



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)

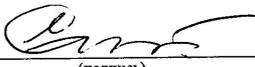
На тему **Режим реки Ертис в естественных
и техногенно-нарушенных условиях**

Исполнитель Ахметов А.С.
(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 Сикан А.В.
(фамилия, имя, отчество)

«20» 06 2017г.

Санкт-Петербург
2017

Содержание

	Стр.
Введение	3
1 Физико-географическое описание	6
1.1 Климатическая характеристика	8
1.1.1 Радиационный баланс	9
1.2 Гидрография	9
2 Многолетние колебания водности рек	14
2.1 Квантильный анализ	14
2.2 Выделение трендов фильтром Баттерворта	29
3. Внутригодовые колебания речного стока	38
3.1 Методы теории периодически коррелированных случайных процессов.	
3.2 Особенности внутригодового хода речного стока	47
3.3 Обобщение результатов анализа временной изменчивости речного стока в терминах вероятностной модели.	50
Заключение	56
Список использованной литературы	58

Введение

Водные ресурсы бассейна Верхнего Ертиса широко используются для различных нужд промышленности, жилищно-коммунального и сельского хозяйства – для регулярного орошения, залива лиманов и сенокосов, сельхоз водоснабжения, обводнения пастбищ, а также рыбного хозяйства, энергетики и водного транспорта.

Рациональное использование водных ресурсов бассейна Верхнего Ертиса имеет особое значение и актуальность в связи с тем, что река Ертис относится к трансграничным рекам и его водные ресурсы используются тремя соседними государствами КНР, РК и РФ.

Основными водопотребителями р. Ертис являются населенные пункты, коммунально-бытовые потребители, промышленность, сельское и рыбное хозяйство и государственный природный заказник «Пойма р. Ертис».

Основные водопользователи – гидроэнергетика и водный транспорт.

Судоходные уровни воды в реке поддерживаются в навигационный период – с 20 апреля по 5 ноября. В это время производятся попуски в нижний бьеф Усть-Каменогорской и Шульбинской ГЭС. В период навигации поддерживаются расчетные уровни в верхних бьефах гидроузлов.

Для обеспечения потребностей в воде, в условиях растущих городов и интенсивно развивающейся промышленности, необходимо иметь сведения о состоянии водных ресурсов данного района. Поэтому целью настоящей работы является изучение водного режима реки Ертис 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 воды, температуры воздуха и атмосферных осадков;

б) выполнить анализ многолетних колебаний водности реки Ертис и его притоков, метеорологических факторов;

в) провести анализ внутригодовых колебаний стока рек и метеорологических факторов;

г) обобщить результаты анализа в терминах вероятностной модели.

д) оценить влияние водохранилищ на естественный режим речного стока;

Для решения поставленных задач в работе использовались данные наблюдений за расходами воды реки Кара Ертис в створе гидропоста р. Кара Ертис – с. Боран за период с 1938 по 2015 г., реки Ертис по 2 гидрологическим постам: г. Усть-Каменогорск с 1903 по 1952 г., с. Семиярка с 1957 по 2015 г., а также данные по сбросам Бухтарминской с 1961 по 2015 г. и Усть-Каменогорской ГЭС с 1953 по 2015 г. Также в работе использовались данные по основным притокам р. Ертис за разные периоды наблюдений: р. Куршим, р. Буктырма по 3 постам, р. Нарын, р. Улкен Бокен, р. Оба, р. Ульби.

Речной сток рассматривается, как вероятностный полициклический процесс с основными энергонесущими зонами в диапазонах частот, соответствующих многолетними ($T > 1$ года) и внутригодовыми ($T < 1$ года) колебаниями. Для анализа многолетней изменчивости привлекались ряды среднегодовых расходов, которые рассматривались как стационарные случайные процессы. Также для анализа многолетней изменчивости 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 вероятностные модели в терминах, которых оценивалась влияние техногенных сооружений на водный режим реки.

1 Физико-географическое описание



Рисунок 1 – Карта бассейна реки Ертис

Ертисский бассейн с населением 2.16 млн человек охватывает территорию площадью 354.2 тыс. км². Согласно административному делению бассейн располагается на территории Восточно-Казахстанской и Павлодарской областей Республики Казахстан, захватывая частично Акмолинскую и Карагандинскую области.

В орографическом отношении рассматриваемая территория представляет складчато-глыбовую горную область с абсолютными высотами от 200 до 4500 м. для территории правобережья р. Ертис характерно общее повышение хребтов и дна долин от Западно-Сибирской низменности, на восток-юго-восток – к главным горным узлам Алтая, а для западной, левобережной части р. Ертис

– постепенное увеличение высоты местности от холмисто-грядового мелкосопочника и низкогорий Казахской складчатой страны на севере и западе до среднегорного и высокогорного рельефа на юге.

В западной части левобережья р. Ертыс принято выделять 5 геоморфологических районов: мелкосопочный район Казахской складчатой страны, хребет Шынгызтау, Сауыр-Тарбагатай, Жайсанская котловина, равнинное Приертысье, Калбинский хребет.

Мелкосопочный район находится в северо-западной части. На северо-востоке мелкосопочник переходит в Приертысскую равнину, а на юго-западе окаймляется низкогорным хребтом Шынгызтау.

Хребет Шынгызтау представляет собой складчато-горстовое поднятие Казахской складчатой страны. Простирается с северо-запада на юго-восток. Строение хребта ассиметричное – северо-восточные склоны сильно расчленены и круты, а юго-западные склоны состоят из трех полого падающих ступеней. К северу от Шынгызтау отходит параллельный ему хребет Каншынгыз, а к югу – Акшатау.

На юго-востоке Шынгызтау полосой мелкосопочника соединяется с хребтом Тарбагатай.

Хребет Сауыр-Тарбагатай простирается почти в широтном направлении на крайнем юге рассматриваемой территории и входит в нее только северными склонами. Этот среднегорный массив обширной долиной Шиликты разделяется на хребты Тарбагатай и Сауыр.

Жайсанская котловина представляет собой обширную депрессию, ограниченную горами Южного Алтая, Сауыр-Тарбагатай и Калбатау. На юге и севере ее границы выражены весьма отчетливо, на востоке продолжением котловины служит широкая долина р. Кара Ертыс, а на западе постепенно переходит мелкосопочник Центрального Казахстана.

Характерным является развитие аккумулятивных форм рельефа. Котловина имеет характер плоской равнины, слабо пересеченной сухими

руслами и оврагами; к периферии она принимает волнистый характер и пересеченность ее увеличивается. Поверхность слабо наклонена к центру котловины, где расположено озеро Жайсан; встречаются отдельные, сравнительно бессточные впадины, занятые пересыхающими к осени солеными озерами или заболоченные. На востоке, на правом берегу р. Кара Ерчис имеются бугристые и барханные пески Айгыркумдала, а на севере, вдоль р. Ерчис – пески Кызылкум.

Равнинным рельефом, наряду с Жайсанской котловиной, характеризуется также крайняя северная часть правого берега Приерчисья.

Равнинное Приерчисье занимает незначительную часть рассматриваемой территории.

Для этого района характерен слабоволнистый или увалистый рельеф, незначительная высота местности, большое количество закнутых блюдцеобразных бессточных впадин, часто занятых мелкими озерами. Отдельные возвышенности имеют пологие склоны, в отдельных местах, пересеченных неглубокими лощинами. Характерны также песчаные гряды, разделенные широкими ложбинами. На севере равнинное Приерчисье сливается со степью Кулунды, а на юго-востоке переходит в предгорье Алтая.

Калбинский хребет является левобережным продолжением горных массивов Алтая. На востоке кулисообразно заходит за Нарынский хребет, обуславливая этим глубокий изгиб Долины р. Ерчис. Далее хребет простирается в широтном направлении до долины р. Шар, где отклоняется к северо-западу и заканчивается серией гряд в 40-60 км от р. Ерчис.

Восточная часть хребта наиболее высока и имеет горный рельеф с сильно расчлененными, часто скалистыми склонами, круто спускающимися к Ерчису. Характерным элементом рельефа являются отдельные, резко выпадающие скалистые массивы, сложенные гранитами. К западу хребет понижается, постепенно приобретая характер мелкосопочника. Южный склон хребта короче

и круче северного и имеет более резкие очертания; многочисленные реки образуют глубокие ущелья со скалистыми бортами.

Горы Алтая образовались в результате свободного поднятия, разломов и неравномерного вертикального перемещения отдельных блоков древнего пенеplена складчатого палеозойского основания. Поднятие происходило в различные геологические периоды, но создание современного рельефа связано в основном с проявлением альпийского орогенического цикла, начавшегося в конце третичного периода и особенно энергично протекавшего в средне- и верхнечетвертичное время. Поднятые участки пенеplена образуют горные системы, а опускание обусловило образование межгорных котловин. Поэтому для современного рельефа Алтая характерно сочетание горных хребтов с обширными, со всех сторон окруженными горами, слабо всхолмленными пространствами, представляющими собой межгорные котловины. В процессе поднятия и в последующий период Алтай подвергался воздействию древнего оледенения и эрозионному расчленению, степень которого обусловила основные различия характерных типов современного рельефа.

1.1 Климатическая характеристика

Территория Ертисского бассейна характеризуется резкоконтинентальным климатом. Из-за большой удаленности и отгороженности горными системами теплые и влажные воздушные массы, проникающие с Северо-Ледовитого океана – холодными и сухими. Особенно большой сухостью отличаются холмисто-мелкосопочные и равнинные районы левобережья р. Ертис. Наибольшая увлажненность характерна для западных и северных периферийных, а также центральных высокогорных районов Алтая. Сложная орография, наличие замкнутых котловин и плоскогорий обуславливают большие различия климатических особенностей отдельных районов Алтая.

1.1.1 Радиационный баланс

В теплое время года радиационный баланс всюду, за исключением высокогорного альпийского пояса, положителен с наибольшими величинами в июне-июле. Отрицательный радиационный баланс наблюдается повсеместно в период с ноября по февраль, достигая наименьших величин в декабре и январе. Максимальные средние месячные суммы радиационного баланса могут достигать 9.8-10 ккал/см², а минимальные – 1.7-1.9 ккал/см².

1.2 Гидрография

Строение гидрографической сети бассейна Верхнего Ертиса обусловлено сложным рельефом, широтной и вертикальной зональностью, разнообразными климатическими условиями. По своим физико-географическим особенностям, предопределяющим гидрографию и режим рек, бассейн реки Ертис делится на горную и равнинную части.

По данным «Ресурсы поверхностных вод СССР. Алтай и Западная Сибирь. Горный Алтай и Верхний Иртыш» в горной части бассейна реки Ертис (до г. Семей) насчитывается 13 201 рек. Из этого количества к большим и средним рекам протяженностью более 200 км относится 6 рек. Остальные 13 195 относятся к категории малых. При этом 13 016 – составляют водотоки длиной менее 25 км.

В равнинной части бассейна р. Ертис в пределах Павлодарской области общее количество рек и временных водотоков протяженностью свыше 10 км составляет около 130.

В среднем по бассейну р. Ертис густота речной сети составляет 0.27 км/км². наибольшими значениями характеризуются правобережные хорошо увлажненные районы бассейна реки Ертис. Равнинные и холмисто-мескосопочные засушливые районы левобережья характеризуются редкой

гидрографической сетью – 0.10-0.15 0.27 км/км², уменьшаясь в отдельных районах до 0.04-0.02 0.27 км/км². Гидрография Казахского мелкосопочника представлена транзитными участками рек и руслами эпизодически действующих водотоков, а в Жайсанской котловине и ранинном Приертирье – многочисленными сухими руслами, оврагами, бесточными впадинами, заполненными пересыхающими озерами.

Река Ертыс – крупнейшая река Казахстана, левый приток р. Обь и главная артерия Ертысского водохозяйственного бассейна. Свое начало берет в гляциальной зоне на юго-западных склонах Монгольского Алтая в Китае, пересекает территорию Казахстана и на территории России впадает в р. Обь. Относится к бассейну Карского моря. Общая протяженность р. Ертыс составляет 4 280 км, из которых 618 км приходится на Китай, 1698 км – Казахстан и 1964 км – Россию. Площадь водосбора р. Ертыс составляет 1.65 млн км². До впадения в озеро Жайсан река носит название Кара Ертыс. Длина р. Кара Ертыс – 672 км, длина р. Ертыс от озера Жайсан до впадения в реку Обь – 3501 км. на территорию Казахстана река Кара Ертыс втекает сравнительно многоводной рекой со среднегодовым расходом воды около 300 м³/с, в створе г. Семей этот расход возрастает почти втрое и составляет около 880 м³/с, причем, примерно 90% увеличения своей водности р. Ертыс получает со стороны правобережных притоков, стекающих с хребтов Казахстанского Алтая. На границе с Россией естественный сток составляет 830 м³/с.

На верхнем участке, до впадения в оз. Жайсан, р. Ертыс принимает правобережные притоки Алкабек и Калжыр, вытекающий из оз. Маркакол. Ниже устья р. Буктырма в 1960 г. была построена плотина Бухтарминской ГЭС. В результате образовавшегося подпора крупнейшее в стране водохранилище поглотило оз. Жайсан. В вдхр. Буктырма впадает ряд притоков – Куршим, Нарын, Буктырма, Улкен Бокен, Таинты и др. В районе г. Усть-Каменогорск на р. Ертыс в 1953 г. построена плотина Усть-каменогорской ГЭС. Нажи данной плотины в р. Ертыс впадает правобережный приток р. Ульби. Далее вниз по

течению, у п. Шульбинск, в 1988 г. создано третье водохранилище – Шульбинское, в которое впадает еще один правобережный приток – р. Оба.

