородность. Критерий Фишера применяется для того чтобы проверить ряд на однородность по дисперсии. Критерий Стьюдента применяется для проверки ряда на однородность по среднему значению. Проверка рядов исходных данных анализируемой реки на однородность показала, что ряды по критерию Фишера по всем четырем постам однородны, а по критерию Стьюдента однородны ряды только в первых двух створах (г. Верхнеуральск и Верхнеуральское вдхр.).

Результаты квантильного анализа многолетней изменчивости приведены в таблице 2.1 и на рисунках 2.2 – 2.13

Таблица 2.1 – Статистические характеристики межгодовой изменчивости

	χ_{\min}	$X_{0.25}$	$X_{0.5}$	$\chi_{0.75}$	χ_{\max}	R	Q	T*	X_B	X_H	m	СК О	0.74 Q
р. Чумыш – с. Ельцовка													
Ср. год	15,6	34	42,5	48,7	86,1	70,5	14,8	41,9	70,8	11,8	42,7	12,1	11
I	2,64	6,61	8,66	10,7	19,5	16,9	4,1	8,66	16,8	0,46	8,94	3,06	
V	27,8	77	129	188	585	557	111	131	355	-89,5	152	112	

Продолжение таблицы 2.1

	χ_{\min}	$X_{0.25}$	$X_{0.5}$	$\chi_{0.75}$	χ_{\max}	R	Q	T*	X_B	X_H	m	СК О	0.74 Q
--	---------------	------------	-----------	---------------	---------------	---	---	----	-------	-------	---	---------	-----------

р. Чумыш – с. Кытманово

Ср. год	27,6	58,1	72,2	88,8	129	101	34,2	72,8	135	12,1	74,4	20,3	
I	6	12,5	15,5	18,7	27,8	21,8	6,2	15,5	28	3,2	16,2	5,01	
V	52,2	138	237	359	1010	958	221	243	691	-194	278	195	

р. Чумыш – г. Заринск

Ср. год	45,5	85,4	102	120	167	122	34,2	102	171	51,2	104	25,1	
I	7,55	17,3	24	30,1	51	43,5	12,9	23,9	49,4	-2,03	24,8	8,95	
V	72,3	194	329	479	1260	1188	285	333	51,5	-234	379	243	

р. Чумыш – пгт Тальменка

Ср. год	60,7	103	126	153	222	161	51	127	230	26	127	31,7	
I	14,5	25,9	30,8	39,4	66	51,5	13,5	31,7	59,6	5,6	33,5	11,3	
V	101	283	419	599	1470	1369	317	430	1074	-192	478	278	

Расходы воды по всем гидрологическим постам на р. Чумыш и ее притоках за 1958 – 2008 гг.

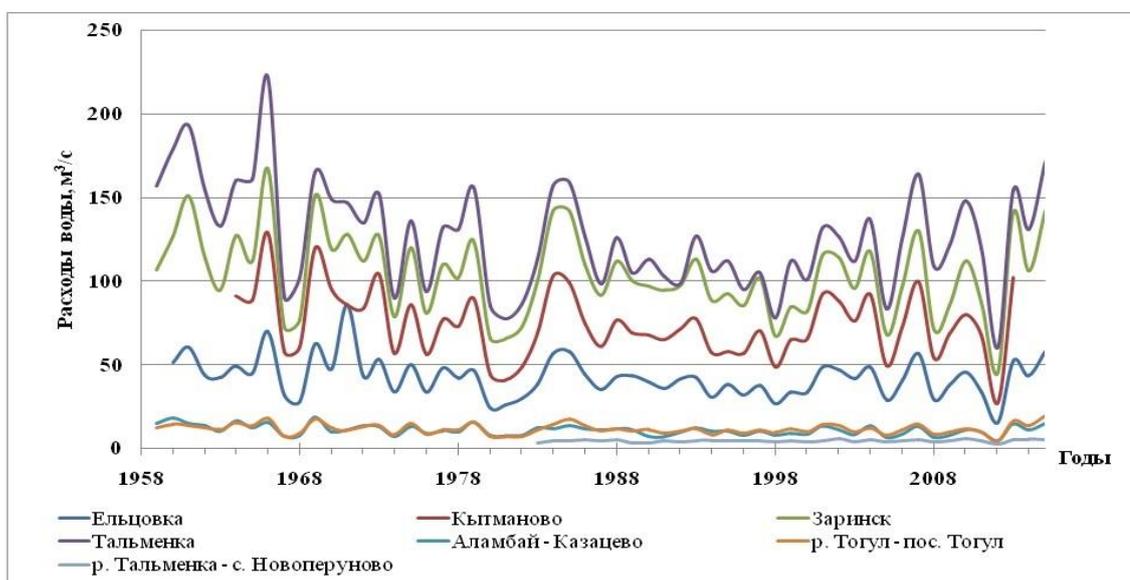


Рисунок 2.1 Хронологический график расходов воды по всем гидрологическим постам на р. Чумыш и притоках за 1958 – 2008 гг.

Расходы воды р. Чумыш – с. Ельцовка за 1958 – 2008 гг.

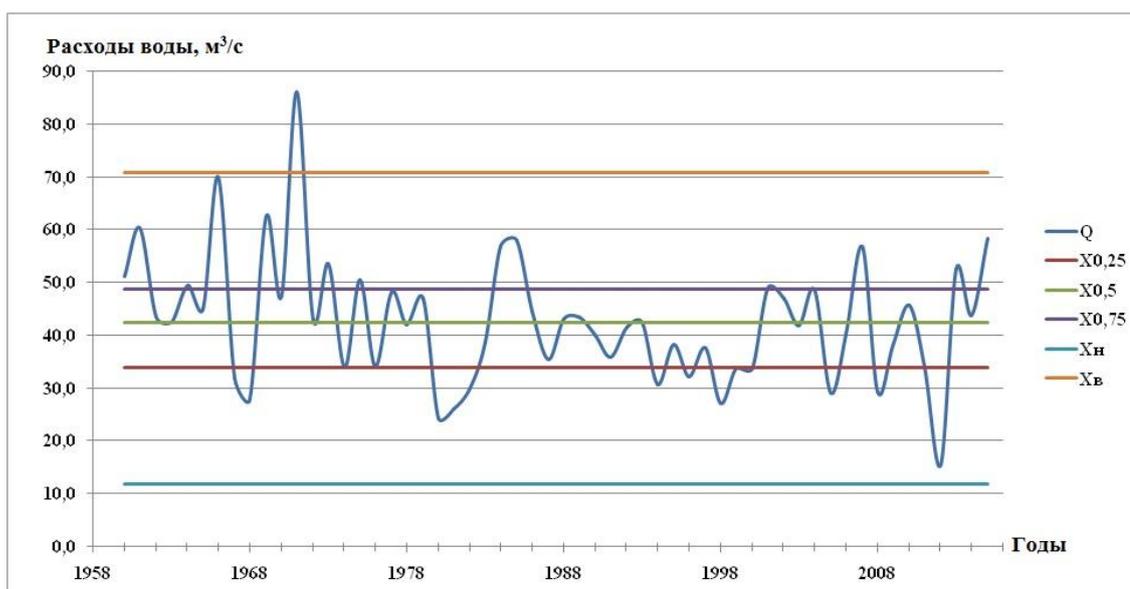


Рисунок 2.2 – Хронологический график расходов воды на р. Чумыш – с. Ельцовка за 1960 – 2015 гг.

Расходы воды р. Чумыш – с. Кытманово за 1963 – 2013 гг.

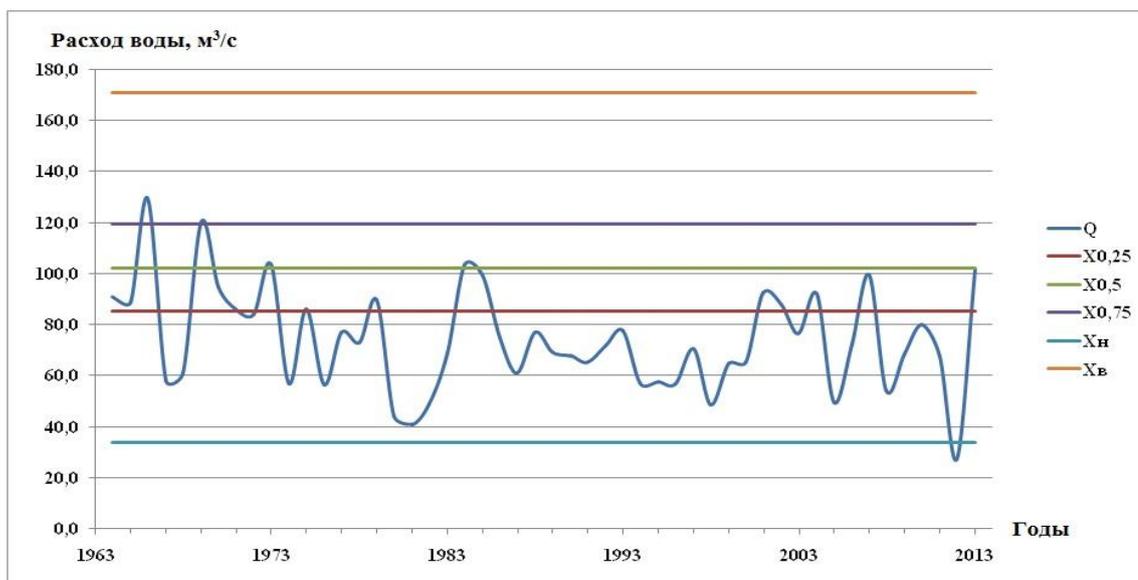


Рисунок 2.3 – Хронологический график расходов воды на р. Чумыш – с. Кытманово за 1963 – 2013 гг.

Расходы воды р. Чумыш – г. Зариск за 1959 – 2015 гг.

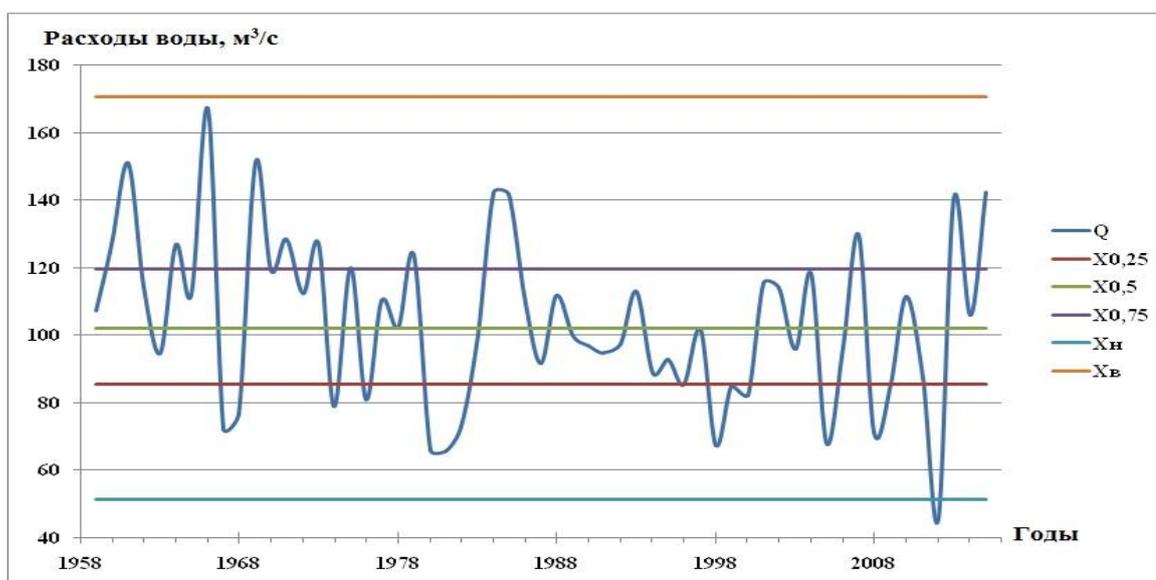


Рисунок 2.4 – Хронологический график расходов воды на р. Чумыш – г. Зариск за 1959 – 2015 гг.

Расходы воды р. Чумыш – пгт. Тальменка за 1959 – 2015 гг.

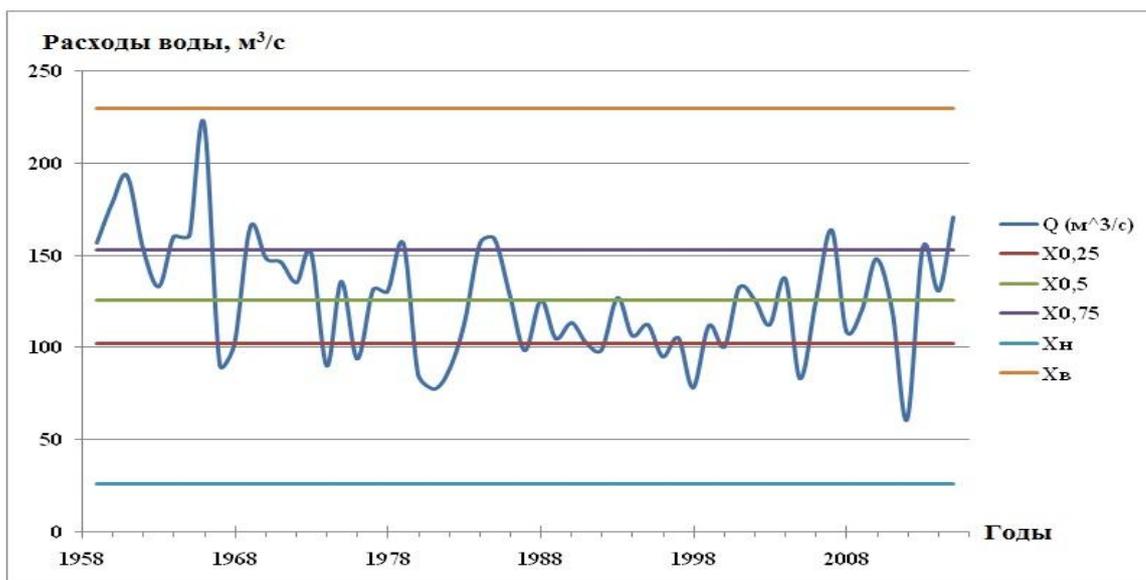


Рисунок 2.5 – Хронологический график расходов воды на р. Чумыш – пгт. Тальменка за 1959 – 2015 гг.

Расходы воды р. Аламбай – с. Казанцево за 1959 – 2015 гг.