Наиболее крупными и многоводными притоками р. Ертис являются реки Буктырма, Оба и Ульби. Свой сток они формируют на территории Казахстанского Алтая, имеющего высокую увлажненность и горный сильно пересеченный рельеф, обуславливающие, в свою очередь, наибольшие в Восточном Казахстане густоту речной сети и слой стока. Из правобережных притоков реки Южного Алтая – р. Каркаба, Аккаба, Алкабек, Калжыр, куршим, Нарын – имеют меньшую водность.

Реки левобережья – Кендирлик, Уйдене, Кандысу, Тебиске, Карбога, Базар, Бугаз, Улкен Бокен, Шар и Шаган – отличаются значительно меньшей водностью, чем правобережные притоки. Часть из этих рек в межень теряется в нижнем течении в рыхлых русловых отложениях и не доходят до р. Ертис.

Следует отметить, что 28 водотоков бассейна, в том числе и р. Ертис, являются транграничными реками. Часть из них обозначают границу, а 22 реки пересекают её. Самой крупной рекой, пересекающей государственную границу в бассейне р. Ертис (после р. Ертис) является р. Каракаба.

Питание р. Ертис смешанное: в верхнем течении преимущественно горно-снеговое и ледниковое, в нижнем – снеговое и нрунтовое.

Река Буктырма берет начало из небольшого озера на склонах Южного Алтая и до впадения в вдхр. Буктырма принимает ряд притоков – р. Ак Берел, Черновая, Сарымсакты, Аксу, Черемушка, Хамир, Березовка. Длина реки – 336 км, площадь водосбора составляет 12660 км². В пределах водосбора имеется 295 озер общей площадью 34.8 км². Средний многолетний расход составляет 215 м³/с. река наиболее многоводна в весенне-летний период – с апреля по июль. В это время расходы воды увеличиваются примерно в 3 раза.

Река Ульби образуется слиянием рек Тихая и Громотуха, которые берут начало в Ивановском и Убинском хребтах Рудного Алтая. Река Тихая берет начало юго-восточнее горы Теснинский Белок и образуется слиянием рек

Журавлиха и Филлиповка. Протекает по северной окраине г. Риддер. Воды реки использовались на ныне недействующей Ульбинской ГЭС Лениногорского каскада. Река Громотуха берет свое начало с южного склона Ивановского хребта и северо-западного склона Ульбинского хребта от многочисленных рек и ручьев, основные из которых – Правая и Левая Громотуха. В верхнее течение реки Левая Громотуха перебрасывается часть стока реки Киши Ульби, в верховьях которого создано Малоульбинское водохранилище. В нижнем течении на реки размещены Хайрузовская и Тишинская ГЭС Лениногорского каскада.

В районе г. Усть-Каменогорск р. Ульби впадает в р. Ертис, являясь её правым притоком. Длина реки 100 км, площадь водосбора 4990 км². В пределах водосбора имеется 40 озер, общей площадью 14.9 км². Средний многолетний расход составляет 96.2 м³/с.

Река Оба образуется от слияния рек Белая Оба (L = 58 км, F = 806 км²) и Черная Оба (L = 70 км, F = 691 км²), берущих начало с Коргонских Белков в зоне вечных снегов. Наиболее крупные притоки – р. Большая Чесноковка, Становая Оба, Белопорожная Оба, Малая Обинка. Длина реки 278 км, площадь водосбора 9850 км². В пределах водосбора имеется 295 озер общей площадью 34.8 км². Средний многолетний расход воды составляет 171 м³/с.

Озера в бассейне р. Ертис распределены неравномерно. Всего на территории Ертисского бассейна насчитывается 2365 озер общей площадью 907 км² (без затопленного оз. Жайсан).

Озеро Маркаколь

Крупное альпийское озеро располагается на Южном Алтае на высоте 1449 м. Наибольшая его длина составляет 38 км, ширина – 19 км, площадь зеркала 455 км², средняя глубина 14 м, наибольшая – 24 м. Озеро оказывает существенное регулирующее влияние на режим реки Калжыр, вытекающей из него и являющийся правым притоком р. Кара Ертис.

Озеро Жайсан являлось самым крупным проточным озером Казахстана до заполнения водохранилища Буктырма. Площадь зеркала озера Жайсан составляет 1800 км^2 , наибольшая длина 111 км, ширина 30 км, преобладающие глубины от 3 до 4 м.

Водоохранилища

На территории водохозяйственного бассейна реки Ертис расположено свыше 82 водохранилищ и прудов, из которых основная часть – 75 водохранилищ суммарной проектной емкостью 53 км^3 и площадью 5.8 тыс км^2 на ходятся на территории Восточно-Казахстанской области.

На реке Ертис имеется 3 крупных искусственных водоема, образованных плотинами Бухтарминской ГЭС, Усть-Каменогорской ГЭС, Шульбинской ГЭС.

В ущелье ниже устья р. Буктырма сооружена плотина Бухтарминской ГЭС. Данное водохранилище одно из больших в СНГ, осуществляет многолетнее регулирование стока. Площадь зеркала ок. 5500 км^2 , объем ок. 50 км^3 . основной приток, помимо р. Кара Ертис, дают реки Буктырма, куршим, Нарын, Калжыр.

Ниже ущелья в 1953 г. построена Усть-Каменогорская ГЭС. Емкость вдхр. При НПГ 0.655 км^3 .

Выше г. Семей в 4 км ниже села Старая Шульба создана плотина Шульбинской ГЭС. Площадь зеркала руслового водохранилища 255 км^2 , объем при НПУ составляет 2.390 км^3 , при ФПУ – 3.250 км^3 .

Водоохранилище Буктырма осуществляет многолетнее регулирование стока реки Ертис. Усть-Каменогорское водохранилище выполняет роль контррегулятора.

Шульбинское водохранилище осуществляет неполное сезонное регулирование водных ресурсов боковой приточности ниже Бухтарминской ГЭС в периоды весенних природоохранных попусков и летне-осенних паводков.

2 Многолетние колебания водности рек

2.1 Квантильный анализ

Как правило, при изучении климатической системы 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} - минимальное и максимальное 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 первой и второй половины выборки соответственно.

Анализ крайних членов χ_{\min} и χ_{\max} требуют чрезвычайной осторожности, поскольку они подвержены сильному влиянию выборочной изменчивости, обусловленной ошибками измерений исходных величин. Значительной большей устойчивостью обладает размах, характеризующий ширину выборочного распределения данных:

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

где χ_{\min} , χ_{\max} – крайние члены ранжированного (выстроенного в порядке возрастания) ряда.

Медиана $\chi_{0.5}$ являясь средним значением ранжированного ряда, характеризует центр распределения данных в выборке. Набор квантилей, $\chi_{0.25}$, $\chi_{0.5}$, $\chi_{0.75}$ фиксирует «норму» изменчивости анализируемого параметра, $\chi_{0.25}$ – нижний, а $\chi_{0.75}$ – верхний ее пределы. Величина Q называемая интерквантильным расстоянием, служит мерой разброса в пределах «нормы».

Интерквантильное расстояние:

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

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

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

где $\chi_{\text{в}}$ – расход верхнего барьера, м³/с;
 $\chi_{0.75}$ – медиана половины ранжированного ряда;
 Q – интерквантильное расстояние.

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

где $\chi_{\text{н}}$ – расход нижнего барьера, м³/с;
 $\chi_{0.25}$ – медиана половины ранжированного ряда;
 Q – интерквантильное расстояние.

В качестве оценки центра распределения данных в выборке можно рассматривать математическое ожидание m и трехсреднее значение T^* , а в качестве оценок масштаба распределения – дисперсию D или 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:

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

где $\chi_{0.25}$, $\chi_{0.5}$, $\chi_{0.75}$ – квантили.

Сопоставление среднего m с медианой $\chi_{0.5}$ и σ с $0.74Q$ 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:

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

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

Межгодовая (многолетняя) изменчивость стока рек традиционно анализируется по рядам среднегодовых и экстремальных расходов и характеризуется наличием многоводных и маловодных лет. Среднегодовые расходы используются для характеристики «нормы» и изменчивости годового стока. Принято считать, что для получения достаточно надежной нормы стока необходимо выбирать такой период наблюдений, в который входило бы одинаковое количество маловодных и многоводных лет. Экстремальные расходы используются для характеристики максимального стока весеннего половодья, дождевых паводков и минимального стока. В данной работе для анализа многолетней изменчивости 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. Оба этих критерия относятся к категории стандартных критериев, и рекомендуются в большинстве нормативных документов в качестве официального теста на однородность. Критерий Фишера используется для проверки на однородность гидрологического ряда по дисперсии. Критерий Стьюдента используется для проверки на однородность гидрологического ряда по среднему значению. Проверка рядов исходных данных анализируемой реки на однородность показала, что ряды по критерию Фишера и Стьюдента по всем постам однородны,

Результаты квантильного анализа многолетней изменчивости приведены в таблице 2.1 и на рисунках 2.1 – 2.9

Таблица 2.1 – Статистические характеристики межгодовой изменчивости

	χ_{\min}	$\chi_{0.25}$	$\chi_{0.5}$	$\chi_{0.75}$	χ_{\max}	R	Q	T*	$\chi_{\text{В}}$	$\chi_{\text{Н}}$	m	СКО	$0.74 Q$
р. Кара Ертис – с.Боран													
Ср. год	133	223	276	356	478	345	133	283	556	23.5	289	82.3	98.4
I	39.8	52.3	60.9	70.4	100	60.2	18.1	61	98	25.2	62.4	12.5	13.4

V	163	458	634	745	1220	1057	287	618	1176	27.5	640	230	212
---	-----	-----	-----	-----	------	------	-----	-----	------	------	-----	-----	-----

Продолжение таблицы 2.1

	χ_{\min}	$\chi_{0.25}$	$\chi_{0.5}$	$\chi_{0.75}$	χ_{\max}	R	Q	T*	$\chi_{\text{в}}$	$\chi_{\text{н}}$	m	СКО	$0.74 Q$
р. Ертис – в створе г. Усть-Каменогорск													
Ср. год	340	494	585	677	931	591	183	585	952	220	585	120	135
I	158	247	369	493	732	574	246	370	862	-122	369	148	182
V	239	625	1016	1414	2220	1981	789	1018	2598	-559	1016	478	584
р. Ертис – с. Семиярка за период 1957-1997 г.													
Ср. год	656	782	886	990	1513	857	208	886	1302	470	886	149	154
I	304	418	504	590	733	429	172	504	848	160	504	108	127
V	700	1414	1911	2407	3970	3270	993	1911	3897	-75.5	1911	645	735
р. Ертис – с. Семиярка за период 1957-1997 г.													
Ср. год	656	782	886	990	1513	857	208	886	1302	470	886	149	154
I	304	418	504	590	733	429	172	504	848	160	504	108	127
V	700	1414	1911	2407	3970	3270	993	1911	3897	-75.5	1911	645	735

Средние годовые расходы воды р. Кара Ерчис - с. Боран за 1938-2015 гг.

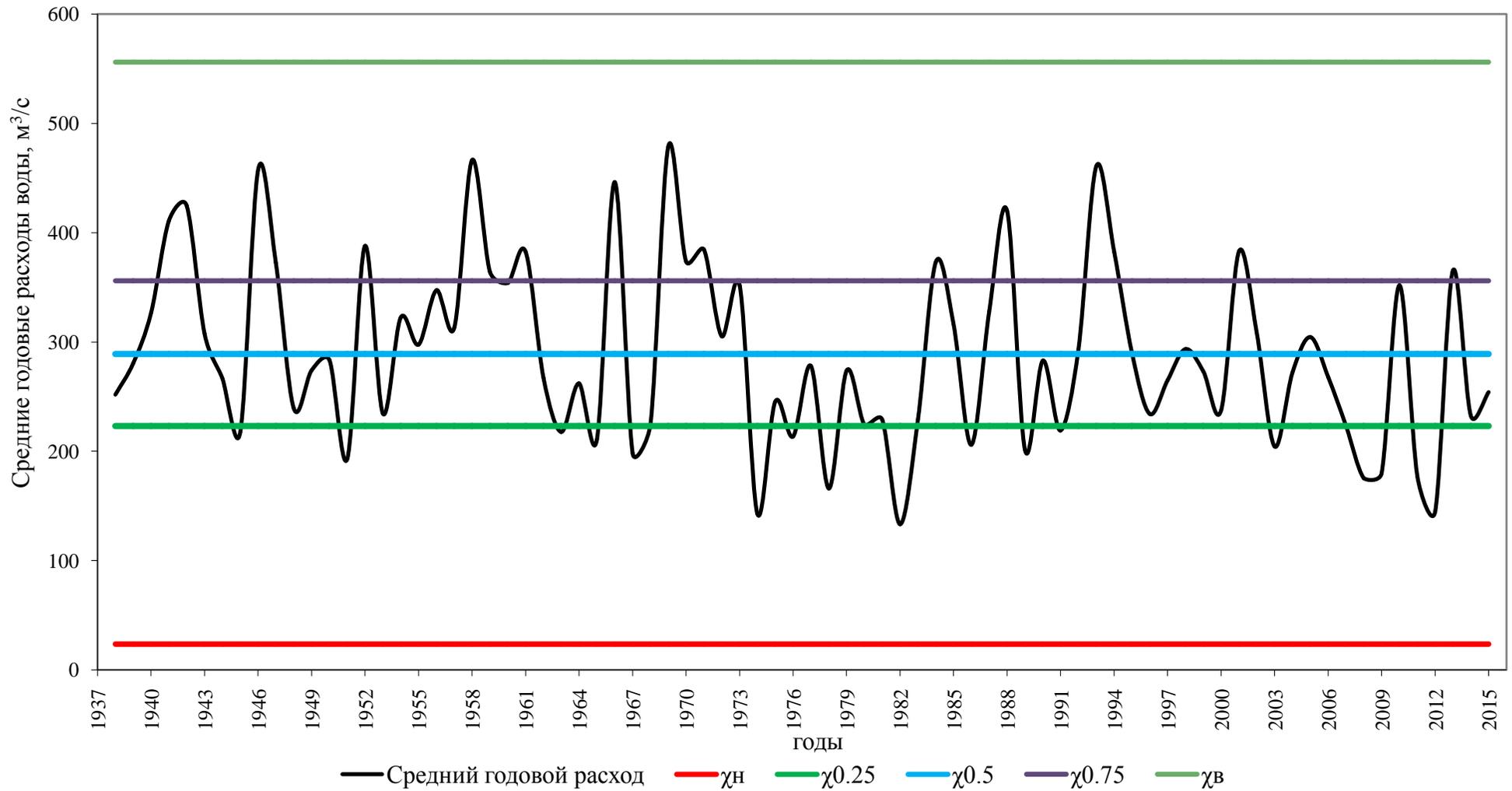


Рисунок 2.1 – График средних годовых расходов воды на реке Кара Ерчис – с. Боран

Средние расходы воды р. Кара Ертис - с. Боран за январь 1938-2015 гг.

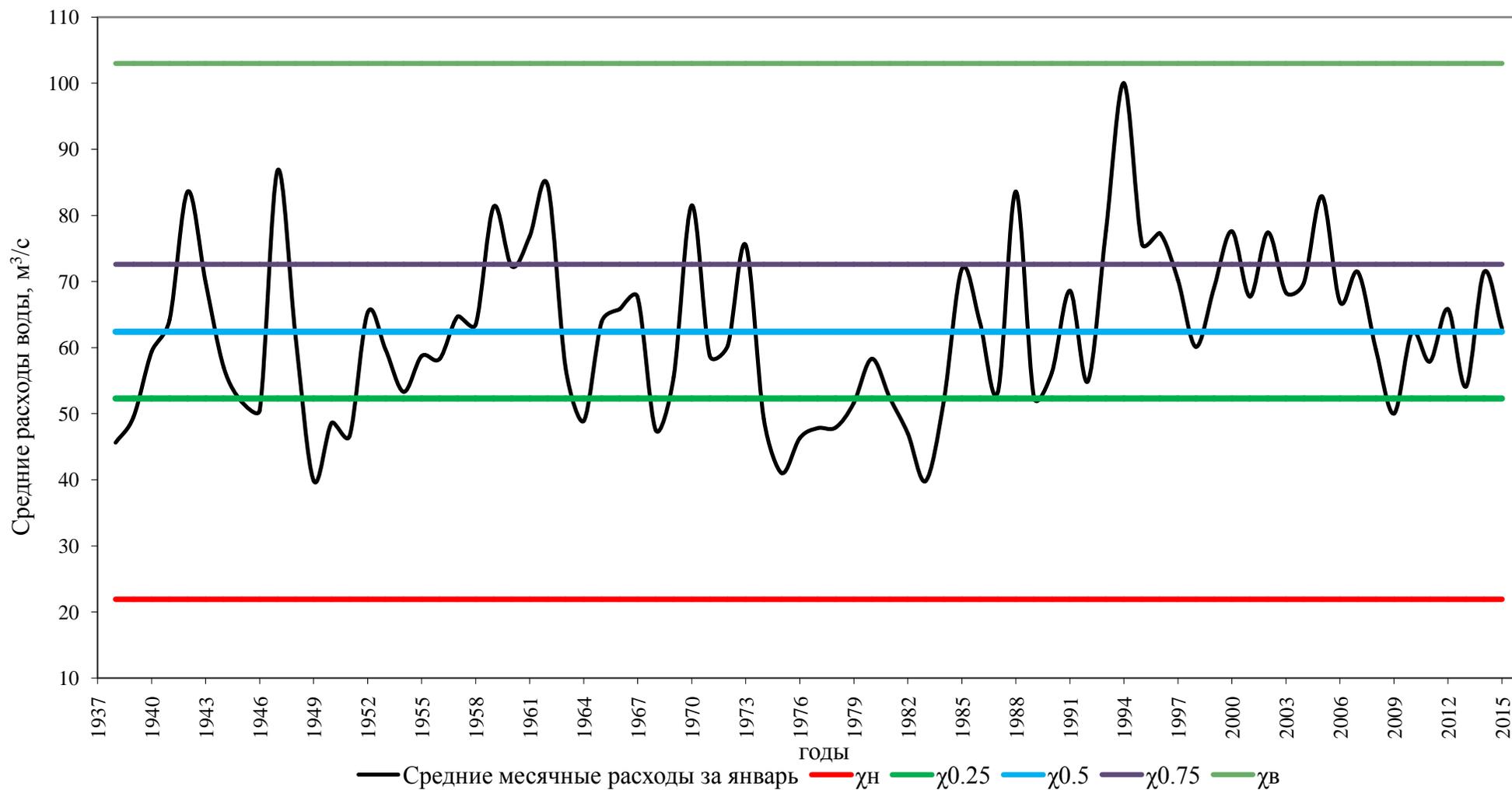


Рисунок 2.2 – График средних расходов воды за январь на реке Кара Ертис – с. Боран

Средние месячные расходы воды р. Кара Ерчис - с. Боран за май 1938-2015 гг.

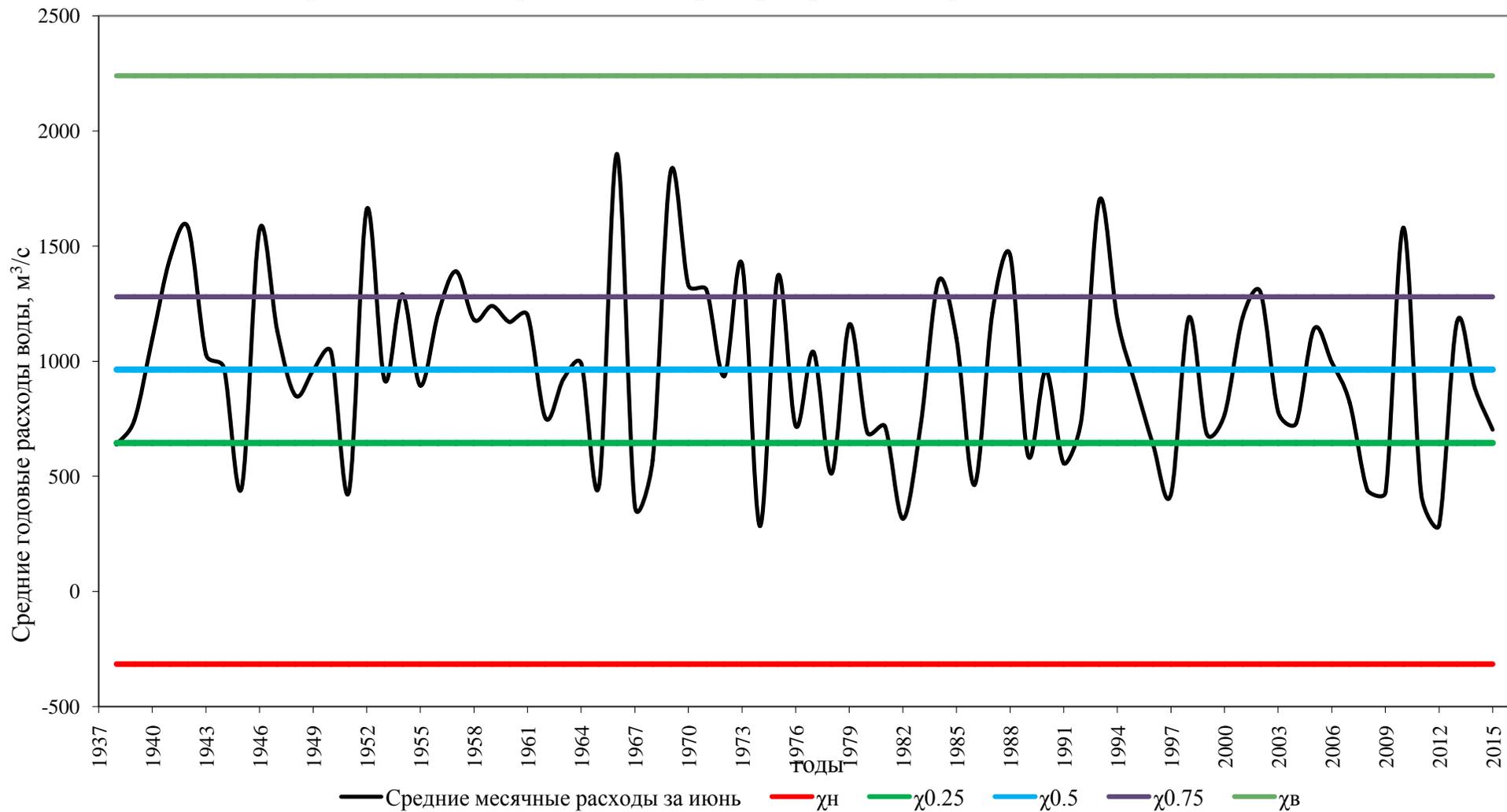


Рисунок 2.3 – График средних расходов воды за май 1938-2015 г. на реке Кара Ерчис – с. Боран

Средние расходы воды р. Ертис - в районе г. Усть-каменогорск

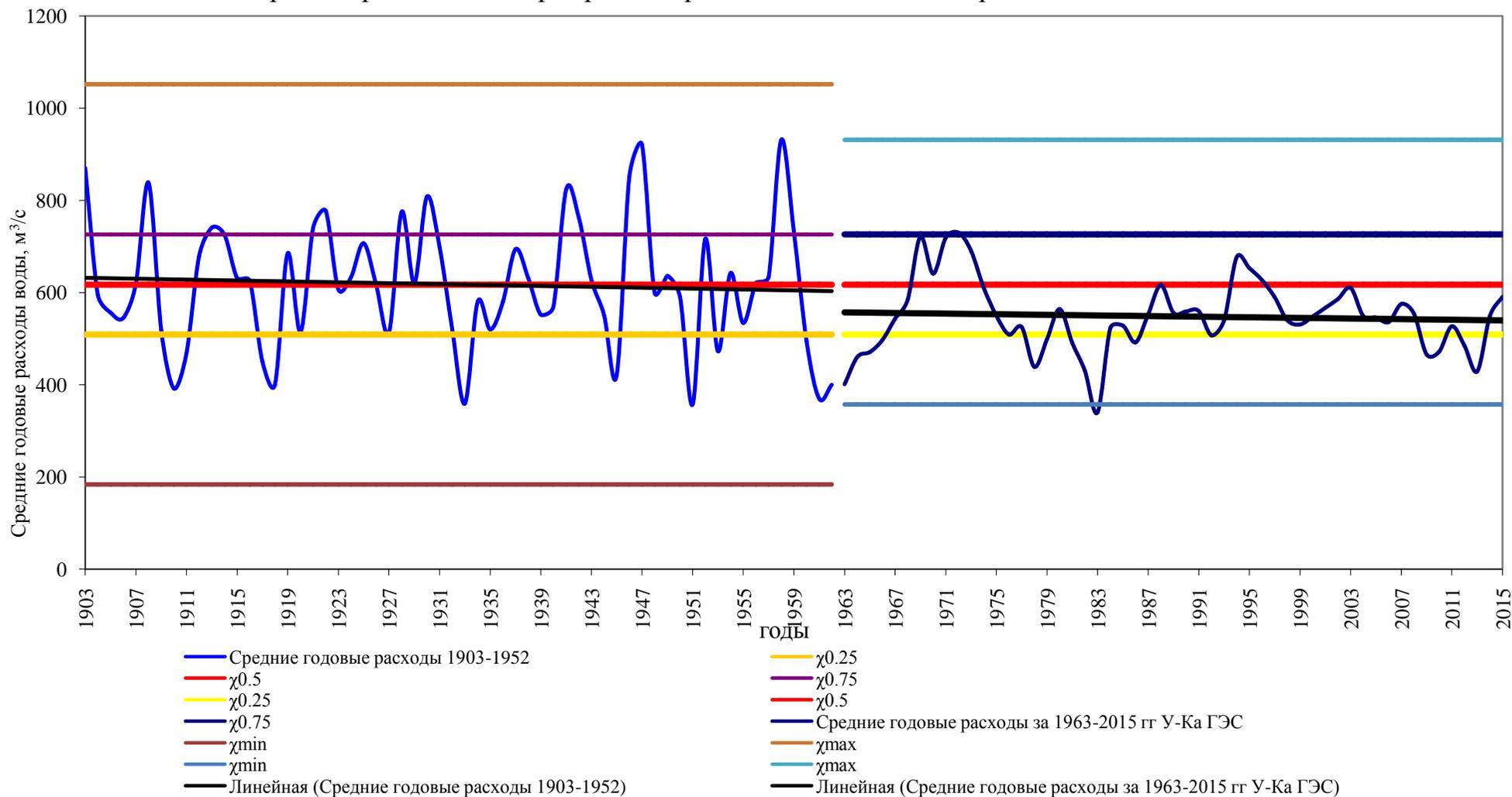


Рисунок 2.4 – График средних годовых расходов воды за 1903-2015 г. на реке Ертис – в створе г. Усть-Каменогорск

Средние расходы воды р. Ертис - г. Усть-каменогорск за январь 1903-2015 гг.