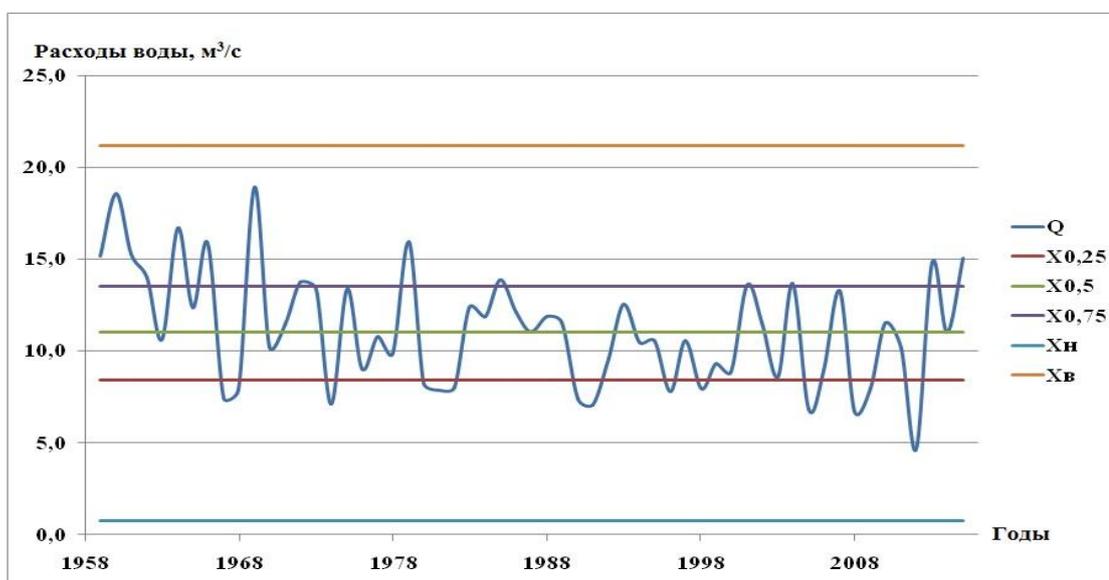


Рисунок 2.6 – Хронологический график расходов воды на р. Аламбай – с. Казанцево за 1959 – 2015 гг.

Расходы воды р. Тогул – с. Тогул за 1959 – 2015 гг.

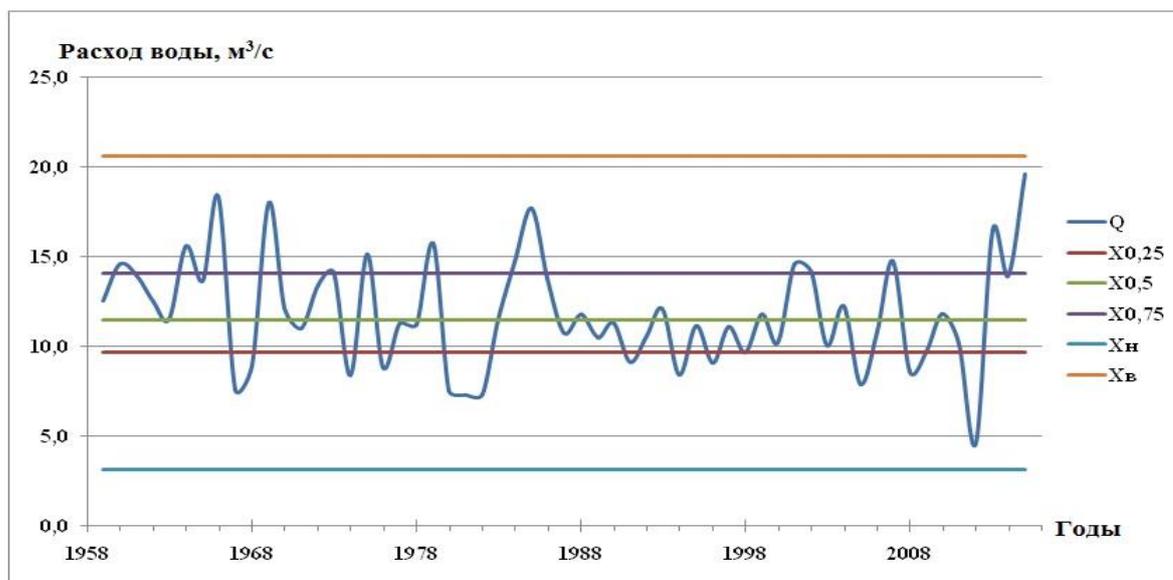


Рисунок 2.7 – Хронологический график расходов воды на р. Тогул – с. Тогул за 1959 – 2015 гг.

Расходы воды р. Тальменка – с. Новоперуново за 1983 – 2015 гг.

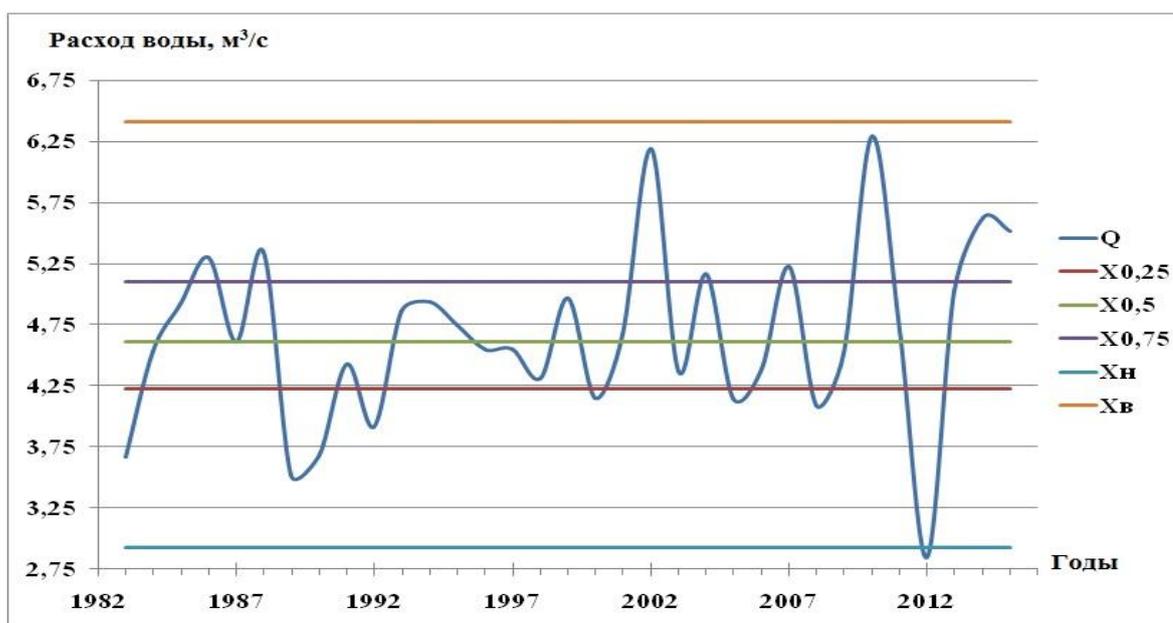


Рисунок 2.8 – Хронологический график расходов воды на р. Тальменка – с. Новоперуново за 1983 – 2015 гг.

Таблица 2.2 – Сведения о маловодных и многоводных годах

Створ	Многоводные	Маловодные	Экстремально многоводные	Экстремально маловодные
р. Чумыш – с. Ельцовка	1961, 1964, 1966, 1973, 1975, 1984, 1985, 2001, 2007, 2013, 2015	1967 – 1968, 1980 – 1982, 1994, 1996, 1998, 2000, 2005, 2008	1971	2012
р. Чумыш – с Кытманово	1966, 1969	1967 – 1968, 1972, 1974, 1976 – 1978, 1980 – 1983, 1986 – 2000, 2003, 2005 – 2006, 2005 – 2006, 2008 – 2011	–	2012
р. Чумыш – г. Заринск	1960 – 1961, 1964, 1966, 1969, 1971, 1973, 1975, 1979, 1984 – 1985, 2013, 2015	1967 – 1968, 1974, 1976, 1980 – 1982, 1998 – 2000, 2005, 2008 – 2009	–	2012
р. Чумыш – пгт Тальменка	1959 – 1962, 1964 – 1966, 1969, 1979, 1984 – 1985, 2007, 2013, 2015	1967 – 1968, 1974, 1976, 1980 – 1982, 1987, 1992, 1996, 1998, 2000, 2005,	–	–

Продолжение таблицы 2.2

Створ	Многоводные	Маловодные	Экстремально многоводные	Экстремально маловодные
р. Аламбай – с. Казанцево	1959 – 1962, 1964, 1966, 1969, 1972, 1979, 2001, 2004, 2013, 2015	1967 – 1968, 1974, 1980 – 1982, 1990 – 1991, 1996, 1998, 2005, 2008 – 2009, 2012	–	–
р. Тогул – с. Тогул	1960, 1964, 1966, 1969, 1973, 1975, 1979, 1984 – 1985, 2001 – 2002, 2007, 2013, 2015	1967-1968, 1974, 1976, 1980 – 1982, 1994, 1996, 1998, 2005, 2008, 2012	–	–
р. Тальменка – с. Новоперуново	1986, 1988, 2001– 2002, 2004, 2007, 2010, 2014 – 2015	1983, 1989 – 1990, 2005, 2008	–	2012

Экстремально многоводный был 1971, но только в верховьях Чумыша на посту с. Ельцовка.

1960, 1961, 1964, 1966, 1969, 1984, 1985, 2013, 2015 года были синхронно многоводные.

1967, 1968, 1974, 1976, 1980-1982, 1998, 2000, 2005, 2008 года были синхронно маловодные (таблица 2.2).

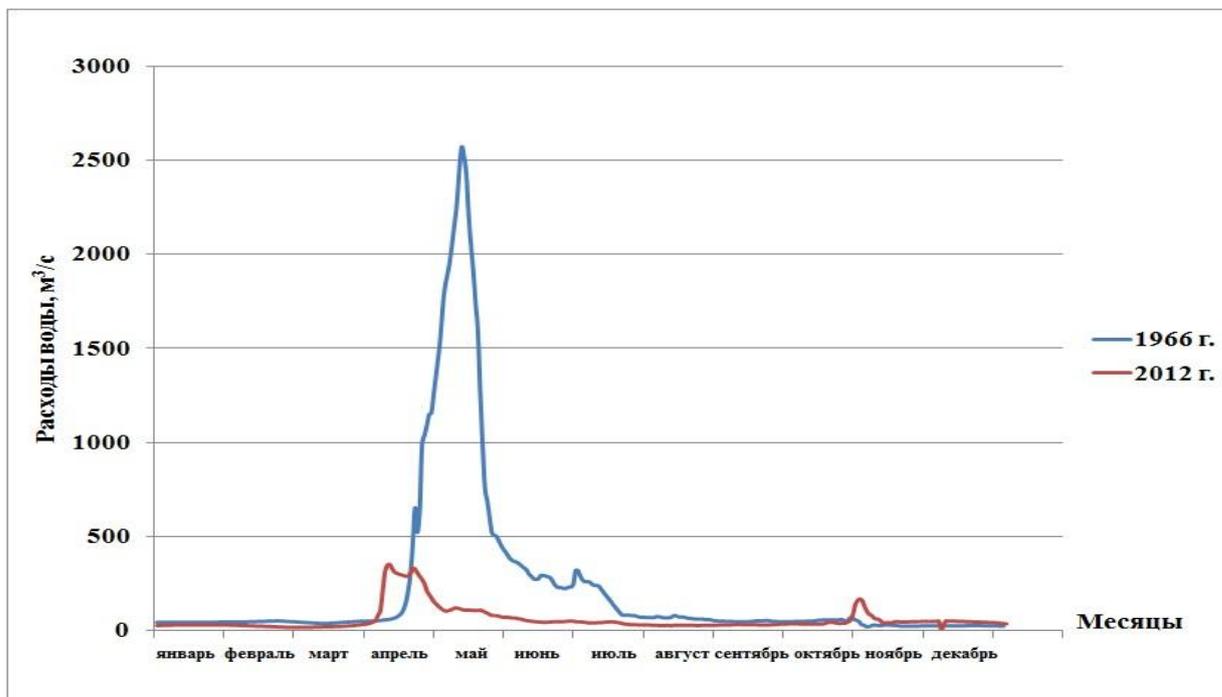


Рисунок 2.9 – Гидрограф маловодного и многоводного года

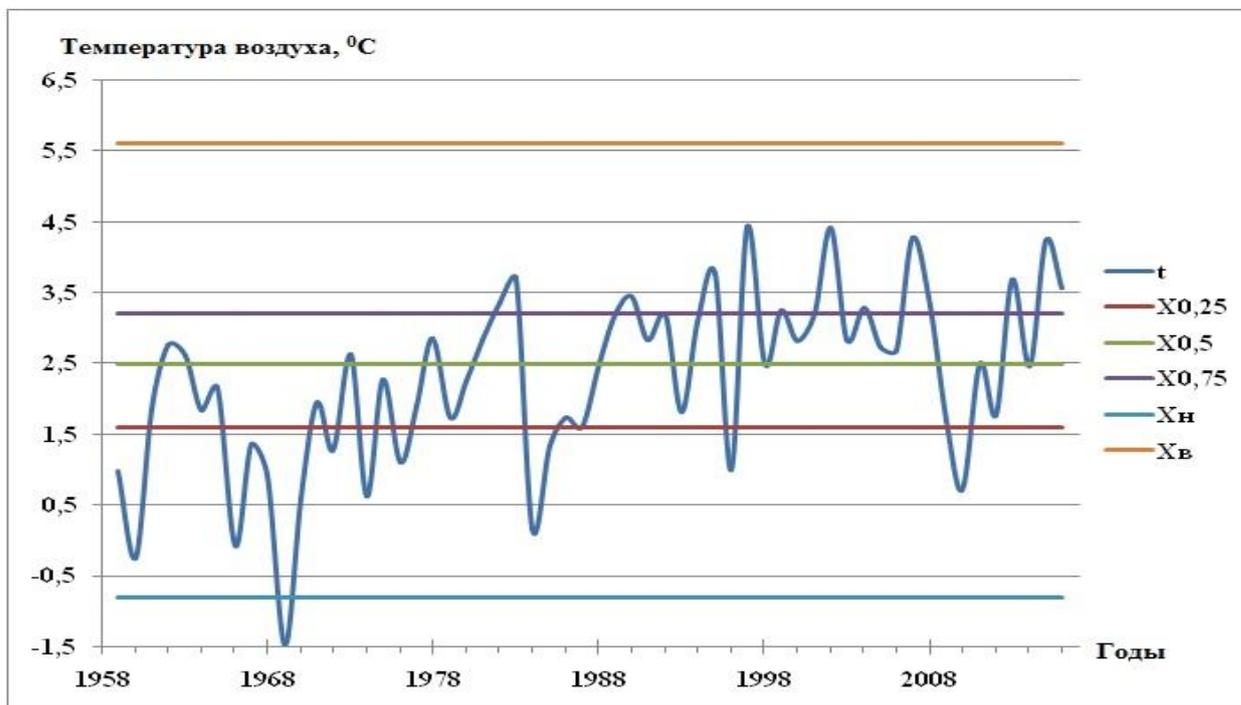


Рисунок 2.10 – Хронологический график хода температур воздуха р. Тогул – с. Тогул за 1959 – 2016 гг.

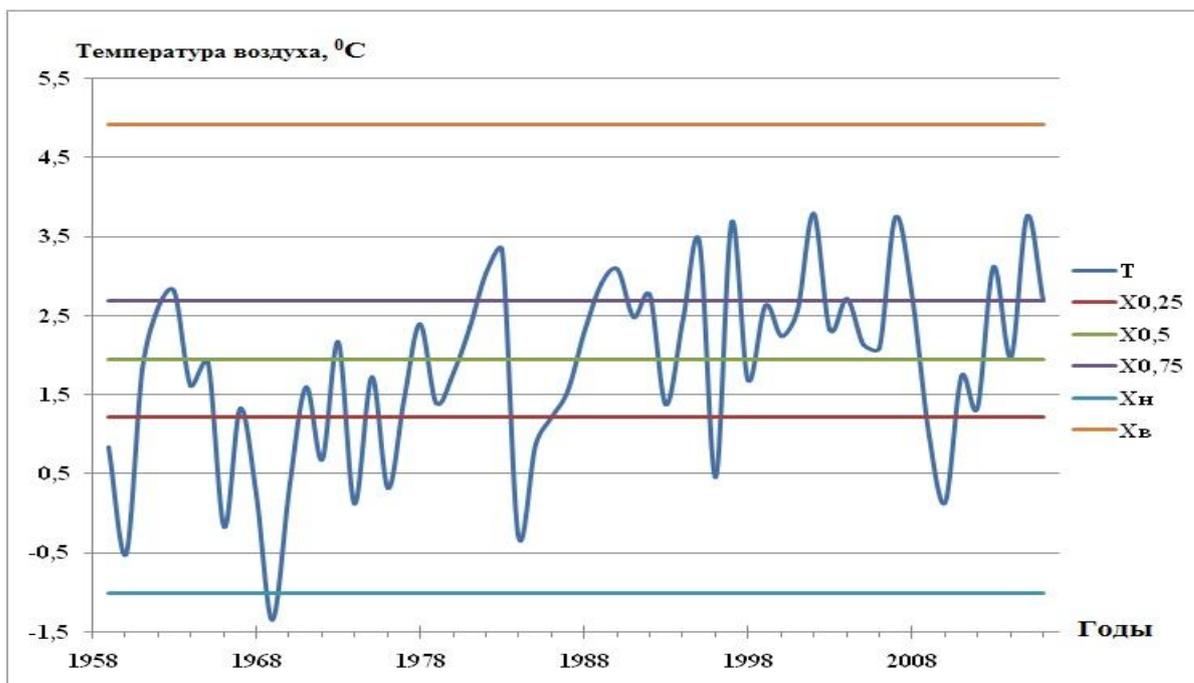


Рисунок 2.11 – Хронологический график хода температур воздуха
р. Чумыш – г. Заринск за 1959 – 2016 гг.

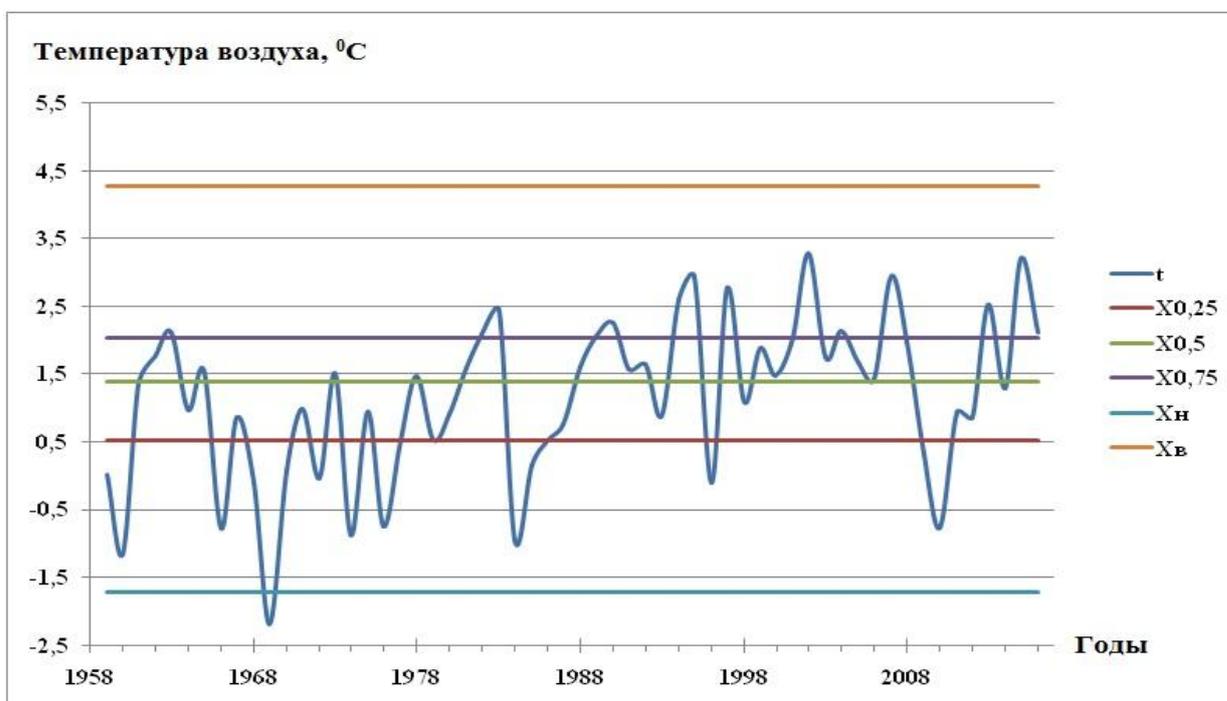


Рисунок 2.12 – Хронологический график хода температур воздуха
р. Тальменка – с. Новоперуново за 1959 – 2016 гг.

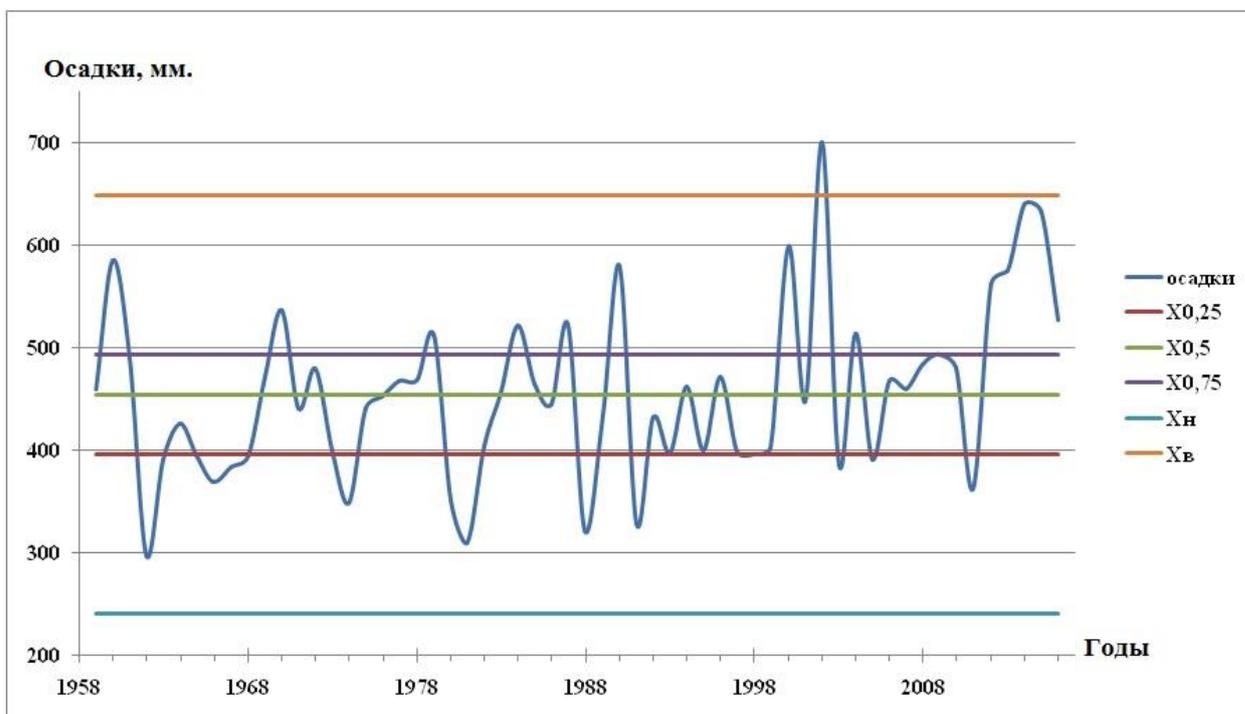


Рисунок 2.13 – Хронологический график хода осадков по метеостанции г. Заринск за 1959 – 2016 гг.

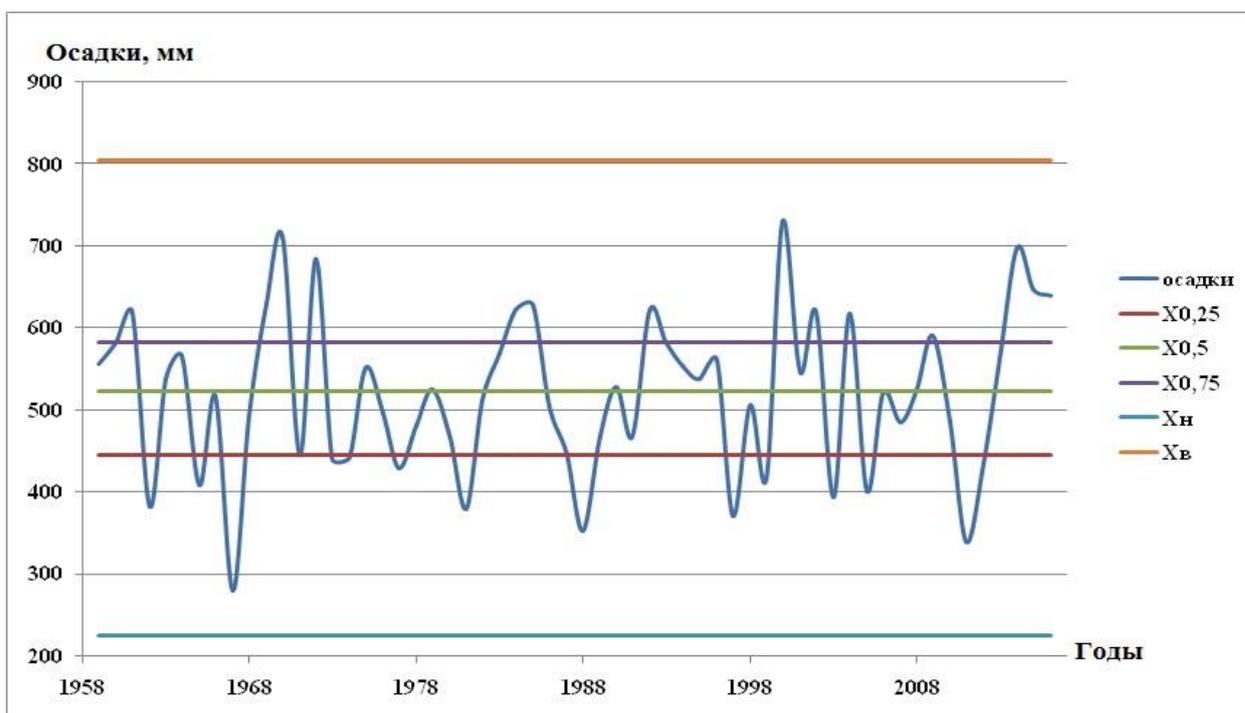


Рисунок 2.14 – Хронологический график хода осадков по метеостанции пгт. Тальменка за 1959 – 2016 гг.

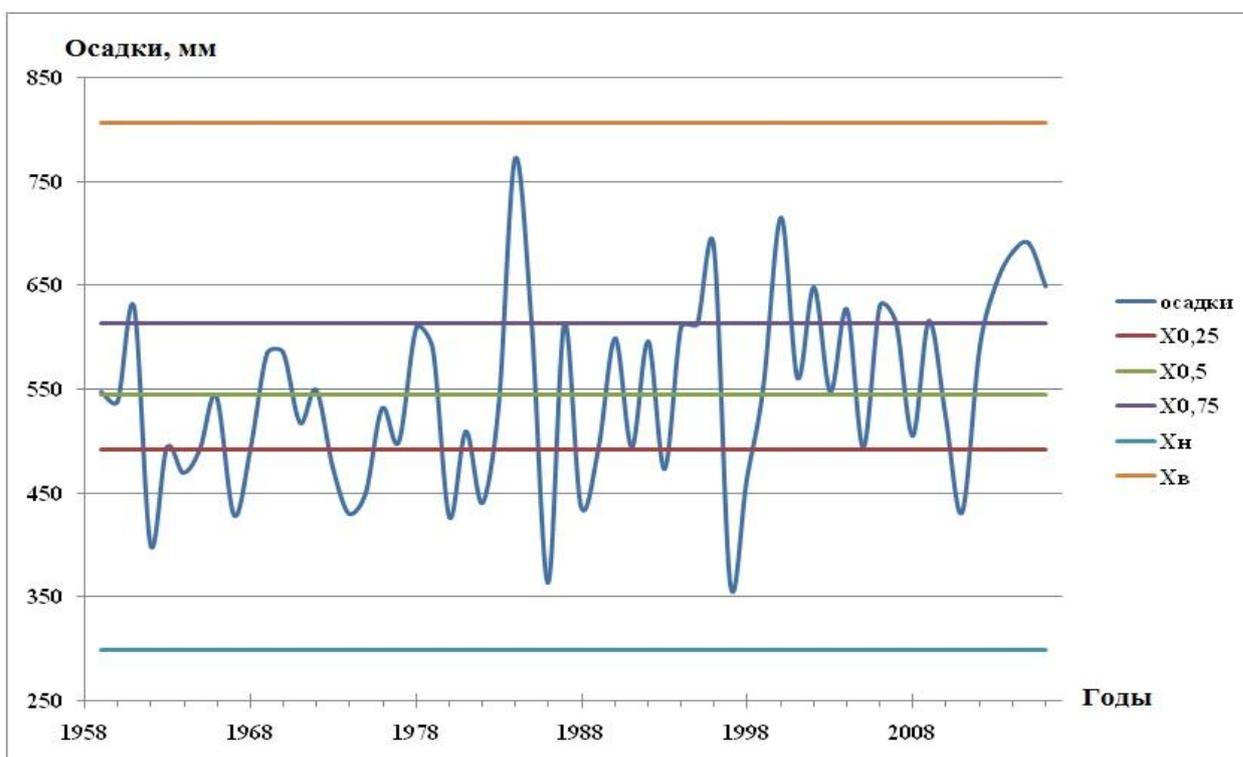


Рисунок 2.15 – Хронологический график хода осадков по метеостанции с. Тогул за 1959 – 2016 гг.