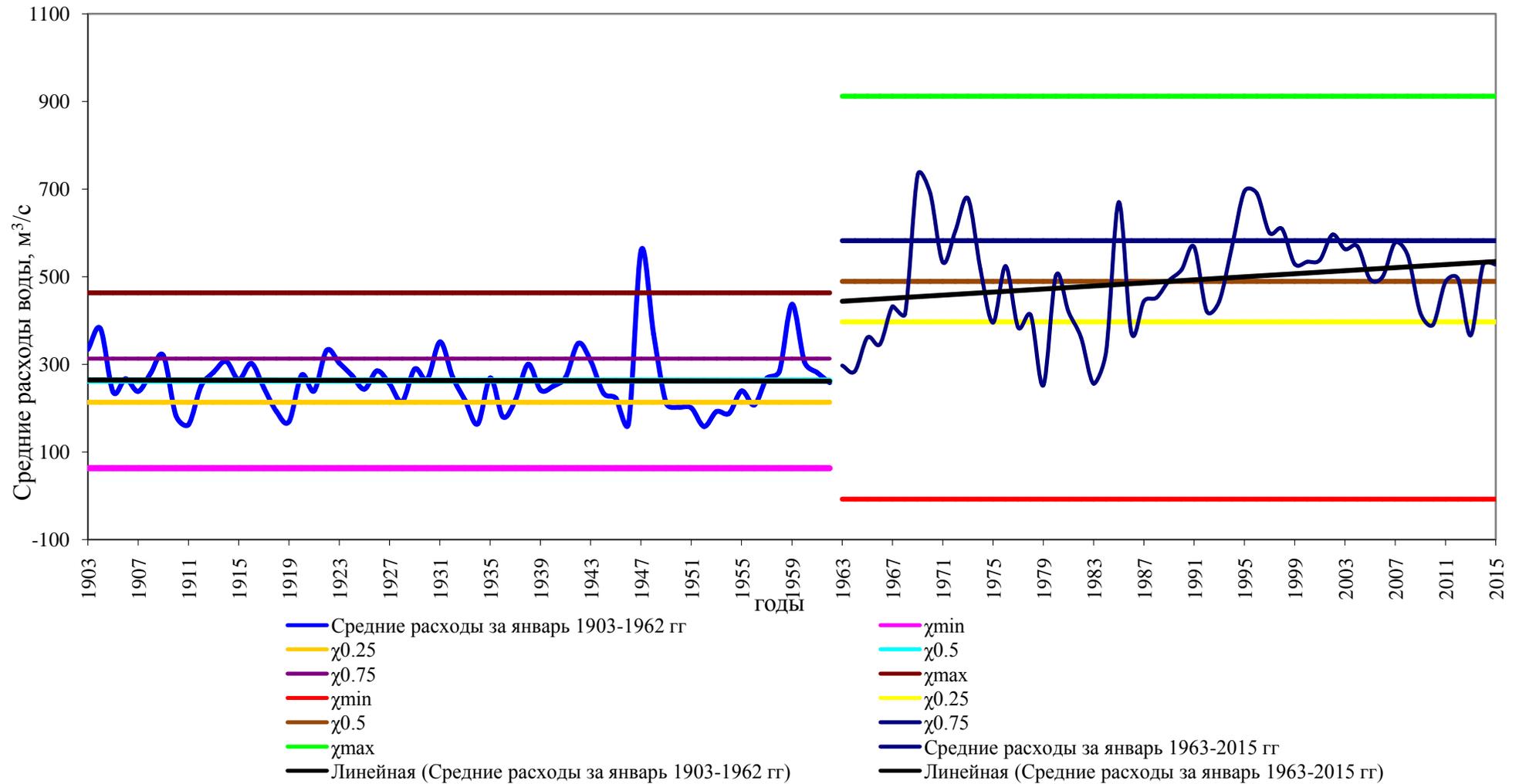


Рисунок 2.5 – График средних расходов воды за январь 1903-2015 г. на реке Ертис – в створе г. Усть-Каменогорск

Средние расходы воды р. Ертис в районе г. Усть-каменогорск за май 1903-2015 гг.

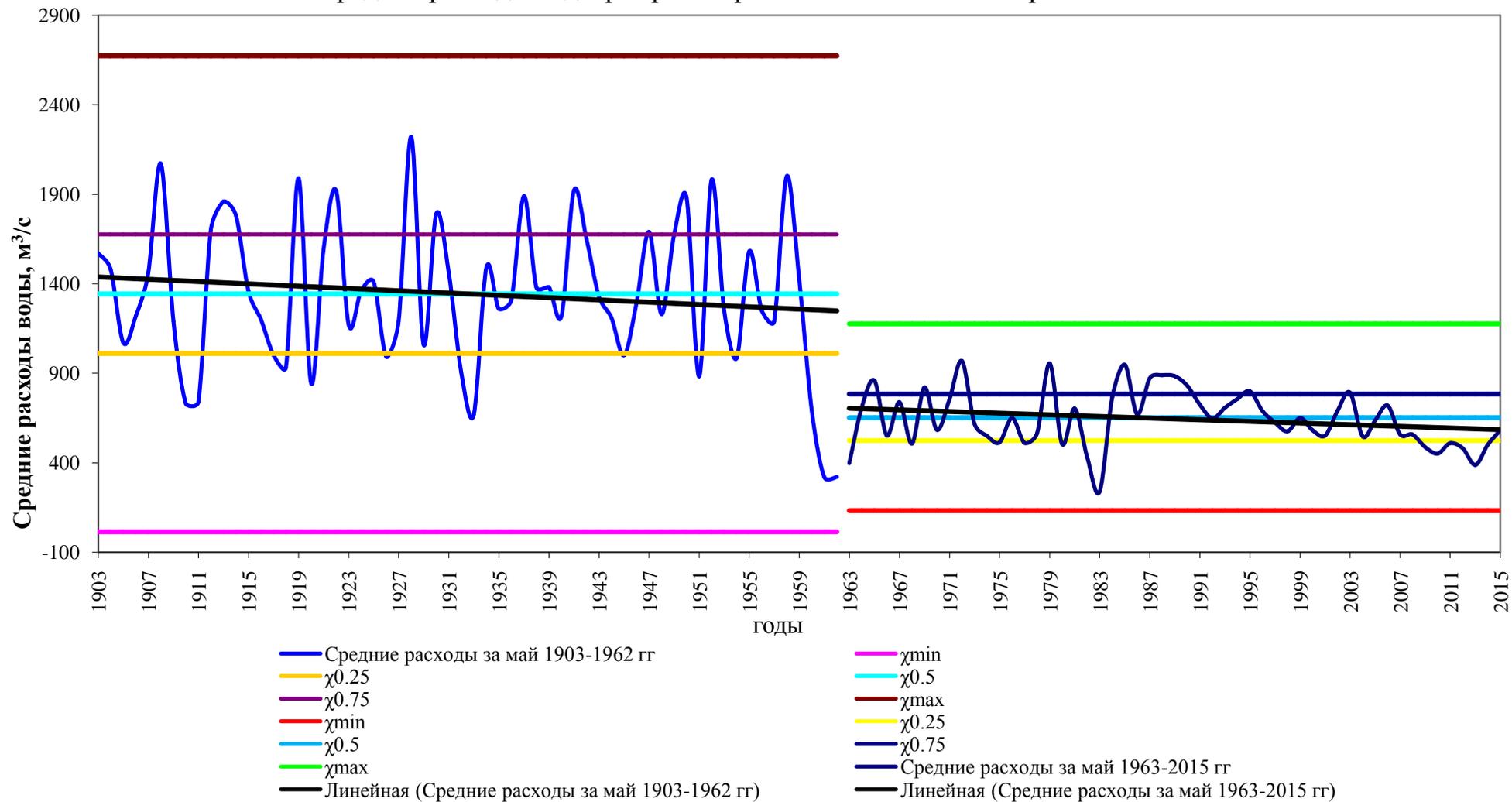


Рисунок 2.6 – График средних расходов воды за май 1903-2015 г. на реке Ертис – в створе г. Усть-Каменогорск

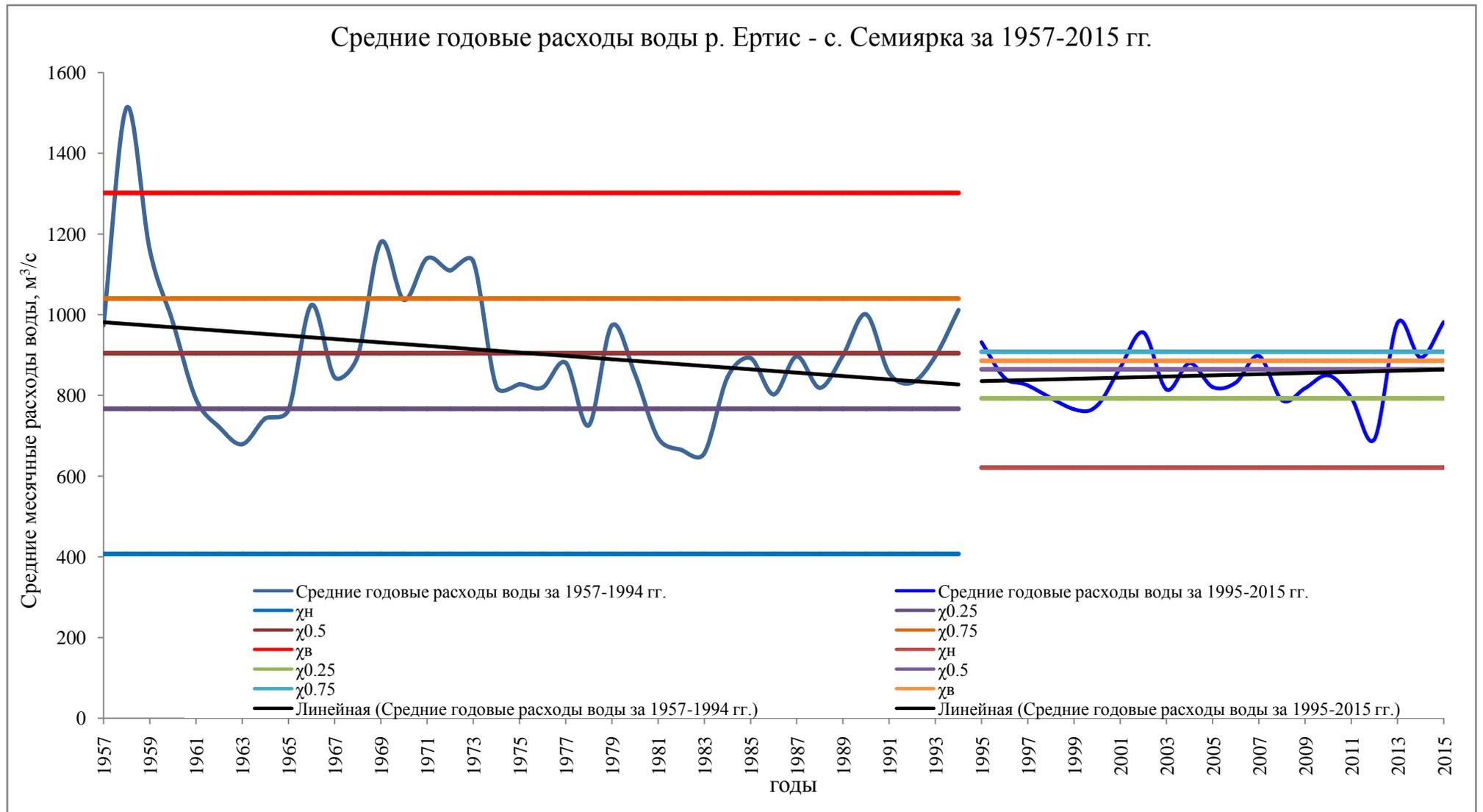


Рисунок 2.7 – График средних расходов воды за 1957-2015 г. на реке Ертыс – с. Семиярка

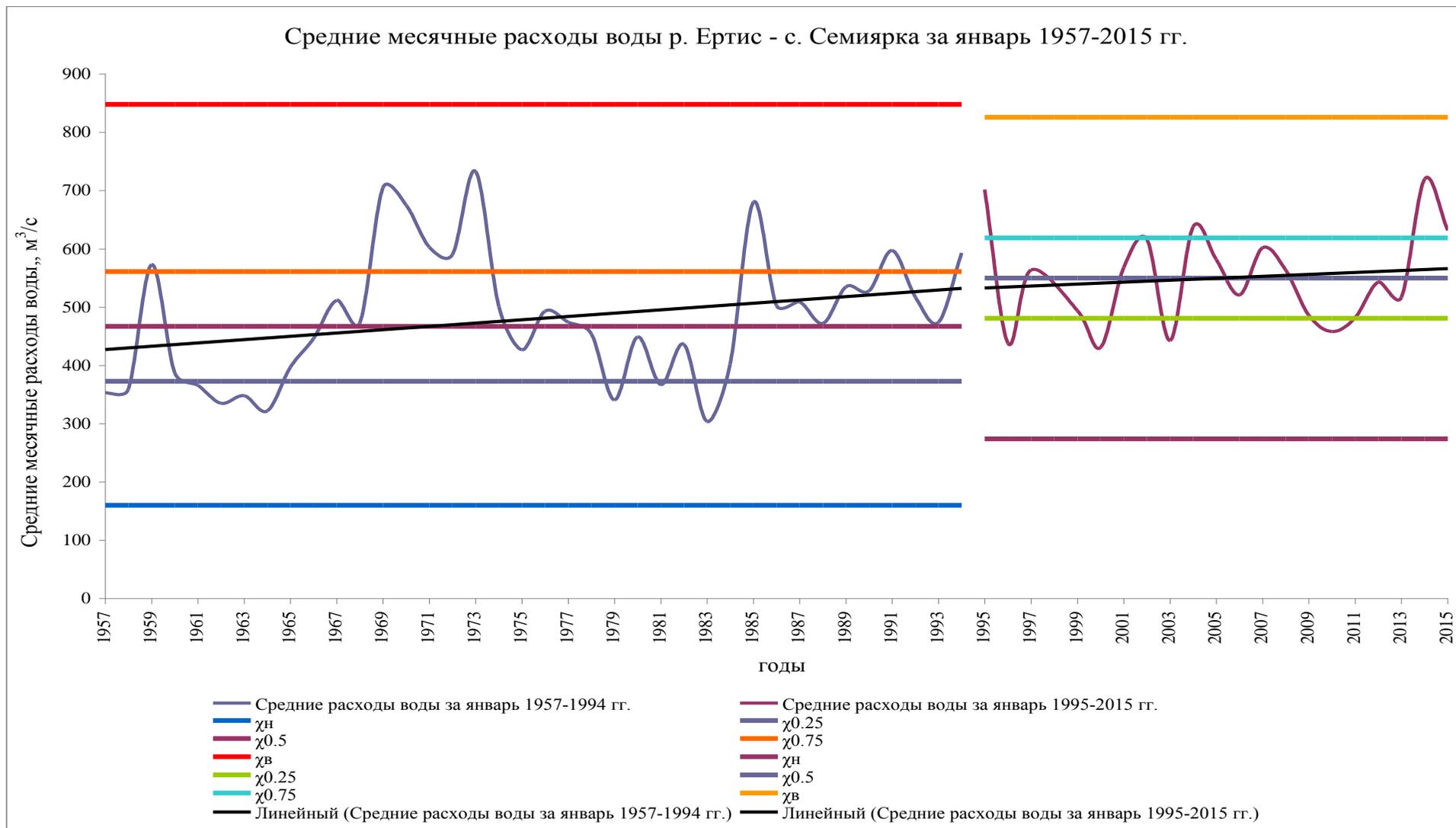


Рисунок 2.8 – График средних расходов воды за январь 1957-2015 г. на реке Ертис – с. Семиярка