Квантильный анализ температур показывает, что до 1985 года была череда холодных лет, а 1969 год был экстремально холодным. Но после 1985 г. было только два холодных года – это 1996 и 2010.

1984, 2000, 2004, 2014 – 2016 годы были синхронно увлажненные, 1962, 1974 и 2011 годы были синхронно малоувлажненные. А 2002 г. был экстремально увлажненный только на станции г. Заринск.

Как видно из таблицы 2.3, 2012 год был экстремально маловодным на всех постах основной реки, кроме пгт. Тальменка, что, скорее всего, связано с недостаточностью накопления снега зимой. За январь и февраль 2012 года осадков было очень мало. Также за весь 2011 год на всех трёх метеостанциях осадков выпало меньше нормы примерно в полтора раза, что возможно тоже сказалось на водности следующего года.

Таблица 2.3 – Сведения об увлажненных и слабо увлажненных годах

Станция	Увлажнённые	Слабо увлажнен- ные	Экстремально увлажненные
Заринск	1960, 1970, 1979, 1984, 1987, 1990, 2000, 2004, 2012 – 2016	1962 – 1963, 1965 – 1968, 1974, 1980 – 1981, 1998, 1991, 2003, 2005, 2011	2002
Тальменка	1961, 1969 – 1970, 1972, 1984 – 1985, 1992, 2000, 2002, 2004, 2009, 2014 – 2016	1962, 1965, 1967, 1973 – 1974, 1977, 1981, 1988, 1997, 1999, 2003, 2005, 2011 – 2012	-
Тогул	1961, 1984, 1985, 1996, 2000, 2002, 2004, 2006, 2009, 2013 – 2016	1962, 1964, 1967, 1973 – 1975, 1980, 1982, 1986, 1988, 1993, 1997 – 1998, 2011	-

2.2 Выделение трендов фильтром Баттерворта

Одним из методов анализа временных рядов с целью выделения тенденции или трендов на повышение или понижение значений является их фильтрация, которая бывает низкочастотной и высокочастотной, режекторной и полосовой.

Низкочастотная фильтрация – преобразование ряда данных, при котором исключаются высокочастотные составляющие.

Для анализа многолетней изменчивости гидрометеорологических процессов, рекомендуется применять цифровую тангенсную низкочастотную фильтрацию рядов данных. Это связано с тем, что эта фильтрация имеет 2 преимущества, такие как простота вычисления коэффициентов передаточной функции фильтра и большая крутизна амплитудно-частотной характеристики вблизи частоты среза.

Одна из исчерпывающих характеристик – передаточная функция фильтра $H(\omega)$.

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\sum_{k=0}^K \beta_k Z^{-k}}{1 + \sum_{l=1}^L \alpha_l Z^{-l}} \quad (2.7)$$

где – $H(\omega)$ передаточная функция;

$X(\omega)$ их Фурье – изображение;

$Y(\omega)$

β_k, α_l действительные числа, коэффициенты фильтра;

$Z = \exp(i\omega\Delta)$;

Δ интервал дискретизации рядов $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$.

Передаточная функция фильтра $H(\omega)$ выражает связь между частотными представлениями рядов $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$ и имеет значения в комплексной области, т.е. $H(\omega)$ можно представить в виде:

$$H(\omega) = |H(\omega)| \exp(i\varphi(\omega)) \exp(-i\varphi(\omega)), \quad (2.8)$$

$$H(\omega) = \frac{(b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2})^{M_1}}{\prod_{m=1}^{M_1} (1 + a_{1m} Z^{-1} + a_{2m} Z^{-2})} \quad (2.9)$$

где – $H(\omega)$ передаточная функция;

$b_0, b_1, b_2, a_{1m}, a_{2m}$ коэффициенты.

Величина $M=2M_1$ называется порядком передаточной функции или порядком фильтра.

При таком представлении $|H(\omega)|$ называют амплитудно-частотной характеристикой фильтра. В любой точке частотного диапазона эта характеристика показывает отношение амплитуд гармоник отфильтрованного и не отфильтрованного ряда данных с заданной частотой. Функцию $\varphi(\omega)$ – фазово-частотная характеристика фильтра. Она показывает зависимость сдвига фаз от частоты в отфильтрованном и не отфильтрованном рядах данных.

Тангенсные цифровые фильтры Баттерворта имеют передаточную функцию вида (2.10), что позволяет применить вышеуказанный метод фильтрации, обладающий

- рекуррентным способом вычисления отфильтрованного ряда;
- возможность повышения порядка фильтра увеличением числа уравнений.

Тангенсный низкочастотный фильтр Баттерворта порядка M имеет амплитудно-частотную характеристику.

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\omega\Delta}{2}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\omega_c\Delta}{2}\right)} \right]^{2M}}} \quad (2.10)$$

где ω_c – частота среза.



Рисунок 2.2.1 – Хронологический график реализации среднегодовых расходов воды р. Чумыш – с. Ельцовка за 1960 – 2015 гг.



Рисунок 2.2.2 – Хронологический график реализации среднегодовых расходов воды р. Чумыш –с. Кытманово за 1963 – 2015 гг.



Рисунок 2.2.3 – Хронологический график реализации среднегодовых расходов воды р. Чумыш – г. Заринск за 1959 – 2015 гг.



Рисунок 2.2.4 – Хронологический график реализация среднегодовых расходов воды р. Чумыш – пгт. Тальменка за 1959 – 2015 гг.

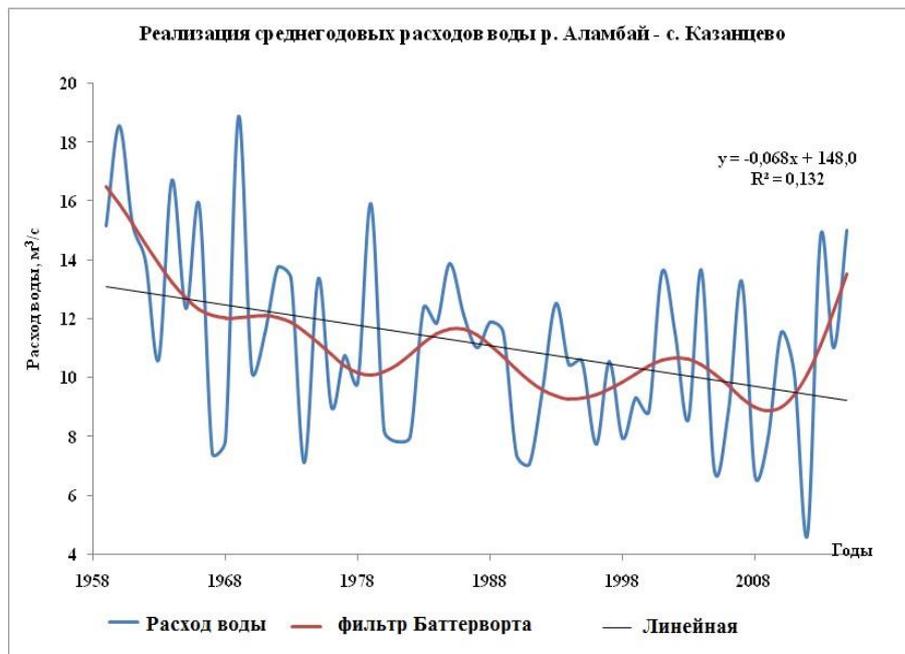


Рисунок 2.2.5 – Хронологический график реализация среднегодовых расходов воды р. Аламбай – с. Казанцево за 1959 – 2015 гг.



Рисунок 2.2.6 – Хронологический график реализация среднегодовых расходов воды р. Тогул – с. Тогул за 1959 – 2015 гг.



Рисунок 2.2.7 – Хронологический график реализация среднегодовых расходов воды р. Тальменка – с. Новоперуново за 1983 – 2015 гг.

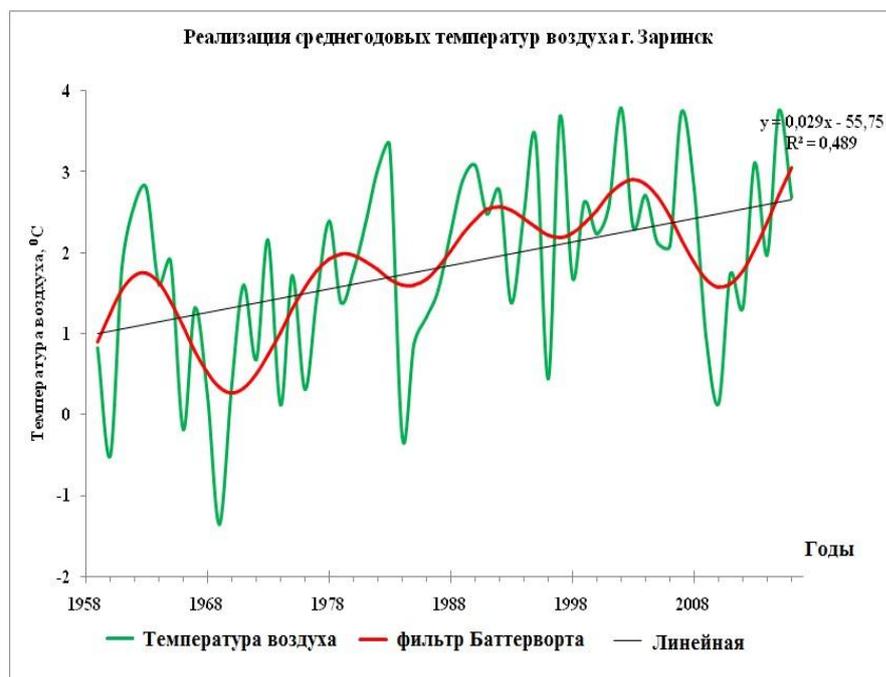


Рисунок 2.2.8 – Хронологический график реализация среднегодовых температур воздуха г. Заринск за 1959 – 2016 гг.



Рисунок 2.2.9 – Хронологический график реализация среднегодовых температур воздуха пгт. Тальменка за 1959 – 2016 гг.



Рисунок 2.2.10 – Хронологический график реализация среднегодовых температур воздуха с. Тогул за 1959 – 2016 гг.



Рисунок 2.2.11 – Хронологический график реализация годовых сумм осадков г. Заринск за 1959 – 2016 гг.



Рисунок 2.2.12 – Хронологический график реализация годовых сумм осадков пгт. Тальменка за 1959 – 2016 гг.



Рисунок 2.2.13 – Хронологический график реализация годовых сумм осадков с. Тогул за 1959 – 2016 гг.

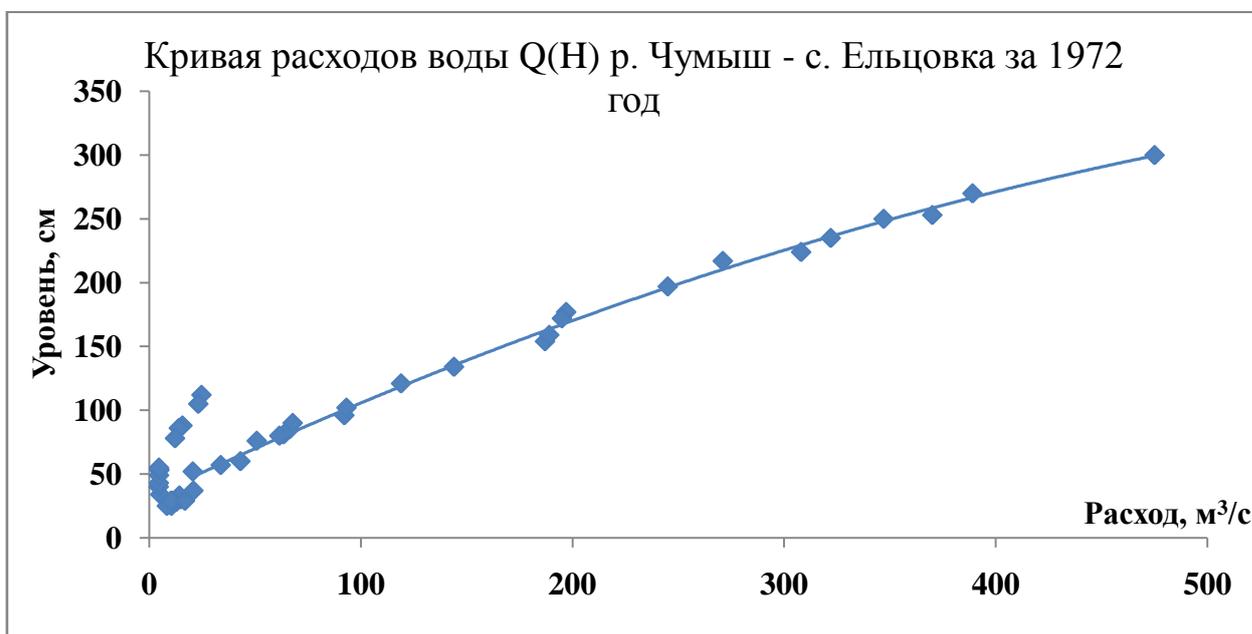


Рисунок 2.2.14 – Кривая расходов воды $Q(H)$ за 1972 год р. Чумыш с. Ельцовка

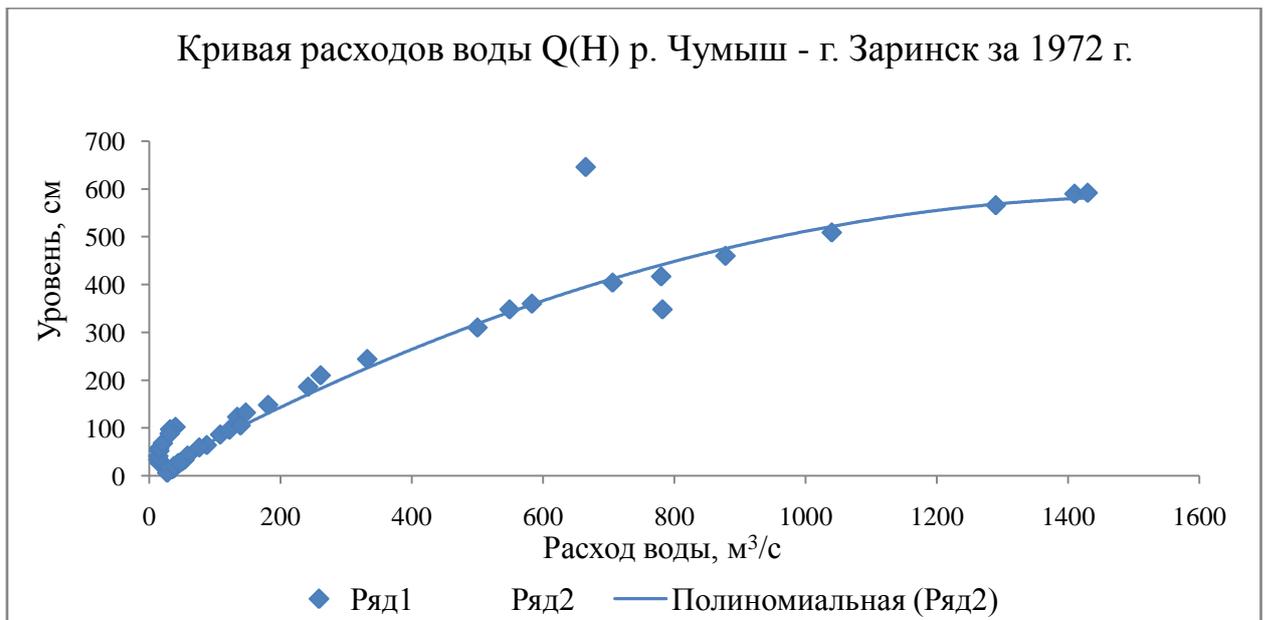


Рисунок 2.2.15 – Кривая расходов воды $Q(H)$ за 1972 год р. Чумыш г. Заринск

На двух кривых $f=Q(H)$ видно, что некоторые точки сильно отклоняются от самой кривой. Это говорит о том что на кривых должны быть петли. Отклонение точек на рисунке 2 сильнее, чем на рисунке 1. Если проанализировать следующие года, ситуация повторяется. Значит, идет размыв русла реки. А в Заринске деформация русла идет интенсивнее за счёт того неподалеку от города идёт добыча песка из русла реки.

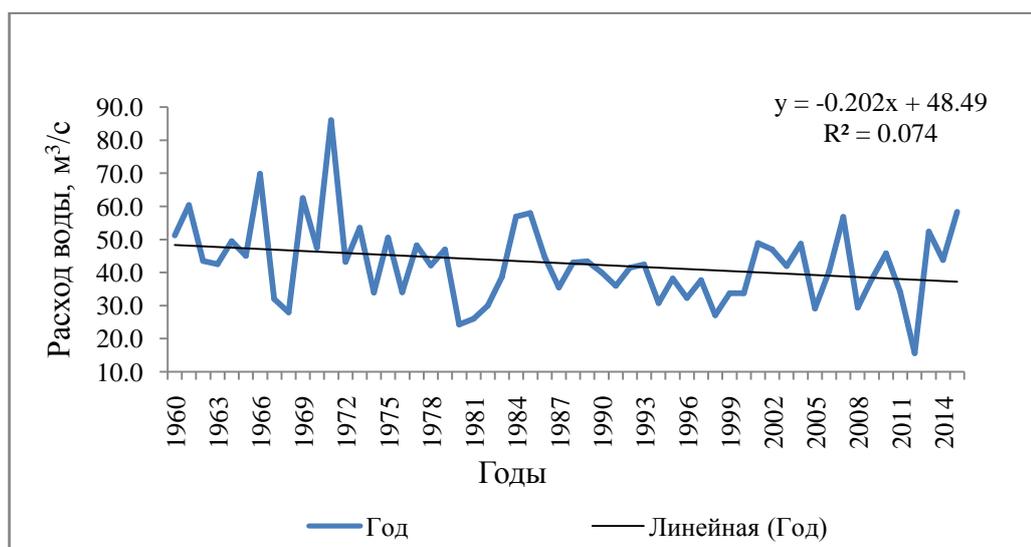


Рисунок 2.2.16 – Расходы воды с. Ельцовка река Чумыш

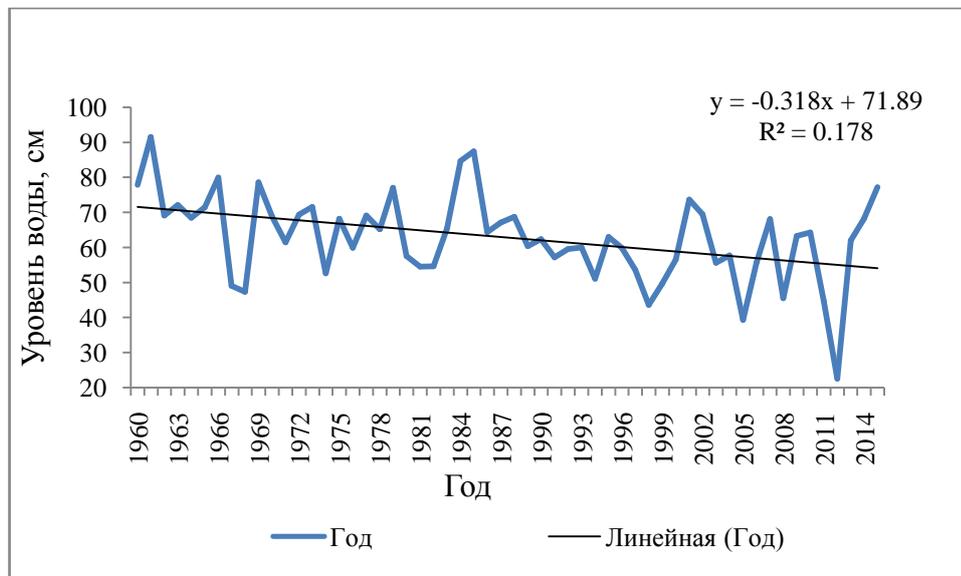


Рисунок 2.2.17 – Уровни воды с Ельцовка

Сравнение временного хода расходов и уровней воды на посту с. Ельцовка на р. Чумыш за период с 1959 года по 2015 год показывает более выраженное снижение уровня воды, чем расхода. Значимость тренда изменения расходов составляет 2.18, а уровней 3.81

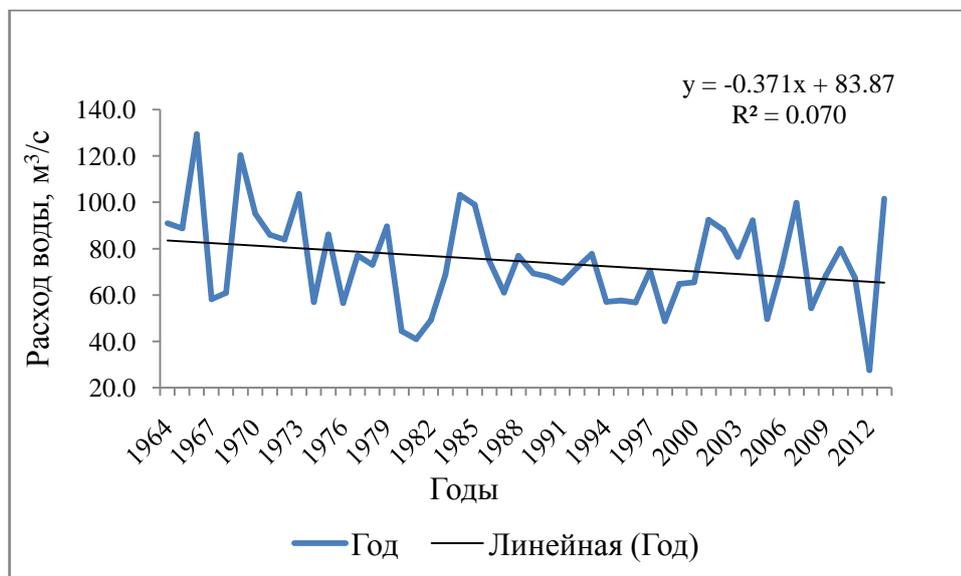


Рисунок 2.2.18 – Расходы воды р. Чумыш – с. Кытманово

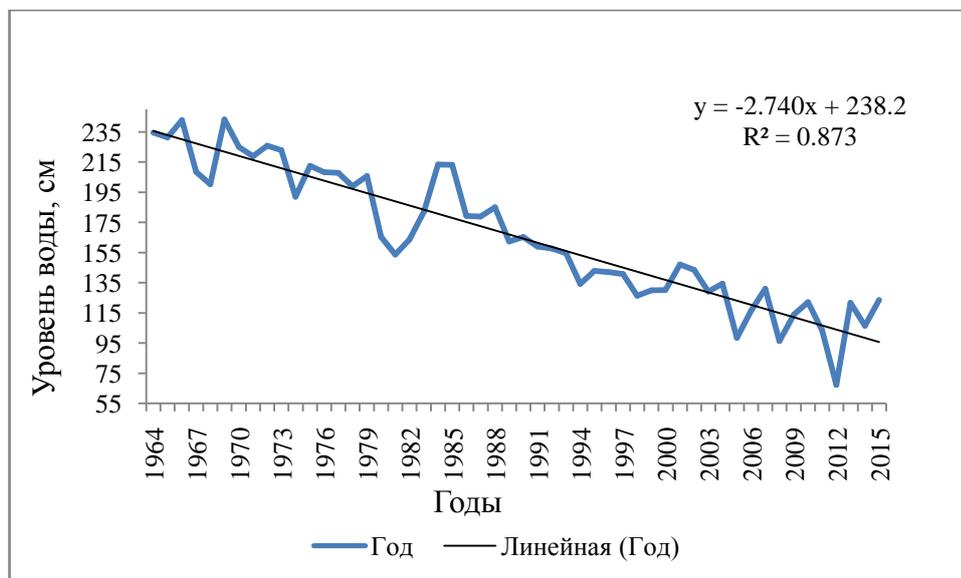


Рисунок 2.2.19 – Уровни воды р. Чумыш – с. Кытманово.

Сравнение временного хода расходов и уровней воды на посту пос. Кытманово на р. Чумыш за период с 1959 года по 2013 год показывает более выраженное снижение уровня воды, чем расхода. Значимость тренда изменения расходов составляет 2.005, а уровней 52.8

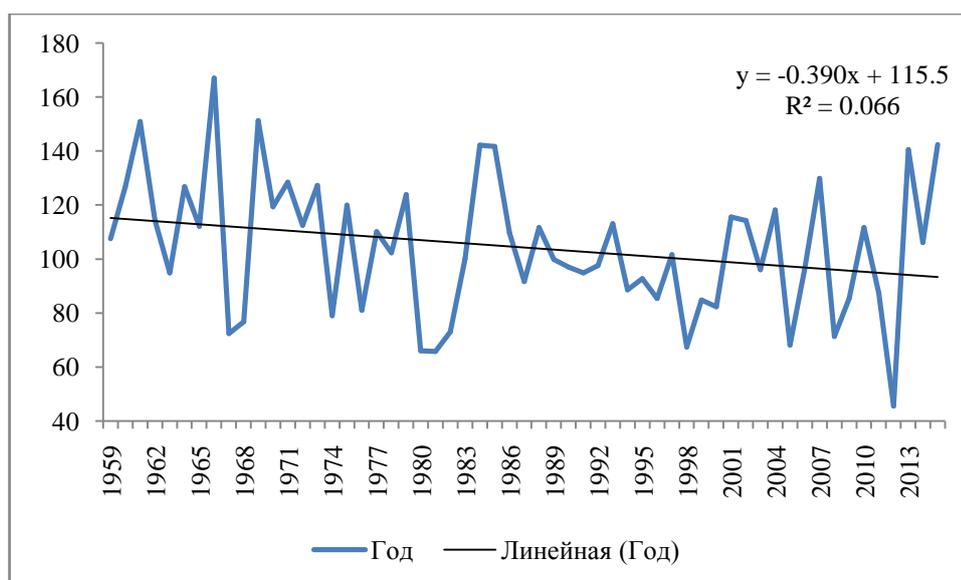


Рисунок 2.2.20 – Расход воды р. Чумыш – г. Заринск

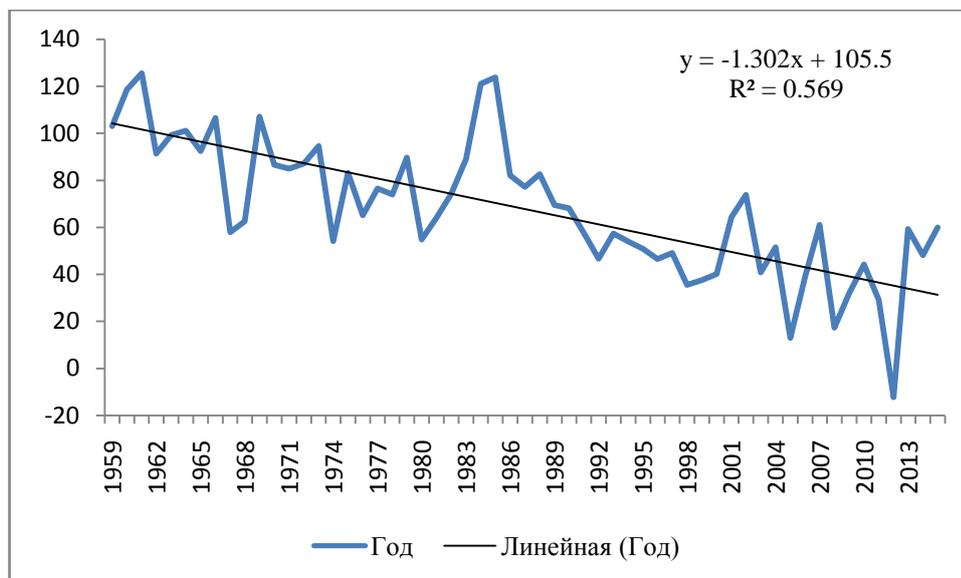


Рисунок 2.2.21 – Уровень воды г. Заринск

Сравнение временного хода расходов и уровней воды на посту г. Заринск р. Чумыш за период с 1959 года по 2015 год показывает более выраженное снижение уровня воды, чем расхода. Значимость тренда изменения расходов составляет 2.07, а уровней 13.1.