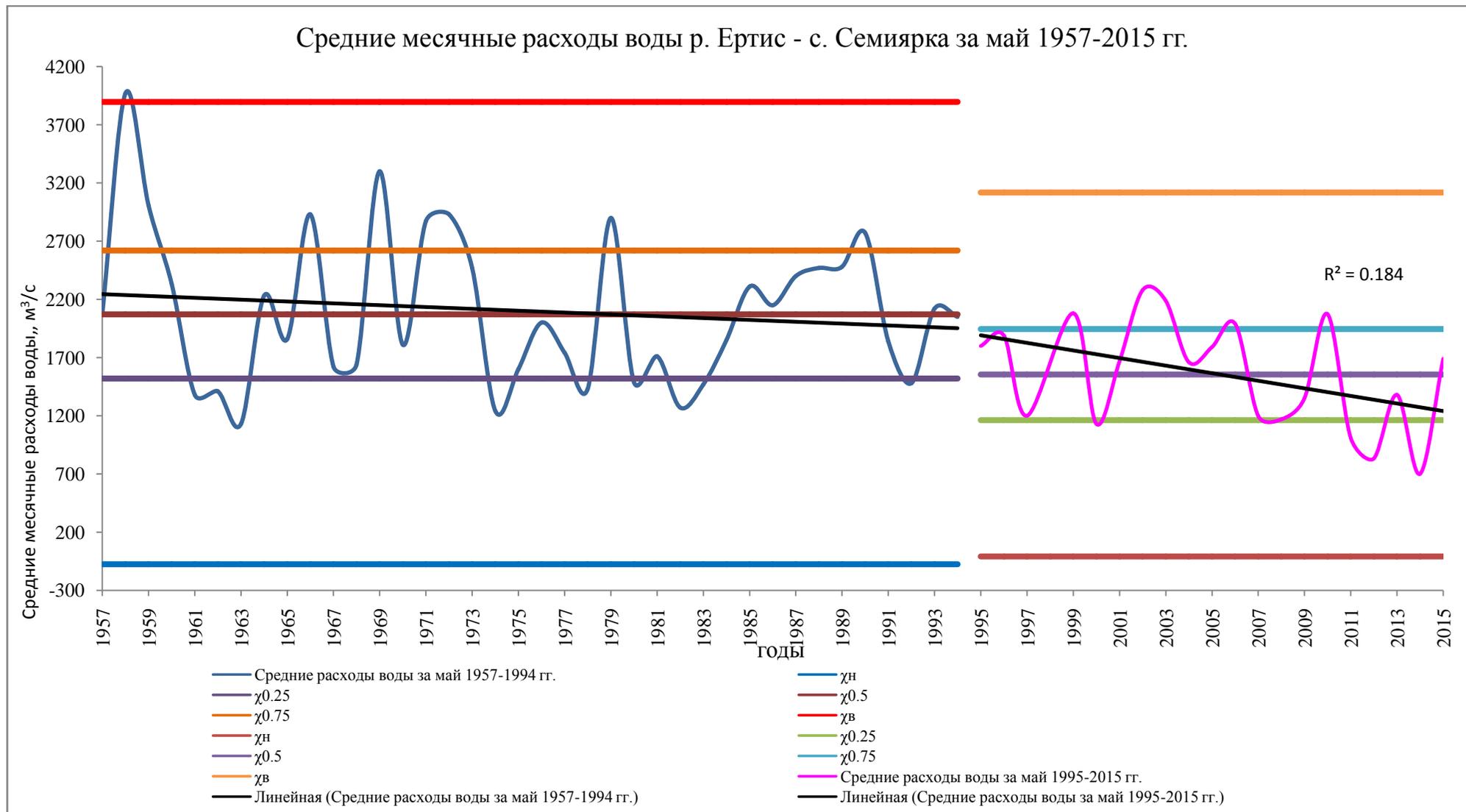


Рисунок 2.9 – График средних расходов воды за май 1957-1994 г. на реке Ертис – с. Семиярка

Таблица 2.2 – Сведения о маловодных и многоводных годах

Створ	Многоводные	Маловодные	Экстремально многоводные
Р. Кара Ертіс – с. Боран	1940-1943, 1946, 1947, 1952, 1954-1961, 1966, 1969-1973, 1984, 1985, 1987, 1988, 1993, 1994, 2001, 2002, 2005, 2010, 2013	1938, 1939, 1944, 1945, 1948-1951, 1953, 1962-1965, 1967, 1968, 1974-1983, 1986, 1989-1991, 1996, 1997, 1999, 2000, 2003, 2004, 2006-2009, 2011, 2012, 2014, 2015	Не наблюдались
р. Ертіс – в створе г. Усть-Каменогорск	1903, 1907, 1908, 1912-1916, 1919, 1921-1926, 1928-1931, 1937, 1938, 1941-1943, 1946-1949, 1952, 1954, 1956-1959, 1969-1974, 1988, 1994-1996, 2003	1905, 1906, 1909-1911, 1917, 1918, 1920, 1927, 1932, 1933, 1935, 1939, 1940, 1944, 1945, 1951, 1953, 1955, 1960-1967, 1975-1987, 1989-1993, 1998-2001, 2004-2006, 2008-2014	тоже
р. Ертіс – с. Семиярка	1957, 1959, 1966, 1969-1973, 1979, 1990, 1994, 1995, 2002, 2013, 2015	1961-1965, 1967, 1974-1976, 1978, 1980-1984, 1986, 1988, 1991, 1992, 1996-2001, 2003, 2005, 2006, 2008-2012	1958

Из таблицы видно, что синхронные многоводные годы для рек Кара Ертіс и Ертіс в створе г. Усть-Каменогорск наблюдались: 1941-1973, 1946, 1947, 1952, 1954, 1956. Синхронные маловодные годы: 1939, 1944, 1945, 1951, 1953.

С 1957 г. на реке Ертіс действует гидропост р. Ертіс – с. Семиярка, заключительный створ Восточно-Казахстанской области перед выходом р. Ертіс в Павлодарскую область.

Продолжая анализ данных таблицы 2.2, добавляя, при этом, створ в с. Семиярка, наблюдаем следующие синхронные многоводные годы: 1957-1959, 1969-1973, 1994. Синхронные маловодные годы: 1962-1965, 1967, 1975, 1976, 1978, 1980-1983, 1986, 1991, 2000, 2006, 2008, 2009, 2011, 2012.

Экстремально многоводный год наблюдался на гидропосту р. Ертис – с. Семиярка в 1958 г.

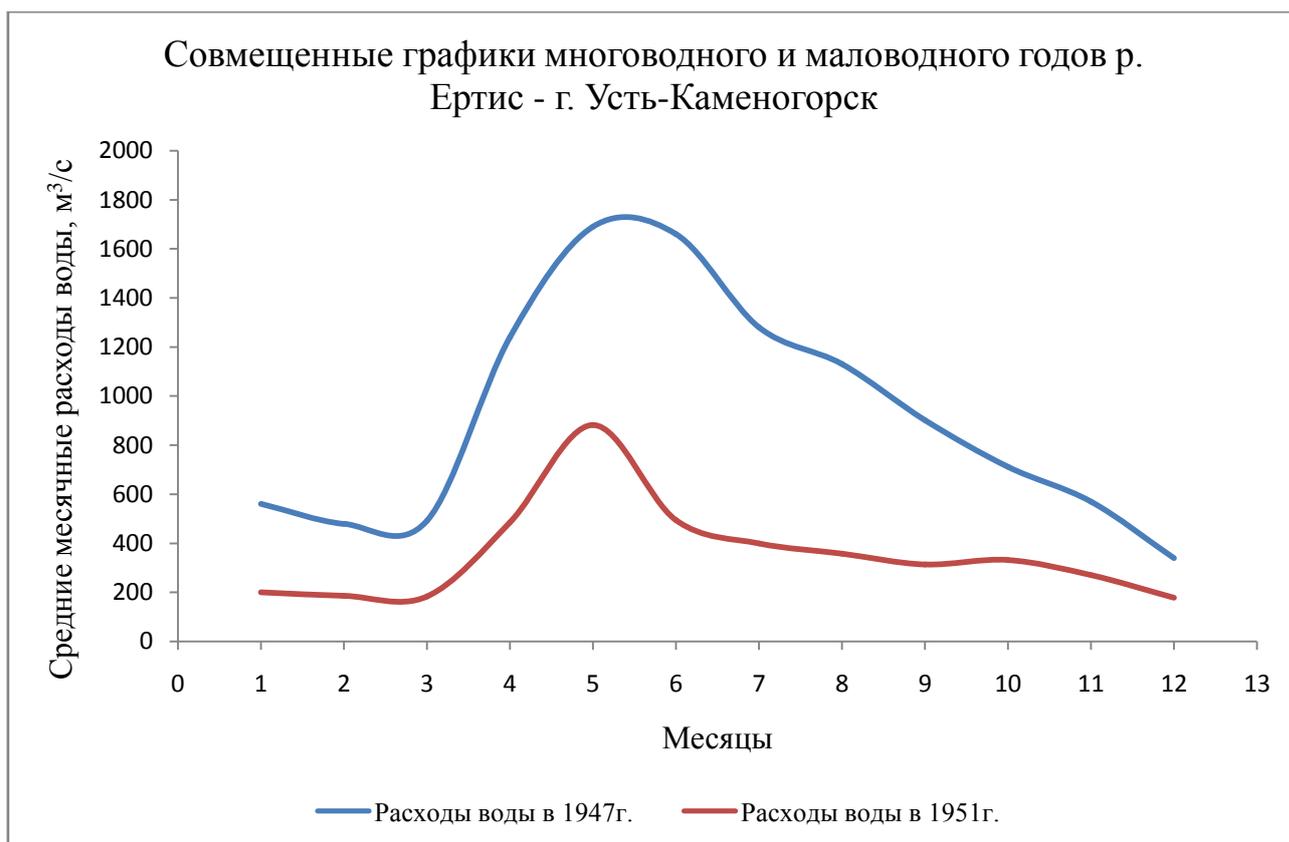


Рисунок 2.10 – Гидрографы маловодного и многоводного годов р. Ертис.

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, полосовой и режекторной.

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

Для анализа многолетней изменчивости гидрометеорологических процессов рекомендуется применять цифровую тангенсную низкочастотную фильтрацию рядов. Это связано с тем, что тангенсная фильтрация обладает такими преимуществами, 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;

$X(\omega)$ и $Y(\omega)$ – их Фурье – изображение;

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:

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

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

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

$b_0, b_1,$ – коэффициенты;

b_2, a_{1m}, a_{2m} – коэффициенты;

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

При таком представлении функцию $|H(\omega)|$ называют амплитудно-частотной характеристикой фильтра. В каждой точке частотного диапазона она выражает отношение амплитуд гармоник отфильтрованного и неотфильтрованного ряда с данной частотой. Функцию $\varphi(\omega)$ называют фазово-частотной характеристикой фильтра. Она выражает зависимость сдвига фаз от частоты в отфильтрованном и неотфильтрованном рядах.

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.

На рисунке 2.11 изображен ход среднегодовых расходов воды на гидрологическом посту р. Кара Ерчис – с. Боран за период с 1938 по 2015 годы. Как видно тренд расходов воды за указанный период имеет тенденцию к понижению ($R/\sigma = 2.45 \geq 2$ тренд значим).

На графике в период с 1903 по 1979 годы четка выражен синусоидальный ход периодов подъема и спада с периодичностью 10 лет. В период с 1980 по 2015 г. наблюдается нарушения 10-летней периодичности.