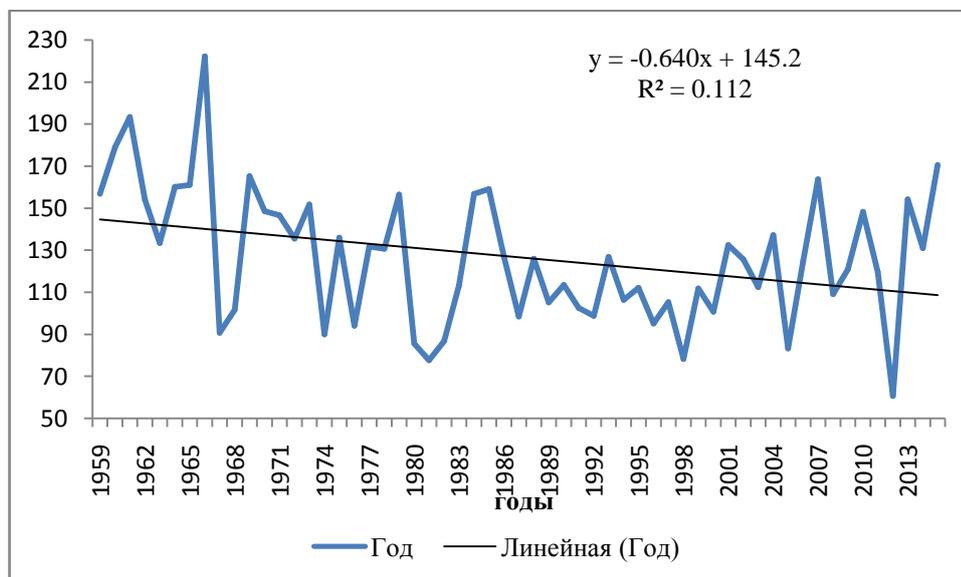


Рисунок 2.2.22 – Р. Чумыш – пгт. Тальменка. Расход воды

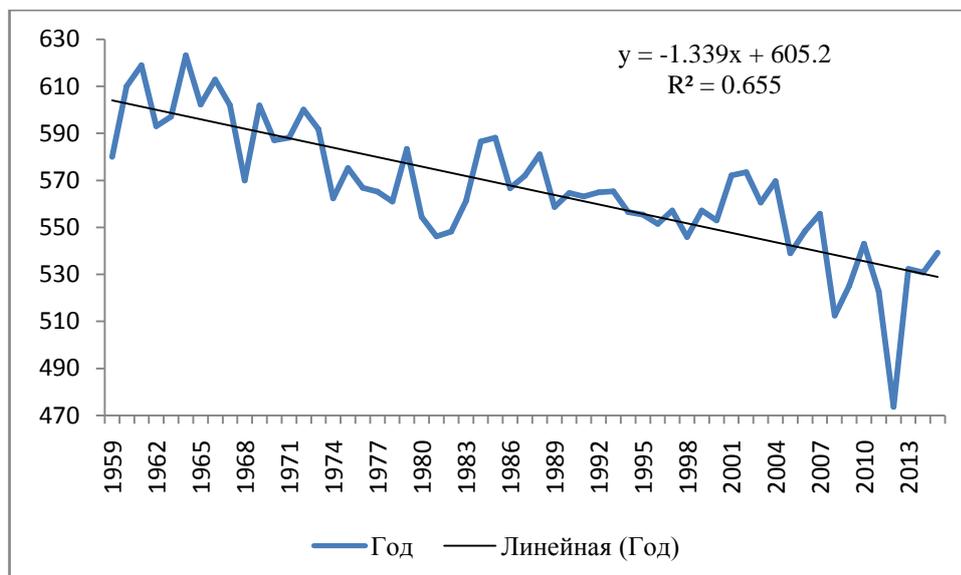


Рисунок 2.2.23 – Уровни воды р. Чумыш пгт Тальменка.

Сравнение временного хода расходов и уровней воды на посту пгт Тальменка р. Чумыш за период с 1959 года по 2015 год показывает более выраженное снижение уровня воды чем расхода. Значимость тренда изменения расходов составляет 2.83, а уровней 17.59.

Уменьшение годовых расходов воды связано с уменьшениями расходов в мае, а тенденция к снижению уровней воды наблюдается в течении всего года.

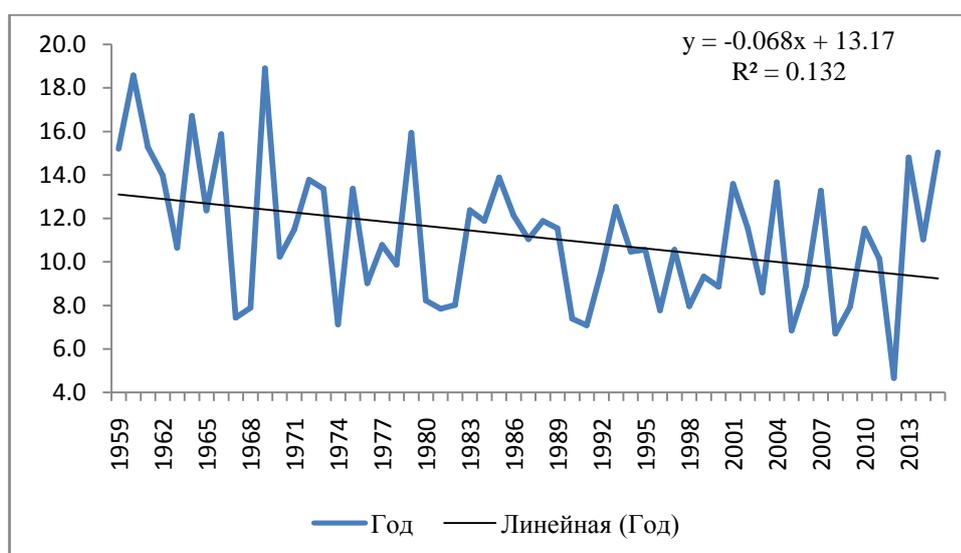


Рисунок 2.2.24 – График расходов воды р. Аламбай с. Казанцево

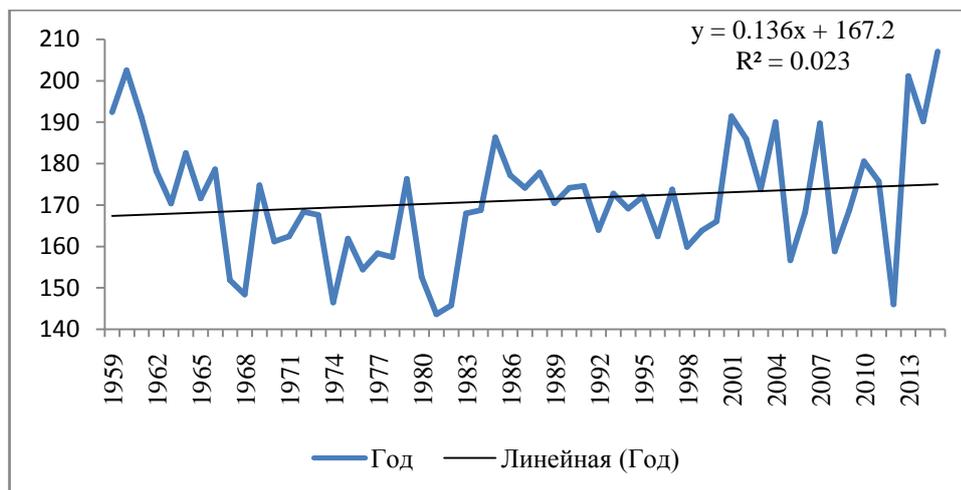


Рисунок 2.2.25 – Уровень воды р. Аламбай – с. Казанцево

Сравнение временного хода расходов и уровней воды на посту с. Казанцево р. Аламбай за период с 1959 года по 2015 год показывает разнонаправленность тренда. Значимость тренда изменения расходов составляет 2.83, а уровней 17.59. Уменьшение расходов воды обусловлено снижением расходов воды в мае. Повышение значений уровня воды от года к году происходит в основном за счёт апрельских значений. Это обусловлено, скорее всего спецификой ледовых явлений, а именно идёт оседания льда и за счет этого идёт поднятие уровня.

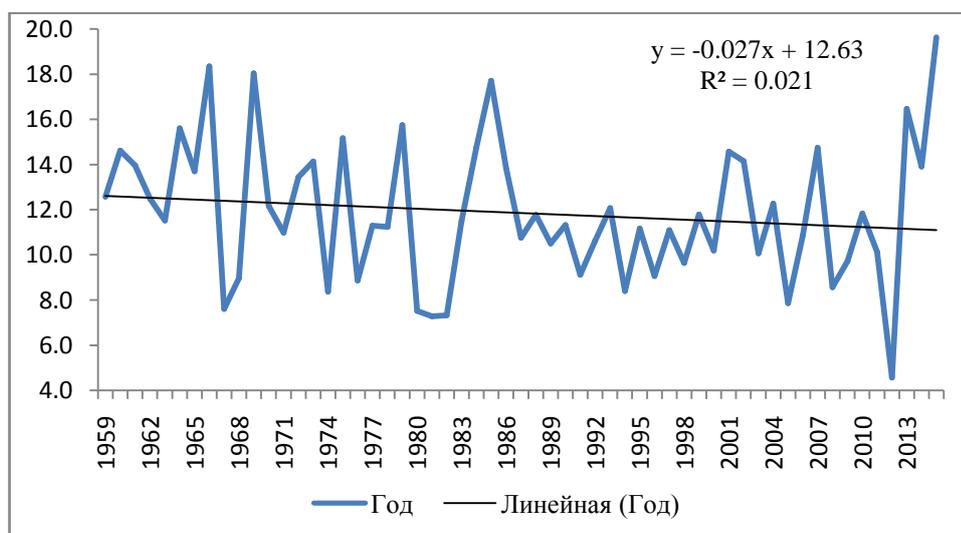


Рисунок 2.2.26 – График расходы воды р. Тогул с. Тогул.

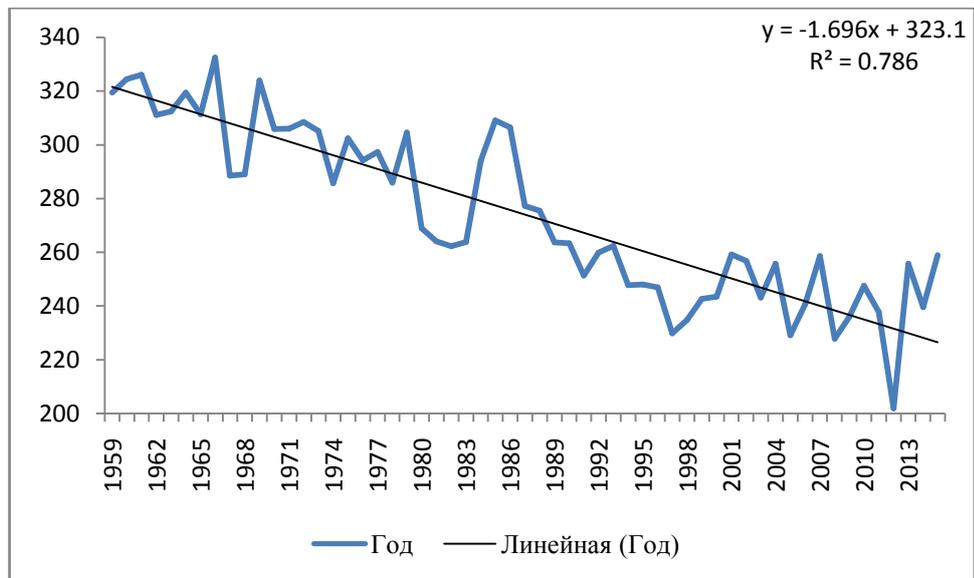
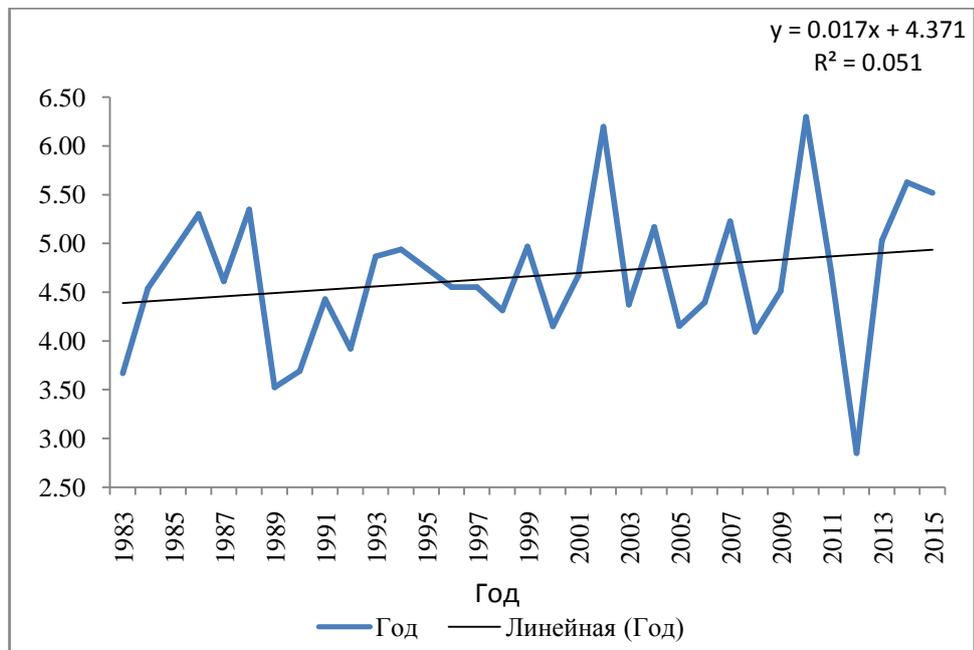
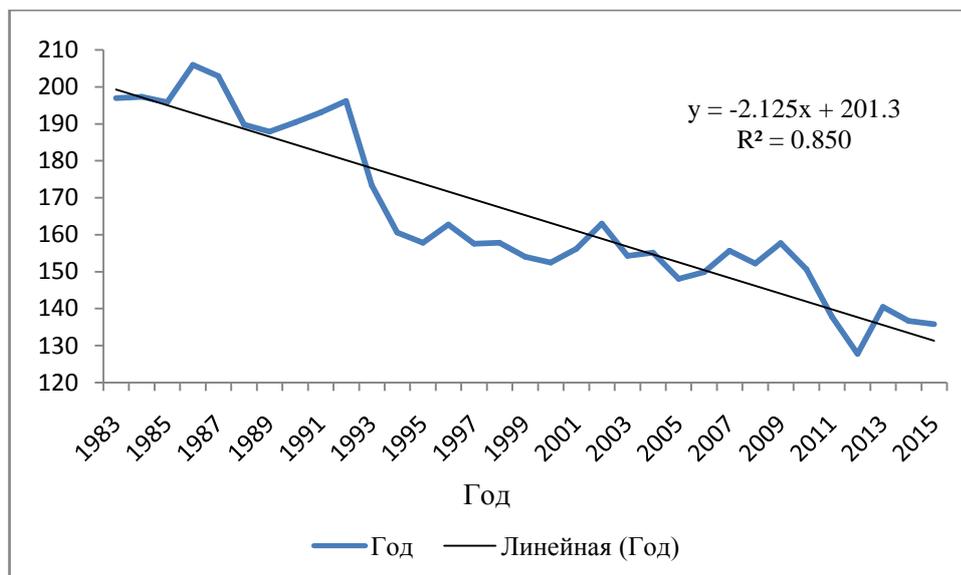


Рисунок 2афик уровней воды. Р. Тогул – с. Тогул



Расходы воды р. Тальменка – с. Новоперуново



Уровни воды р. Тальменка – с. Новоперуново.
 В конце рассматриваемого периода наблюдались многоводные года, значение которых очень повлияли на общий результат.

3 Внутригодовые колебания речного стока.

3.1 Методы теории периодически коррелированных случайных процессов

Расчет внутригодового распределения стока представляет собой количественную оценку распределения стока по сезонам, месяцам, а также по декадам и неделям внутри месяца. Выражается обычно в процентах или долях от годового (при сезонном и месячном распределении) стока. Это позволяет иметь данные о стоке в конкретные (календарные) отрезки времени. Таким образом, при расчете внутригодового распределения стока, необходимо решить две задачи: установить соотношение стока за разные временные отрезки и его величину за эти периоды.

Для характеристики годового (внутригодового) хода стока рек традиционно используется годовые гидрографы (хронологические графики изменения расхода со временем), полученные с различной степенью обобщения по данным о срочных или средних (суточных, декадных, месячных) расходах воды рек. В качестве исходной информации для анализа внутригодового колебания речного стока в настоящей работе использованы среднемесячные расходы воды по реке Урал в створах – г. Верхнеуральск, Верхнеуральское вдхр., Магнитогорское вдхр., с. Кизильское.

Для анализа внутригодового хода речного стока воспользуемся методом теории 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.

Оценки вероятностных характеристик периодически коррелированных случайных процессов рассчитываются по следующим формулам:

$$m^*_{(t)} = \sum \xi(t+KT) \quad (3.1)$$

где $m^*_{(t)}$ – математическое ожидание;

$$D^*_{(t)} = \sum [\xi^0(t+KT)]^2 \quad (3.2)$$

где $D^*_{(t)}$ – дисперсии;

Оценка математического ожидания при этом характеризует средний многолетний повторяющийся образ и соответствует понятию норма, принятому в гидрометеорологии. Оценка дисперсии периодически коррелированных случайных процессов характеризует отклонения процесса от среднего многолетнего повторяющегося образа. Оценка коррелированных зависимостей $K(t, \tau)$ характеризует особенности внутригодовой коррелированности при $\tau=1$ месяц, и особенности межгодовой коррелированности при $\tau=1$ год, где τ – это сдвиг при расчете коррелированных зависимостей.

При оценке вероятностных характеристик $m^*(t)$, $D^*(t)$, по реализациям средних месячных расходов производится выборка ежегодных последовательностей для каждого месяца года и рассмотрение этих последовательностей как стационарных и стационарно связанных.

Река Чумыш по климатическим особенностям формирования стока, по характеру водного питания и внутригодового распределения стока относится к группе рек Восточно-Европейского типа по классификации Б. Д. Зайкова.

Для рек такого типа характерны высокое весеннее половодье, летне-осенние паводки и очень низкая межень.

3.2 Особенности внутригодового хода речного стока

Графики оценок вероятностных характеристик ПКСП (математического ожидания $m(t)$, дисперсии $D(t)$, корреляционных зависимостей внутригодовой $K(t,\tau)$ при $\tau=1$ месяц и межгодовой при $\tau=1$ год изменчивости) анализируемой реки Чумыш приведены на рисунках 3.5 и 3.8. Они дают количественные оценки тех особенностей внутригодового хода и межгодовой изменчивости речного стока, что были отмечены при анализе исходных данных. Так, графики

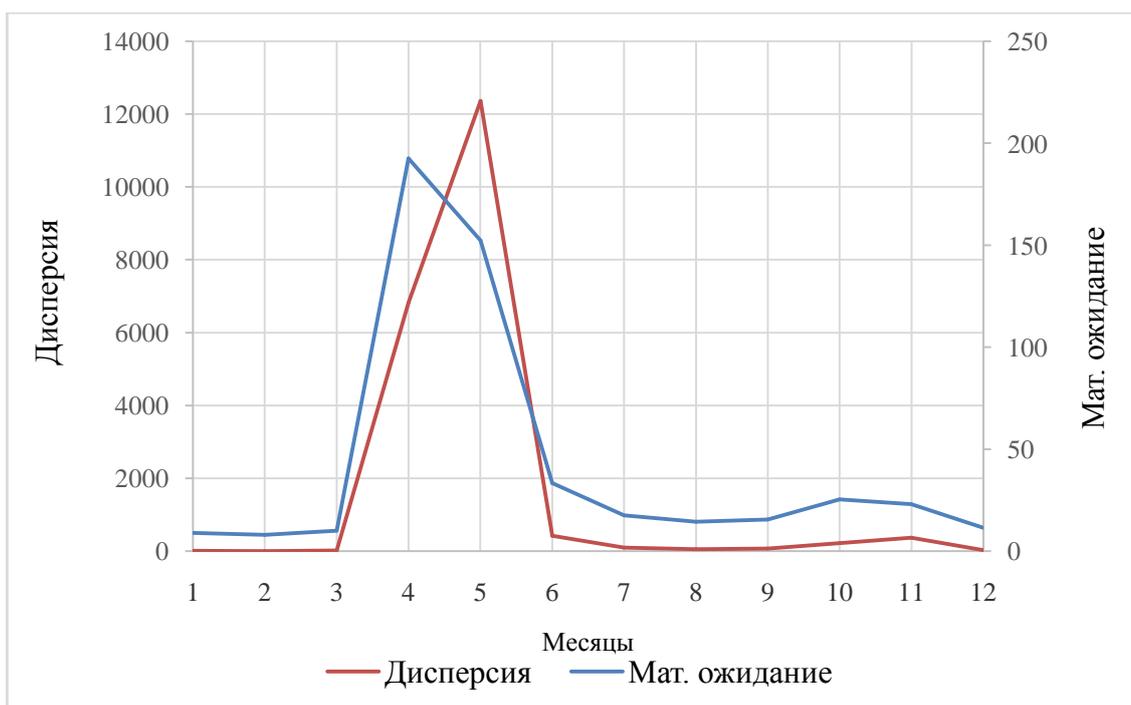


Рисунок 3.5 – График оценки математического ожидания и дисперсии средних месячных значений расхода воды р. Чумыш – с. Ельцовка.

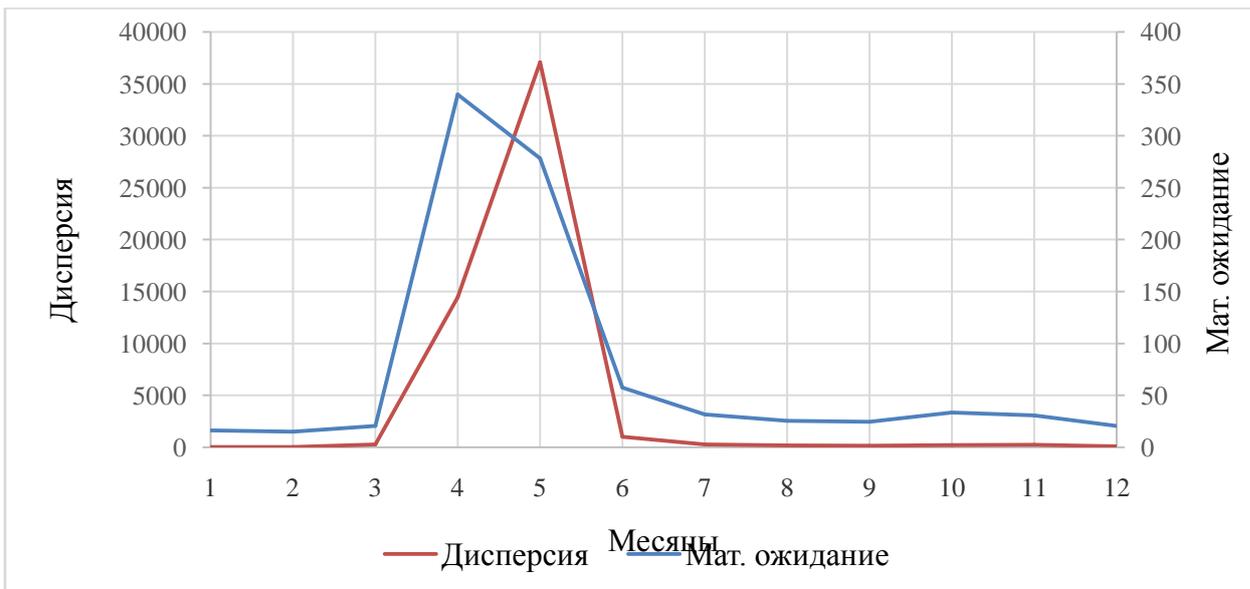


Рисунок 3.5 –График оценки математического ожидания и дисперсии средних месячных значений расхода воды р. Чумыш – с. Кытманово.

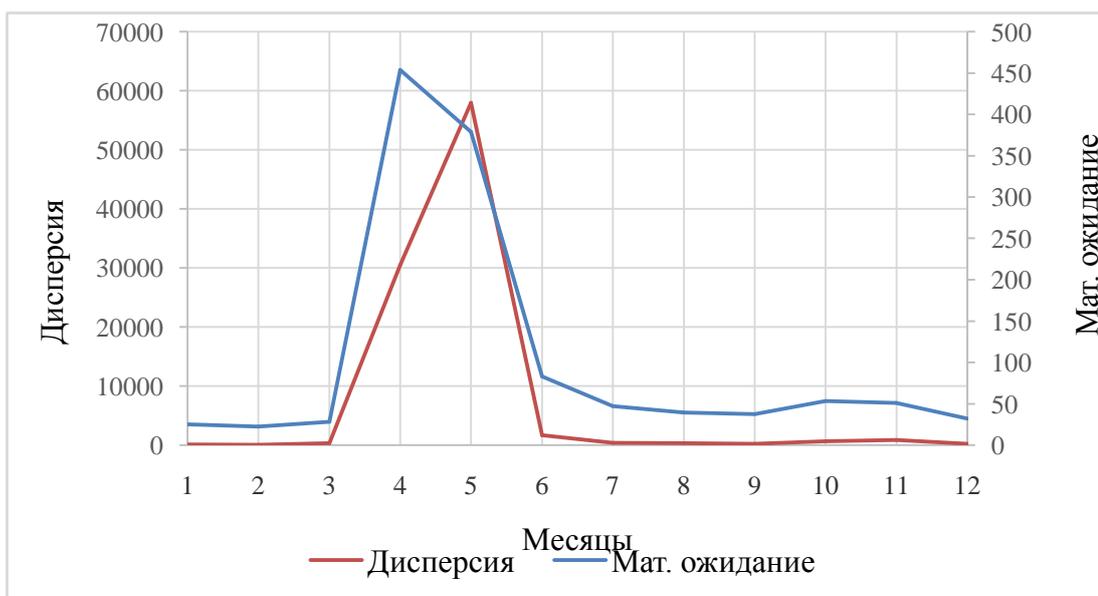


Рисунок 3.5 – График оценки математического ожидания и дисперсии средних месячных значений расхода воды р. Чумыш – г.Заринск.

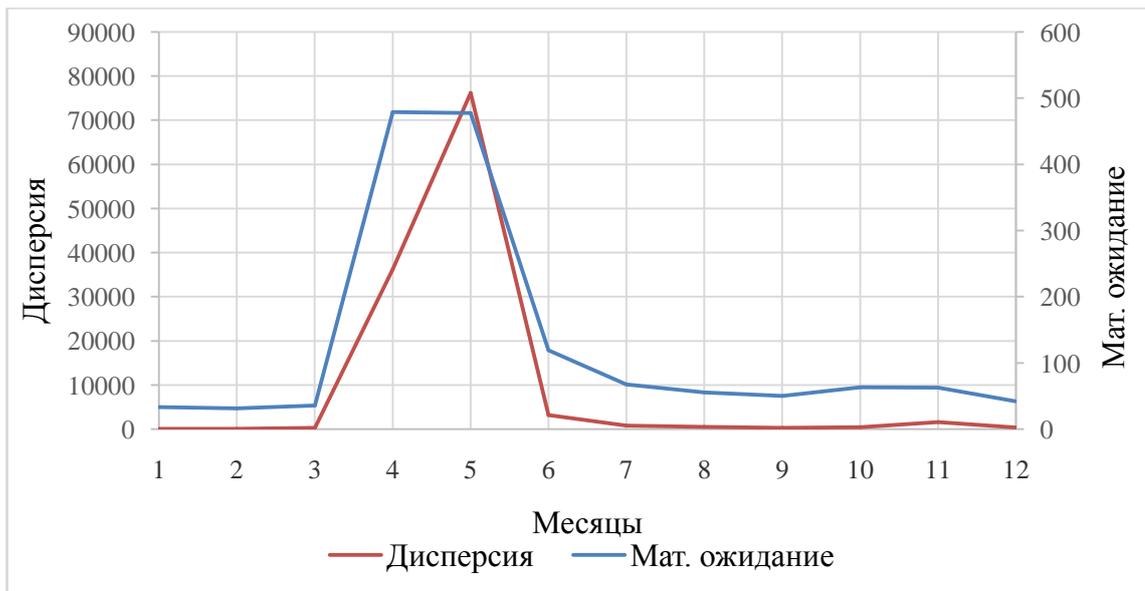


Рис. 3.8. График оценки математического ожидания и дисперсии средних месячных значений расхода воды р. Чумыш – пгт Гальменка.

Математическое ожидание показывает внутригодовой ход стока, а дисперсия показывает межгодовую изменчивость. Основным максимумом наблюдается в период весеннего половодья (вторая декада марта — начало июля). Максимум дождевых паводков приходится на октябрь. Минимумы на кривых математического ожидания $m(t)$ показывают зимнюю межень, которая длится с ноября по март. Кривые дисперсии $D(t)$ практически дублируют особенности кривых математического ожидания $m(t)$, исключением является месяц апрель. Это объясняется тем, что пик весеннего половодья из года в год из-за изменения (приходится то на май, то на апрель) из-за значимого тренда на повышения температуры воздуха

3.3 Обобщение результатов анализа временной изменчивости речного стока в терминах вероятностной модели.

Алгоритм анализа исходных реализаций стока реки, основанный на выделении из последовательностей средних месячных величин 12 ежегодных подпоследовательностей значений для каждого месяца года, приводит к це-

лесообразности рассмотрения внутригодового хода и межгодовой изменчивости анализируемых процессов как многомерного случайного вектора

$$\beta_t = \{\beta_{1,t}, \dots, \beta_{12,t}\}^T.$$

Обобщим полученные в ходе анализа результаты о внутригодовых и межгодовых изменениях речного стока путем вероятностного моделирования. Под вероятностной моделью процесса будем понимать параметрически заданную дискретную случайную функцию, позволяющую воспроизводить ряд случайных значений с теми же вероятностными свойствами, что и ряд исходных значений. Опишем каждую компоненту вектора β_{it} , т. е. каждую подпоследовательность ежегодных значений расходов, модельным процессом AP (1). В этом случае модель примет вид

$$\beta_{it} = \varphi_i \beta_{it-1} + \varepsilon_{it}, \quad i=1, \dots, 12, \quad (3.3)$$

где ε_{it} – дискретная последовательность белого шума с нулевым средним и дисперсией δ_i^2 ; φ_i – параметр авторегрессии.