Средние годовые расходы воды р. Кара Ерчис - с. Боран

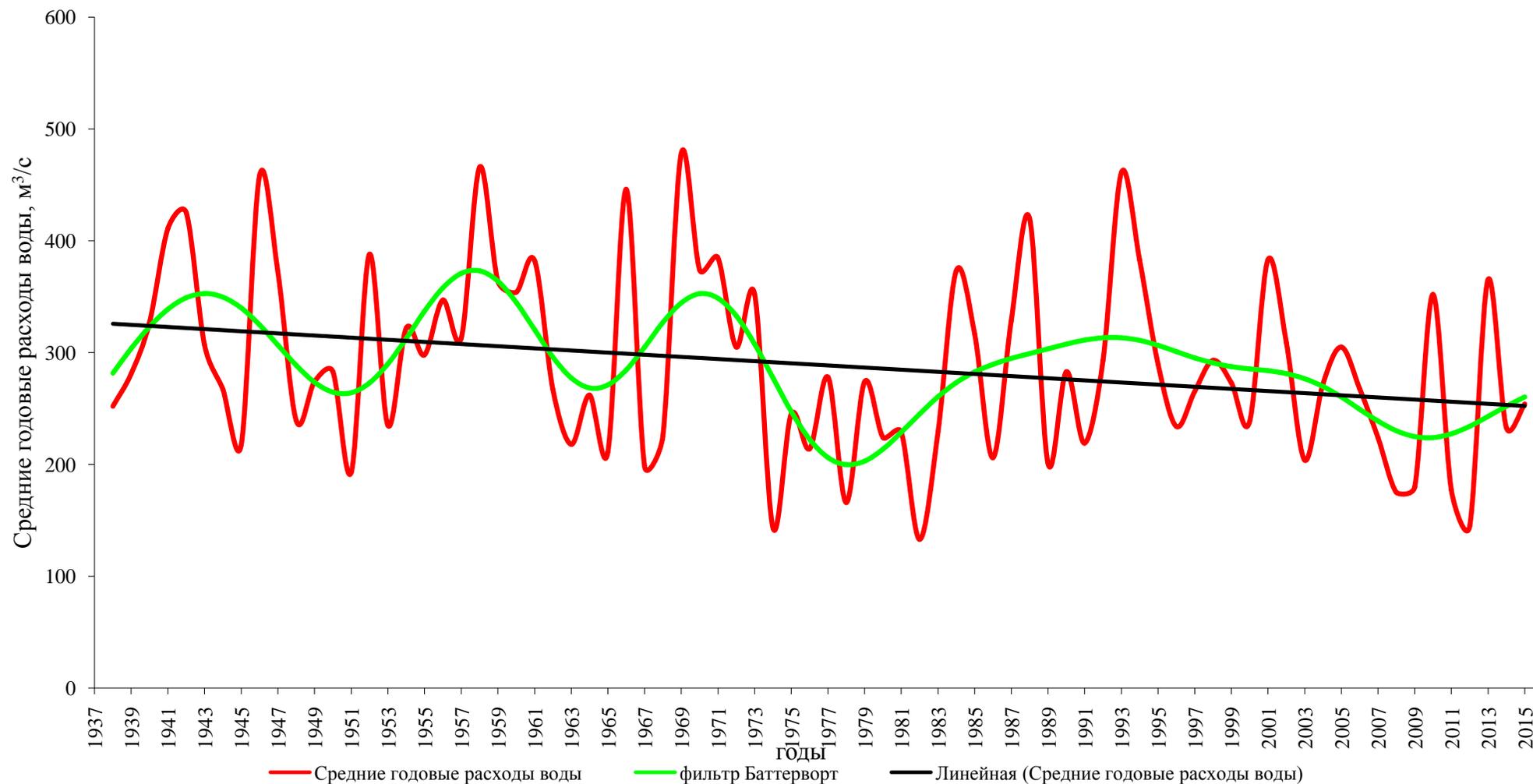


Рисунок 2.11 – Реализация среднегодовых расходов воды р. Кара Ерчис – с. Боран

Средние расходы воды р. Ертис - г. Усть-каменогорск

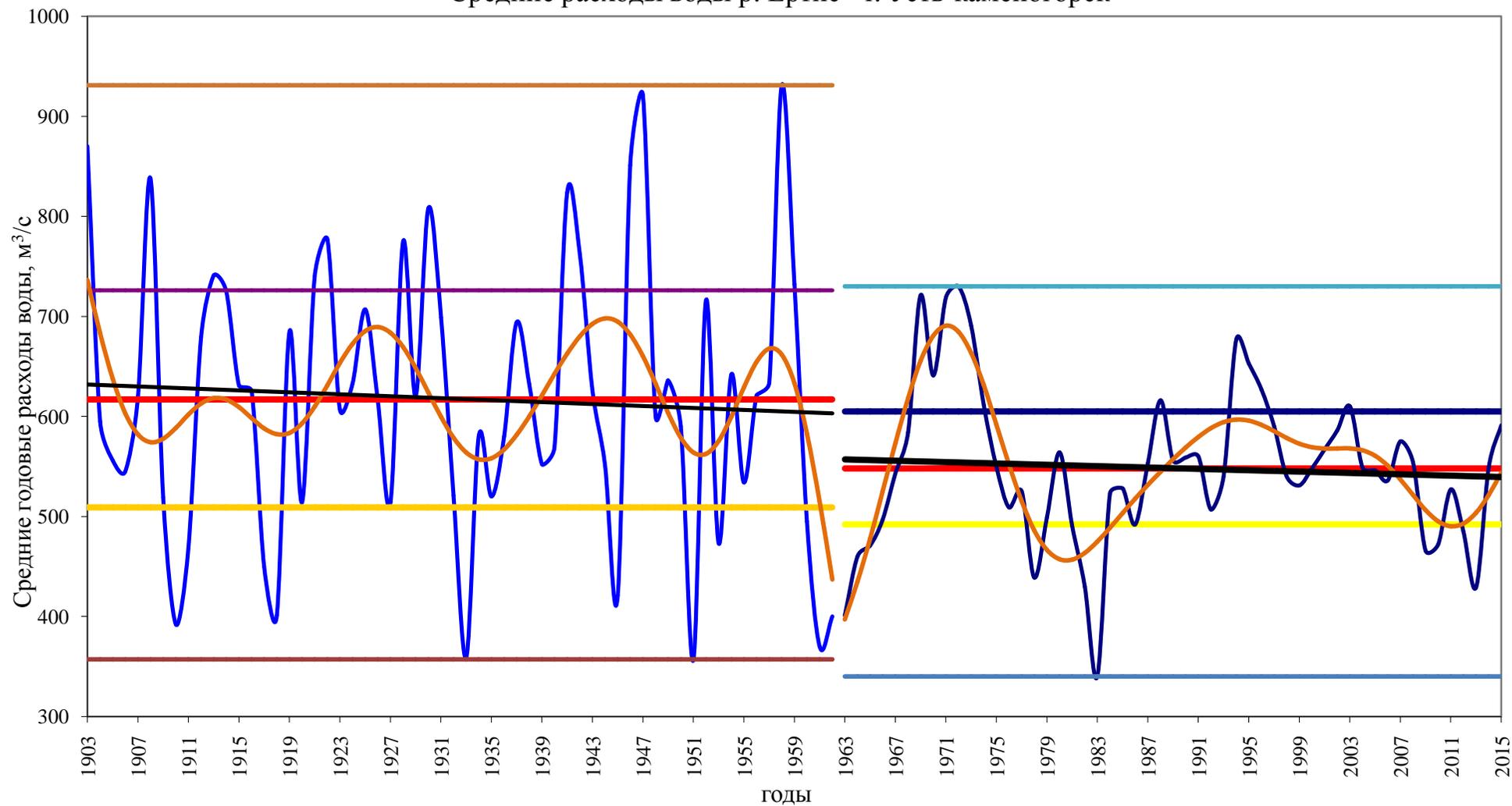


Рисунок 2.12 – Реализация среднегодовых расходов воды р. Ертис – в створе г. Усть-Каменогорск

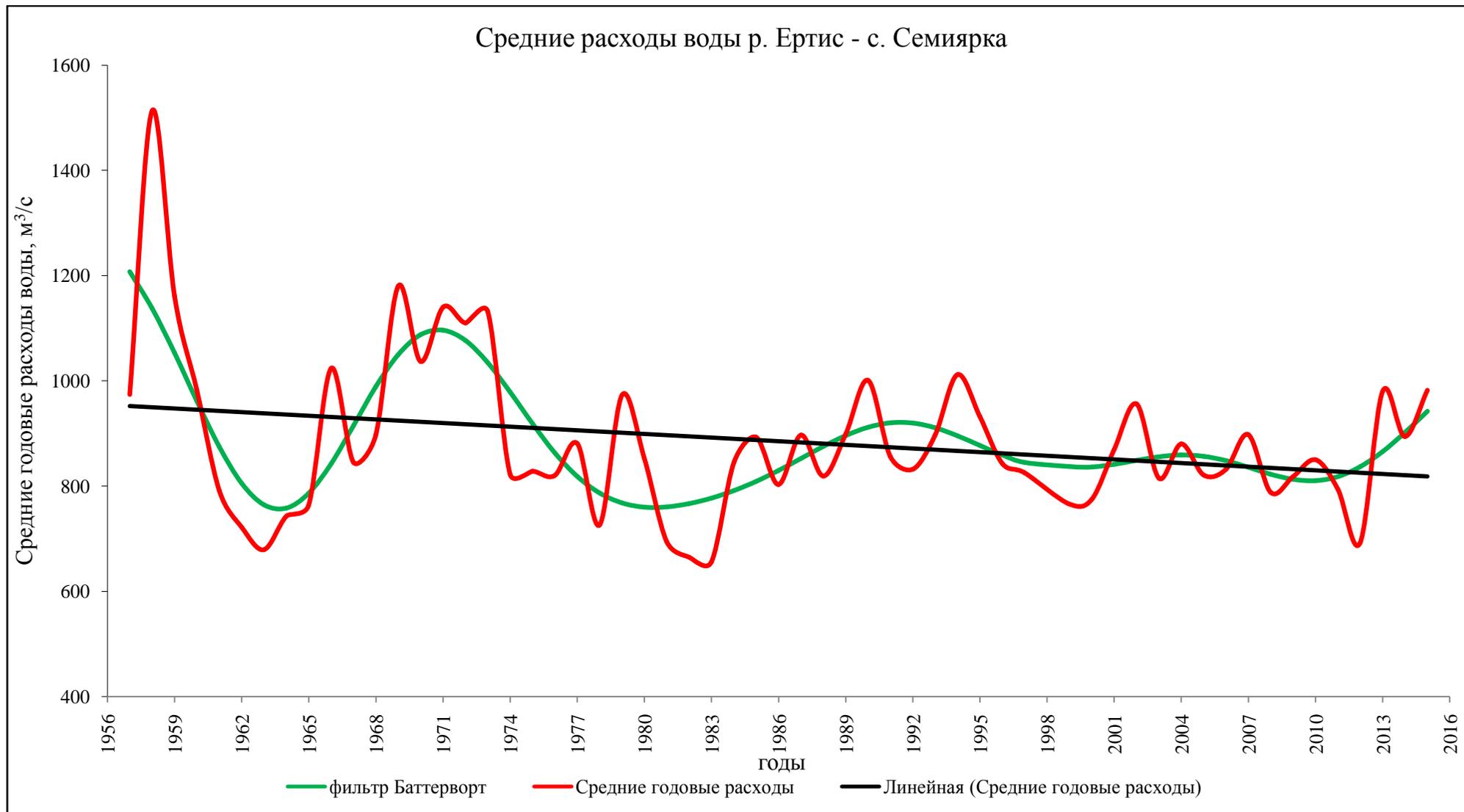


Рисунок 2.13 – Реализация среднегодовых расходов воды р. Ертис – с. Семиярка

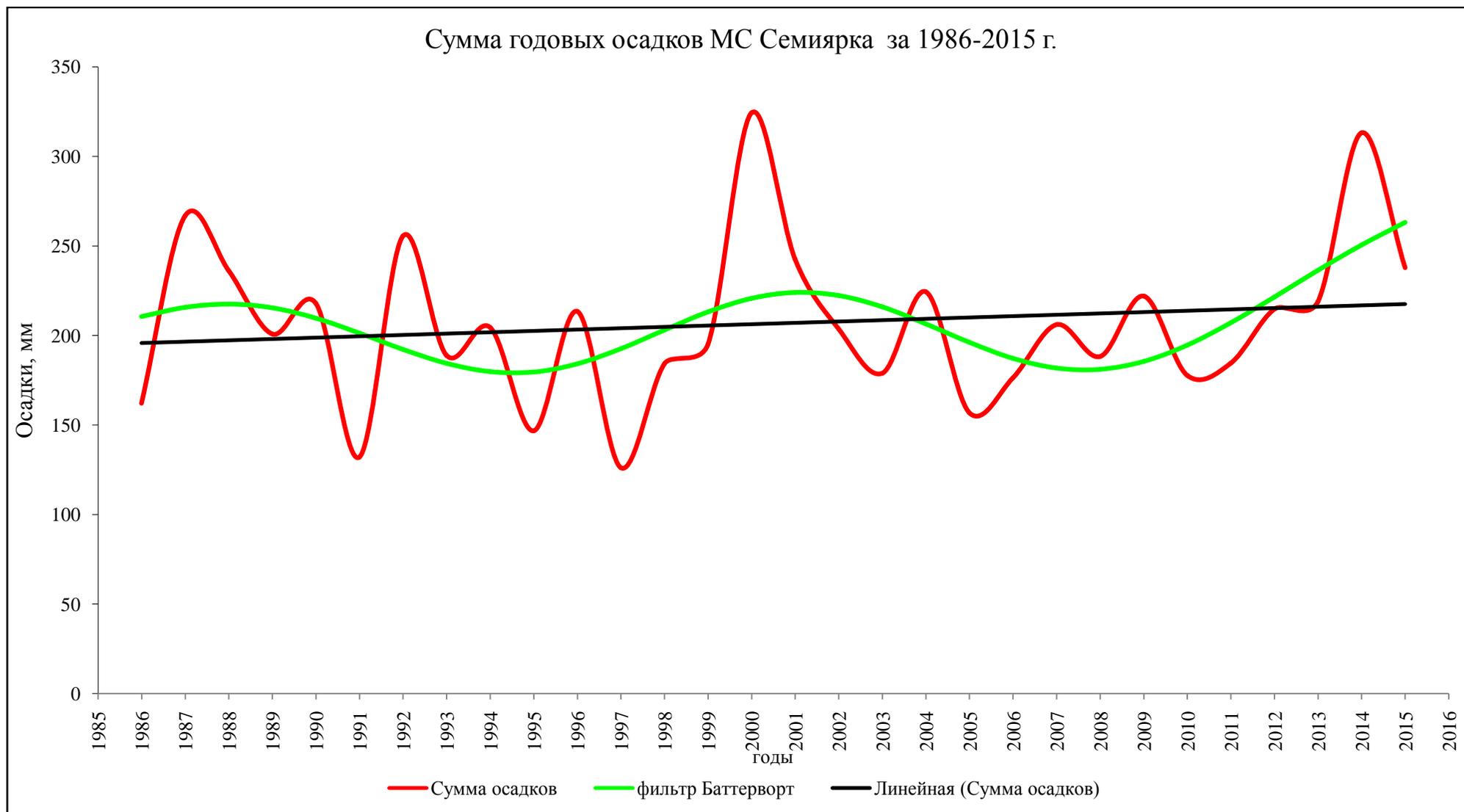


Рисунок 2.14 – Реализация годовых сумм осадков МС Семиярка

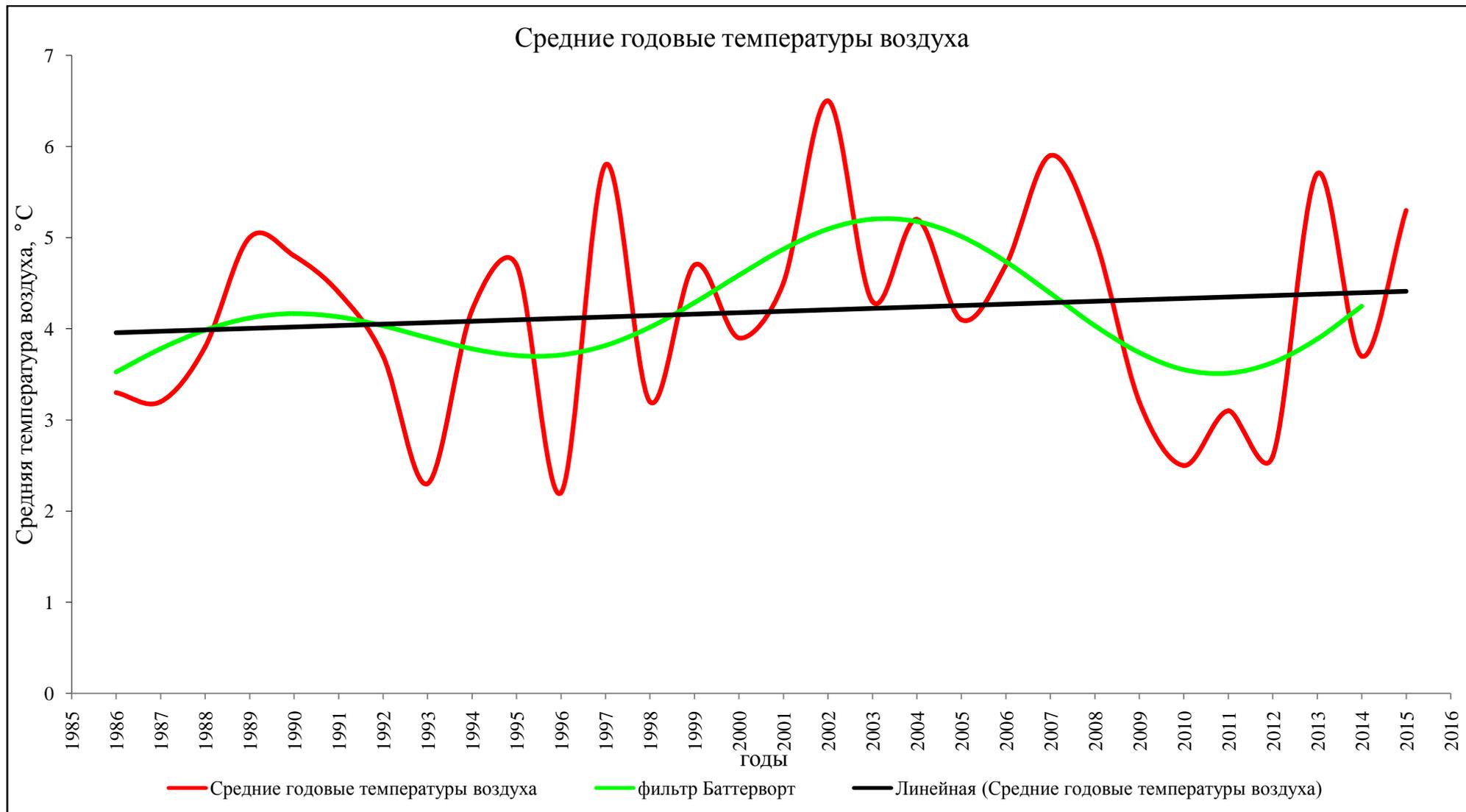


Рисунок 2.14 – Реализация средних годовых температур МС Семиярка

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 используются 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 Ертис по климатическим особенностям формирования стока, по характеру водного питания и внутригодового распределения стока относится к группе рек Алтайского типа по классификации Б. Д. Зайкова. Реки данного типа отличаются невысоким растянутым, имеющим гребенчатый вид половодьем, повышенным летним стоком и низким стоком зимой.

Максимальный расход половодья в среднем до 10 раз превышает средний годовой расход. Этот тип распространен на Алтае, в зонах сезонных снегов горных областей Средней Азии и Кавказа и на о. Сахалин.

На рисунках 3.1, 3.3, 3.4 приведены реализации средних месячных расходов воды за период с 2000 по 2015 г. и с 1937 по 1952 г. для р. Иртыш – г. Усть-Каменогорск (до строительства ГЭС).

Как видно из рисунка 3.2, набор основных фаз внутригодового водного режима, время их наступления и роль в жизни реки Кара Ертыс, а также особенности формирования межгодовой изменчивости стока постоянны. Из года в год на р. Кара Ертыс повторяются весеннее половодье (май, июнь), летняя межень, летне-осенние дождевые паводки, а также продолжительная зимняя межень. Максимум весеннего половодья приходится в основном на июнь, в редкие годы на май. Таким образом, можно выделить два периода водного режима: теплый, продолжающийся с апреля по октябрь включительно, и холодный – с ноября по март. Для теплого периода характерна волна половодья, на спаде которого образуется летняя межень, в сентябре-октябре наблюдаются дождевые паводки. От года к году меняется интенсивность половодий и паводков, уровень меженного стока остается постоянным.

На рисунке 3.2 изображен гидрограф р. Ертыс в створе г. Усть-Каменогорск в естественный период, где видно, что набор основных фаз внутригодового водного режима, время их наступления и роль в жизни реки, а также особенности формирования межгодовой изменчивости стока постоянны. Ежегодно повторяются весеннее половодье, летняя межень, летне-осенние дождевые паводки, зимняя межень. Пик весеннего половодья, в основном, приходился на май. После ввода в эксплуатацию Усть-Каменогорской ГЭС, являющейся контррегулятором Бухтарминской ГЭС, все фазы водного и ледового режимов нарушены. Нет четко выраженных пиков весеннего половодья, не прослеживается ход летней и зимней межени, река не замерзает.

В 1979 г. в районе пос. Шульбинск началось строительство Шульбинской сезонного регулирования, в 1987 г. был запущен первый агрегат и в 1994 г. –

последний. В 275 км ниже данного поселка расположен гидрологический пост р. Ертис – с. Семиярка, на который оказывает влияние работа данной ГЭС.

Из гидрографа, изображенного на рисунке 3.4 видно, что пик весеннего половодья приходится на апрель, в то время как в естественном режиме максимальные пики приходились в большинстве случаев на май. Смещение пика весеннего половодья связано с режимом Шульбинской ГЭС в период весенних природоохранных попусков, при которых основная масса сбросов производится в третьей декаде апреля и в первой половине мая сбросы постепенно снижаются.

Для сравнения на рисунке 3.5 изображен гидрограф р. Ертис – с. Семиярка в период с 1957 по 1972 годы до строительства Шульбинской ГЭС. Как видно на картинке ежегодно повторяются весеннее половодье, летняя межень, летне-осенние дождевые паводки, зимняя межень. Пик весеннего половодья, в основном, приходился на май. Пик весеннего половодья формируется за счет боковой приточности основных рек Ульби и Оба.

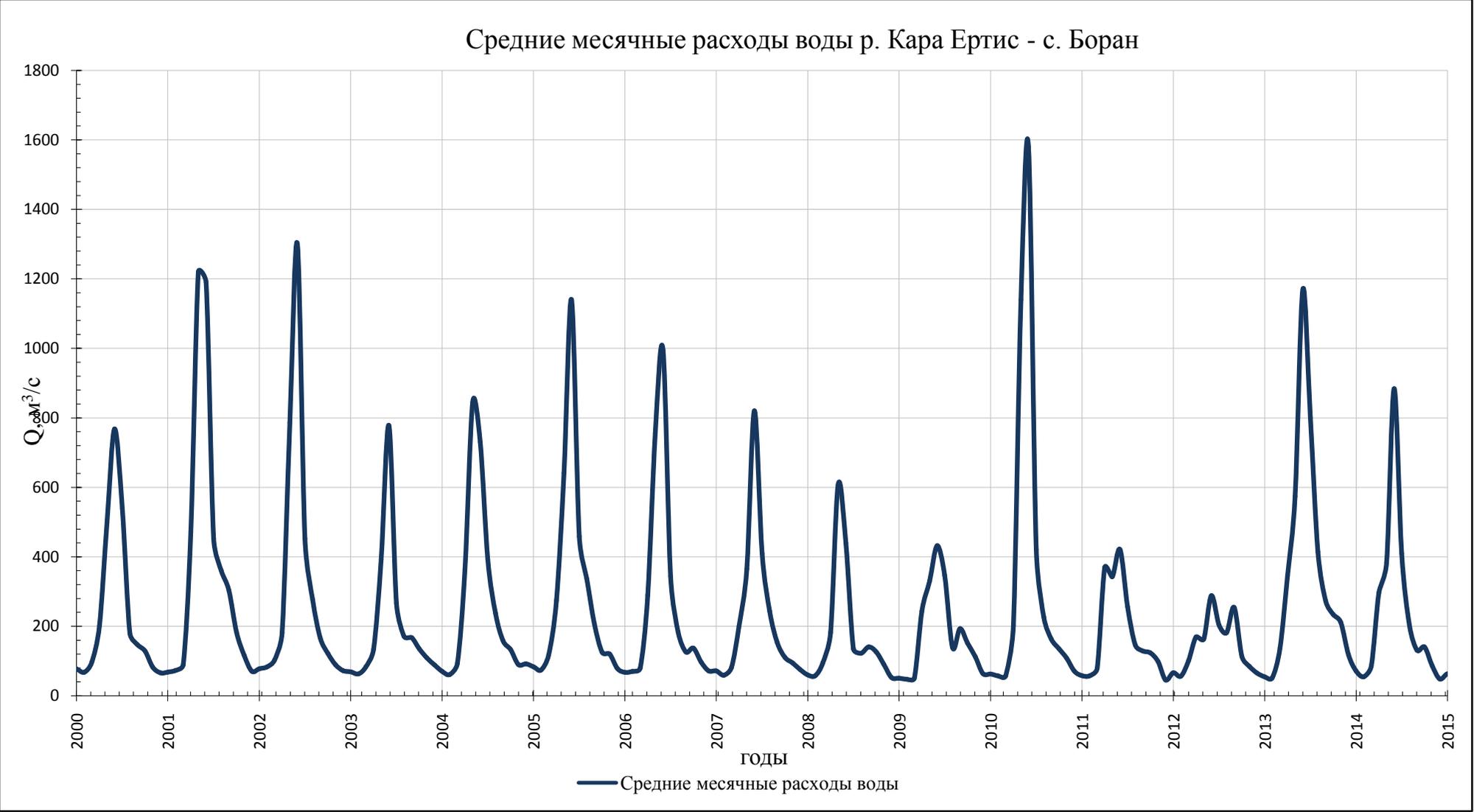


Рисунок 3.1 – Гидрограф р. Кара Ертис – с. Боран за период с 2000 по 2015 годы



Рисунок 3.2 – Гидрограф р. Иртыш – г. Усть-Каменогорск за период с 1937 по 1952 годы (до строительства ГЭС)