Параметры модели определяются через компоненты корреляционной матрицы следующими соотношениями:

$$\varphi_i = K_{i, i+1} / K_{i, i} \quad (3.4)$$

$$\delta_i^2 = (1 - \varphi_i^2) K_{i, i}$$

Дополнив модель членами m , учитывающими среднее каждого месяца года, получим

$$\beta_t = \varphi \beta_{t-1} + \varepsilon_t + m, \quad (3.5)$$

где $\beta_t = \{\beta_{1,t}, \dots, \beta_{12,t}\}$; $\varphi \beta_{t-1} = \{\varphi_1 \beta_{1,t-1}, \dots, \varphi_{12} \beta_{12,t-1}\}$; $\varepsilon_t = \{\varepsilon_{1,t}, \dots, \varepsilon_{12,t}\}$ – вектор белого шума с нулевым средним и дисперсией $\delta^2 = \{\delta_{1,t}^2, \dots, \delta_{12,t}^2\}$;

$m = \{m_1, \dots, m_{12}\}$ – вектор математического ожидания; $\varphi_1, \dots, \varphi_{12}$ – параметры модели.

Для процессов с несущественными внутригодовыми связями, которым соответствует сток рек со слабой естественной зарегулированностью, запись модели будет задаваться 12 параметрами $\varphi_1, \dots, \varphi_{12}$, которые характеризуют корреляционные зависимости межгодовой изменчивости для каждого месяца года в виде (3.3), средним m_i и дисперсией δ^2 . Параметры $\varphi_1, \dots, \varphi_{12}$ определяются через компоненты матрицы межгодовой изменчивости по соотношению (3.4).

Для процессов с существенными внутригодовыми связями, которым соответствует сток рек с существенно зарегулированным стоком, в модели (3.3) необходимо учитывать взаимную коррелированность компонент $\{\beta_t^i\}$ через задания взаимных членов. В этом случае модель (3.5) примет вид

$$\beta_{it} = \varphi_{i,1} \beta_{i,t-1} + \varphi_{i,2} \beta_{i+1,t-1} + \varepsilon_{it} + m_i, \quad i=1, \dots, 12, \quad t=1, 2, \dots, N, \quad (3.6)$$

где параметры φ_{i2} определяются через компоненты матрицы внутригодовой изменчивости, а параметры φ_{i1} – по аналогии с первым случаем.

Таким образом, аппроксимация ежегодных подпоследовательностей $\{\beta_t^i\}$ модельным процессом AP (1) позволяет в качестве количественных оценок степени естественной зарегулированности стока использовать параметры модели (3.6). Согласно определению регулирующей роли водохранилища ее оценка проводится путем сопоставления характеристик рек, впадающих в водохранилище, с соответствующими характеристиками реки, вытекающей из него. Параметры модели (3.6) для анализируемых процессов приведены в таблице 3.1.

Обобщение результатов анализа межгодовых и внутригодовых колебаний речного стока в терминах модельных процессов авторегрессии AP пер-

вого порядка дает возможность использовать параметры этих моделей для количественной оценки регулирующей способности водохранилищ.

Разница параметров вероятностных моделей, описывающих временную изменчивость расходов воды в пункте до водохранилища и в пункте водохранилища, характеризует регулируемую способность техногенных сооружений.

Как видно из таблицы 3.1 параметры φ_{11} моделей стока рек меняются от 0.35 в период весеннего половодья (апрель) до 0.89 (октябрь) для поста Верхнеуральск, от 0.3 (март) до 0.94 (январь) для Верхнеуральского водохранилища, от 0.32 (апрель) до 0.94 (январь) для Магнитогорского водохранилища, от 0.41 (июнь) до 0.95 (январь) для Кизила. Необходимо обратить внимание на то, что параметр φ_1 для всех пунктов наблюдений превышает значение 0.6 для всех месяцев года, кроме периода весеннего половодья (март-май).

Параметры авторегрессии φ_1 , описывающие внутригодовые корреляционные зависимости, увеличиваются в январе 0,85 в г. Верхнеуральск до 0,94 в Верхнеуральском вдхр. в феврале аналогичные оценки составляют 0,75 и 0,93, соответственно. Таким образом, зарегулированность стока водохранилищем значительна в период зимней межени. В остальные месяцы существенных различий между параметрами φ_1 в этих пунктах не наблюдается.

Необходимо обратить внимание на увеличение параметров φ_2 , характеризующих межгодовую коррелированность речного стока, в селе Кизильское до 0,70 (январь, февраль) по сравнению с аналогичными значениями в Магнитогорском водохранилище (0,51). Такое увеличение параметров φ_2 возможно связано с наличием тренда на увеличение расхода воды в с. Кизильское.

Таким образом, разница между параметрами авторегрессии AP (1), рассчитанными для расходов воды по реке Урал – характеризует регулируемую способность Верхнеуральского и Магнитогорского водохранилищ.

Таблица 3.1 – Численные значения оценок математического ожидания расходов воды $m(t)$, дисперсии $D(t)$, параметров авторегрессии ϕ_1 внутригодового и ϕ_2 многолетнего хода стока.

Вероятностная характеристика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
р. Чумыш – с. Ельцовка.												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	8,94	8,10	10,1	193	1525	33,3	17,5	14,4	15,5	25,4	23,1	11,4
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	9,21	5,76	21,0	6827	12361	424	97,4	57,3	70,8	220	370	26,9
ϕ_1	0,87	0,58	0,33	-0,19	0,32	0,44	0,58	0,43	0,36	0,43	0,67	0,79
ϕ_2	0,21	0,22	0,15	0,00	-0,01	0,11	0,21	0,21	0,10	-0,02	-0,07	0,32
р. Чумыш – с. Кытманово												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	16,2	14,9	20,5	340	278	57,4	31,5	25,4	24,5	33,5	30,6	20,4
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	24,6	20,0	253	14439	37076	1002	260	186	139	213	225	71,2
ϕ_1	0,9	0,2	0,11	-0,20	0,40	0,45	0,61	0,42	0,53	0,65	0,81	0,72
ϕ_2	0,36	0,41	-0,02	-0,09	0,00	0,11	0,25	0,04	0,18	-0,10	0,03	0,23
Р. Чумыш – г. Заринск												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	24,8	22,3	27,9	454	379	82,8	47,2	39,3	27,4	53,2	50,7	31,9
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	78,7	56,3	291	30506	57944	1682	367	335	221	645	864	224
ϕ_1	0,86	0,40	0,12	-0,31	0,40	0,55	0,68	0,58	0,55	0,53	0,76	0,90
ϕ_2	0,53	0,56	0,13	-0,05	-0,05	0,15	0,28	0,18	0,23	0,18	0,03	0,36
Р. Чумыш – пгт Тальменка												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	33,5	31,7	36,1	497	478	119	67,7	55,9	50,4	63,5	62,8	42,0
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	125	96,4	305	36283	76197	3247	793	560	292	453	1628	397
ϕ_1	0,91	0,34	0,22	-0,33	0,57	0,74	0,68	0,71	0,65	0,55	0,86	0,86
ϕ_2	0,47	0,38	0,00	-0,11	0,05	0,08	0,25	0,18	0,33	0,19	0,10	0,31
р. Аламбай–с. Казанцево												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	2,49	2,24	2,43	47,7	45,0	8,27	5,03	3,96	3,82	5,31	4,86	3,03
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	0,76	0,60	0,75	522	1065	23,9	7,38	2,44	2,64	5,09	11,06	1,55
ϕ_1	0,95	0,61	0,33	-0,37	0,44	0,54	0,56	0,48	0,51	0,49	0,76	0,76
ϕ_2	0,41	0,47	0,09	-0,02	-0,03	0,07	0,15	0,18	0,21	-0,09	-0,14	0,22
р. Тогул – с. Тогул												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	2,42	2,09	2,46	50,7	48,1	8,67	4,71	4,10	3,83	6,1	5,78	3,20
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	1,09	0,72	1,36	471	1031	26,6	6,44	5,76	2,92	14,4	20,3	2,60
ϕ_1	0,86	0,55	0,21	-0,44	0,37	0,49	0,43	0,37	0,52	0,43	0,55	0,90
ϕ_2	0,35	0,33	0,14	-0,08	-0,04	0,12	0,21	0,15	0,15	-0,04	-0,12	0,33
Р. Тальменка – с. Новоперуново												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	2,34	2,12	2,46	19,1	8,03	3,98	3,11	2,69	2,90	3,53	3,12	2,56
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	0,23	0,35	0,65	40,3	7,07	1,26	0,79	0,20	0,29	0,40	0,52	0,21
ϕ_1	0,84	0,67	0,09	-0,17	0,24	0,53	0,46	0,54	0,64	0,55	0,70	0,72
ϕ_2	0,36	0,12	0,48	-0,19	0,08	0,01	0,02	-0,19	0,16	-0,09	0,46	0,41

Таблица 3.1 – Численные значения оценок математического ожидания уровней воды $m(t)$, дисперсии $D(t)$, параметров авторегрессии ϕ_1 внутригодового и ϕ_2 многолетнего хода стока.

Вероятностная характеристика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

р. Чумыш – с. Ельцовка.

m(t), см	51,6	54,7	64,1	178	124	46,5	34,3	30,9	28	38,2	53,8	49,6
D(t), см	166	173	144	1800	9471	391	198	171	177	362	815	331
φ1	0,87	0,69	0,49	-0,13	0,39	0,52	0,67	0,60	0,61	0,67	0,88	0,79
φ2	0,32	0,25	0,14	-0,11	-0,03	0,14	0,26	0,25	0,21	0,19	-0,02	0,05

р. Чумыш – с. Кытманово

m(t), м ³ /с	149	154	168	331	266	153	125	116	114	129	141	143
D(t), (м ³ /с) ²	2071	2273	2525	3903	8617	2408	1765	1716	1610	1824	2253	1808
φ1	0,99	0,94	0,55	0,30	0,79	0,89	0,94	0,92	0,93	0,92	0,94	0,93
φ2	0,88	0,91	0,83	0,07	0,31	0,71	0,84	0,82	0,86	0,78	0,71	0,82

Р. Чумыш – г. Заринск

m(t), м ³ /с	37,2	39,9	52,1	294	221	47,5	13,7	4,6	1,96	19,3	39,9	42,3
D(t), (м ³ /с) ²	585	564	838	6978	13239	1777	680	662	490	946	1753	967
φ1	0,96	0,76	0,31	-0,12	0,61	0,75	0,82	0,81	0,79	0,79	0,89	0,91
φ2	0,68	0,78	0,46	-0,11	0,01	0,41	0,60	0,58	0,66	0,49	0,33	0,46

Р. Чумыш – пгт Тальменка

m(t), м ³ /с	554	559	569	712	677	558	524	514	509	522	546	555
D(t), (м ³ /с) ²	629	620	720	3996	6980	1459	1009	879	772	781	1242	794
φ1	0,95	0,90	0,40	-0,09	0,73	0,83	0,89	0,88	0,88	0,84	0,85	0,87
φ2	0,72	0,85	0,71	-0,04	0,01	0,44	0,67	0,57	0,74	0,56	0,42	0,38

р. Аламбай – с. Казанцево

m(t), м ³ /с	146	146	147	312	283	161	145	139	138	147	146	143
D(t), (м ³ /с) ²	136	154	103	7056	7231	467	260	147	128	166	255	157
φ1	0,85	0,78	0,38	-0,33	0,42	0,65	0,66	0,70	0,71	0,69	0,81	0,86
φ2	0,49	0,15	0,44	0,02	-0,16	0,18	0,35	0,36	0,51	0,22	0,09	0,50

р. Тогул – с. Тогул

m(t), м ³ /с	265	271	283	416	371	249	229	224	223	239	259	258
D(t), (м ³ /с) ²	1090	1318	1447	4170	7646	1080	709	810	699	1222	1694	958
φ1	0,98	0,96	0,42	0,01	0,64	0,84	0,89	0,89	0,74	0,91	0,81	0,94
φ2	0,86	0,88	0,87	0,10	0,08	0,60	0,76	0,77	0,83	0,64	0,61	0,73

Р. Тальменка – с. Новоперуново

m(t), м ³ /с	177	178	179	217	172	151	144	141	143	149	161	171
D(t), (м ³ /с) ²	706	771	720	813	705	477	443	453	428	492	576	804
φ1	0,99	0,99	0,79	0,62	0,91	0,96	0,97	0,98	0,98	0,87	0,95	0,99
φ2	0,68	0,71	0,74	0,61	0,74	0,81	0,84	0,86	0,85	0,82	0,73	0,56

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы сделали следующие выводы:

– на рассмотренных постах, многоводные периоды пришлись на 1960-1961, 1964, 1966, 1969, 1984, 1985, 2013, 2015 гг.; маловодные – на 1967-1968, 1974, 1976, 1980-1982, 1998, 2000, 2005, 2008 гг. В верховьях Чумыша был экстремально многоводный год 1971. Экстремально маловодных лет не выявлено.

– на реке Чумыш имеется тренд на понижение водности. Несмотря на то, что с 2010 года водность начала увеличиваться, уровень воды продолжил снижаться. Это связано с изменением формы русла реки под действием природных и антропогенных факторов (добыча песка из русла реки). Увеличение расходов воды в конце рассматриваемого периода происходит в основном с увеличением стока в осеннюю межень, что связано с увеличением осадков в это же время.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мякишева Н. В., Трапезников Ю. А. Авторегрессионная модель межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Вероятностный анализ и моделирование океанологических процессов. Л., 1984.
2. Давыдов Л. К., Дмитриева А. А., Конкина И. Г. Общая гидрология. Л., 1973.
3. Драган Я. П., Рожков В. А., Яворский И. Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов, Л., 1987.
4. Алексеева Т. Ю., Мякишева Н. В., Трапезников Ю. А. Специфика вероятностного моделирования межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов. М., 1985. Ч. 2.
5. Косолапов А.Е., Шефер Е. А., Дандара Н. Т., Лагута М. И., Калиманов Т. А., Коржов И. В. Проект правил использования водных ресурсов Верхне-Уральского, Магнитогорского и Ириклинского водохранилищ, Екатеринбург, 2013.
6. Сикан, А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология» [Текст] / А. В. Сикан – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 279 с.
7. Дружинин, В. С., Сикан, А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебное пособие. Направление «Гидрометеорология». Специальность «Гидрология» [Текст] / В. С. Дружинин, А. В. Сикан – СПб.: изд. РГГМУ, 2001.
8. Чеботарев, А. И. Гидрологический словарь [Текст] / А. И. Чеботарев – Л: Гидрометеиздат, 1978. – 308 с.
9. Бурыгин С. М. Алтай жемчужина и сердце Евразии 2000. – 140 с.