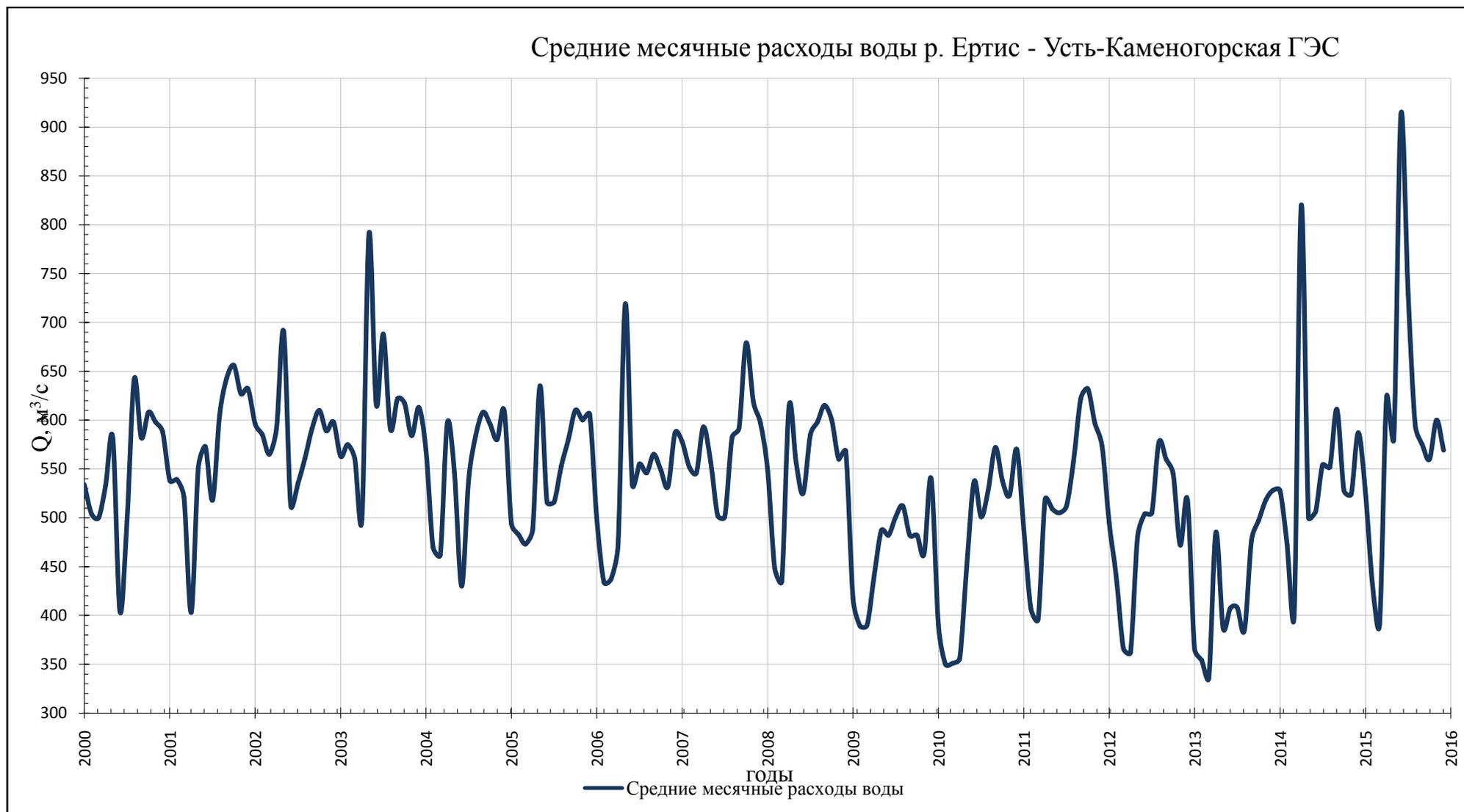


Рисунок 3.3 – Гидрограф р. Ертис – Усть-Каменогорская ГЭС за период с 2000 по 2015 годы

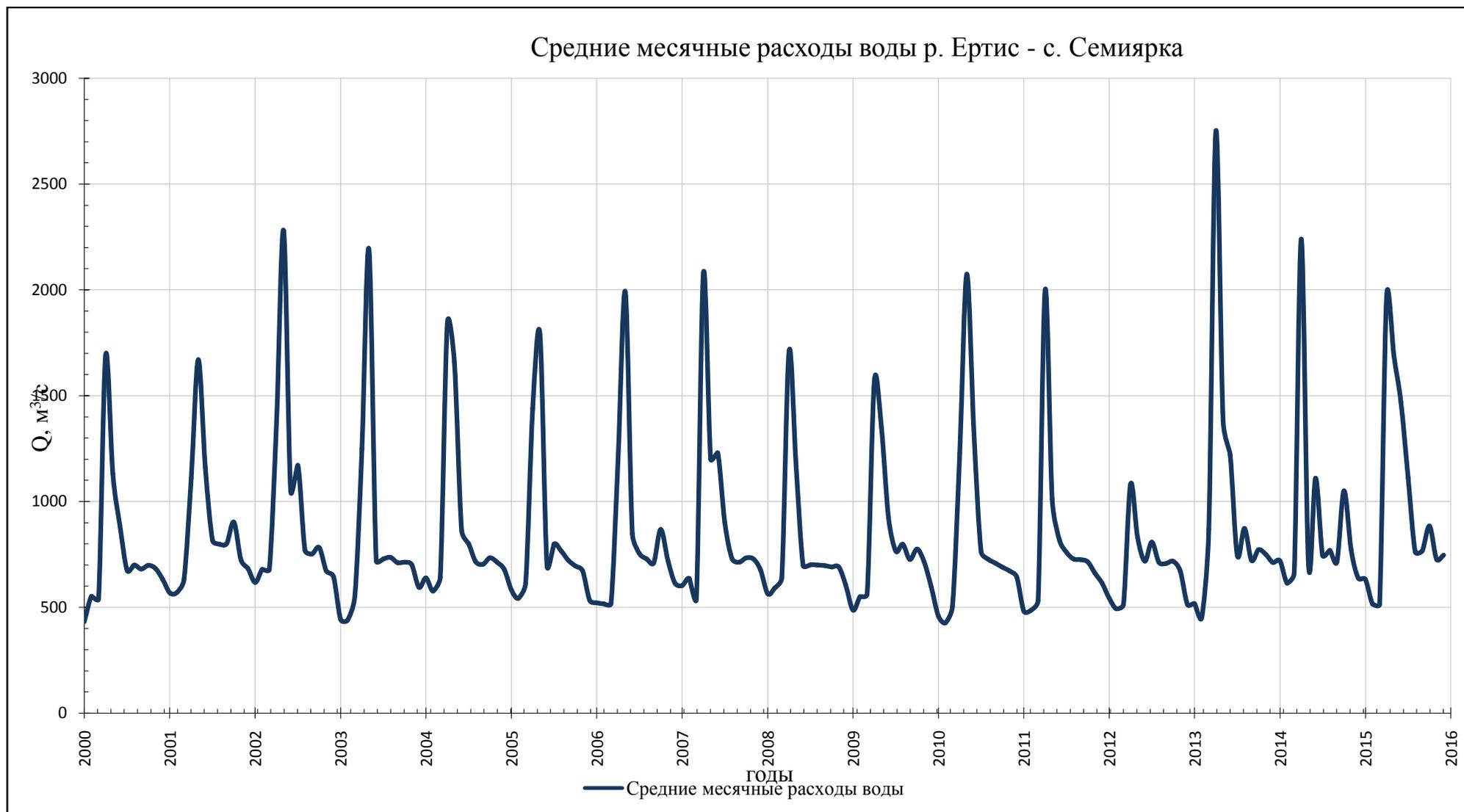


Рисунок 3.4 – Гидрограф р. Ертис – с. Семиярка за период с 2000 по 2015 годы

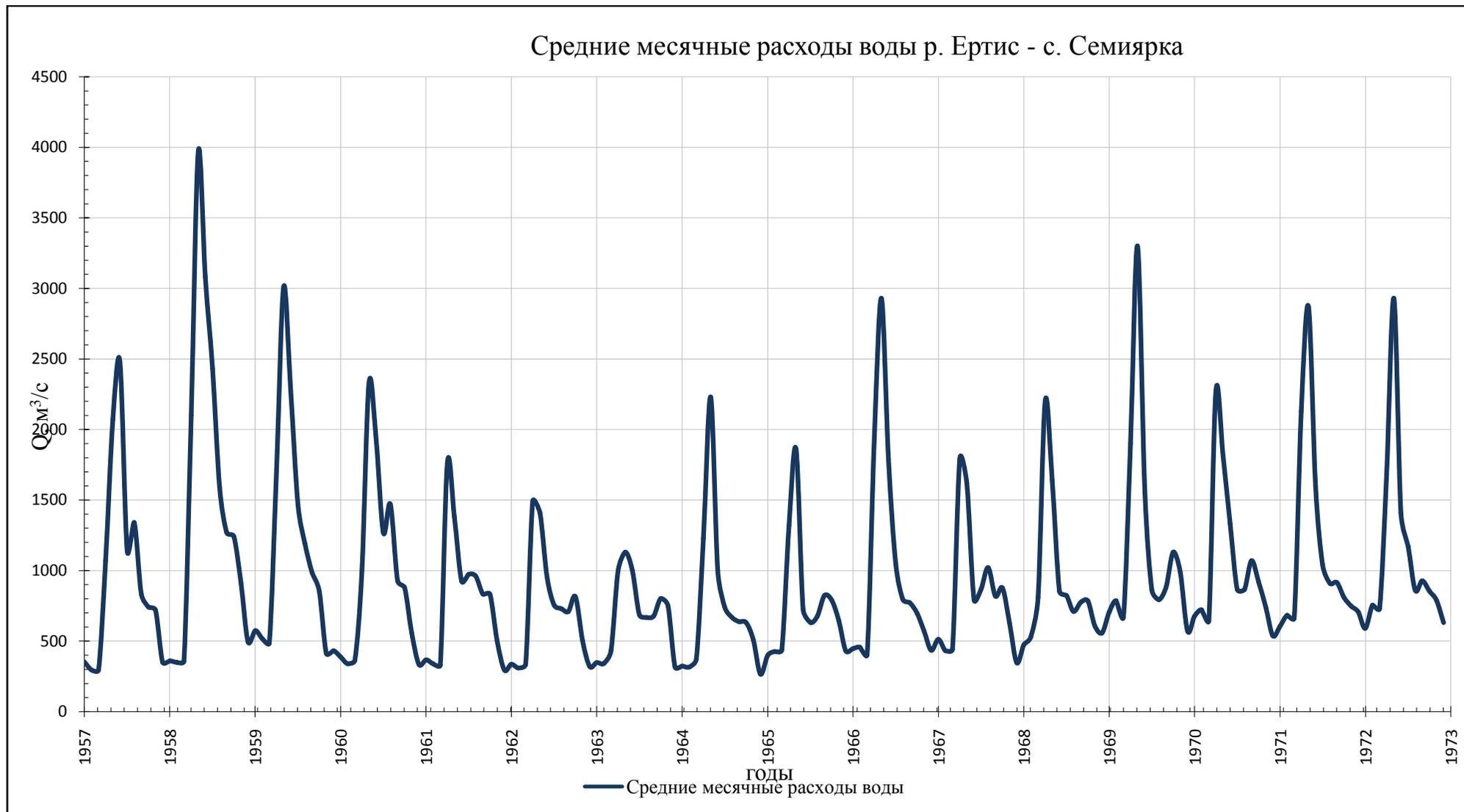


Рисунок 3.5 – Гидрограф р. Ертис – с. Семярка за период с 1957 по 1972 годы (до строительства Шульбинской ГЭС)

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 Ертис приведены на рисунках 3.6 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

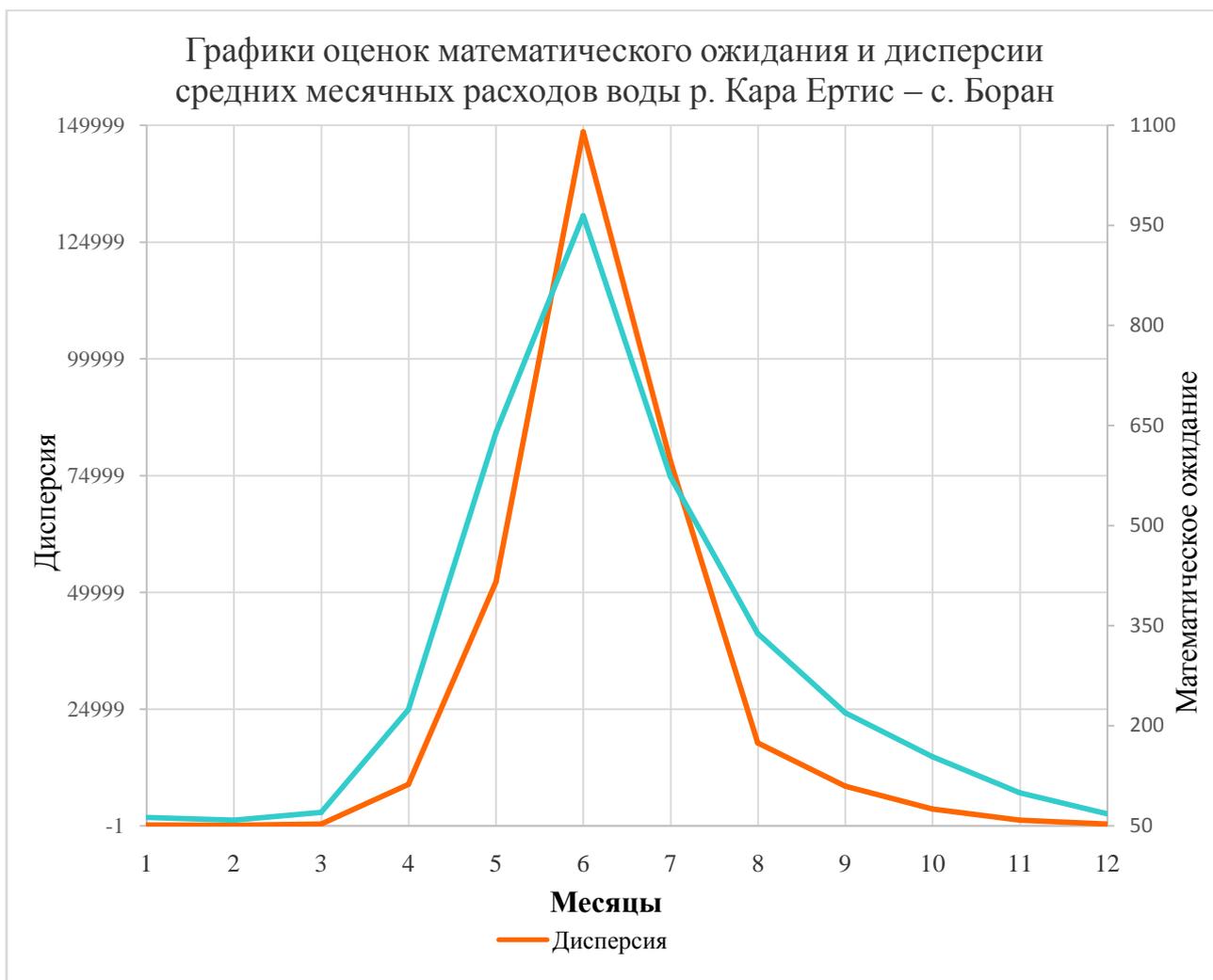


Рисунок 3.6 – График оценки математического ожидания и дисперсии средних месячных значений расхода воды р. Кара Ертис – с. Боран

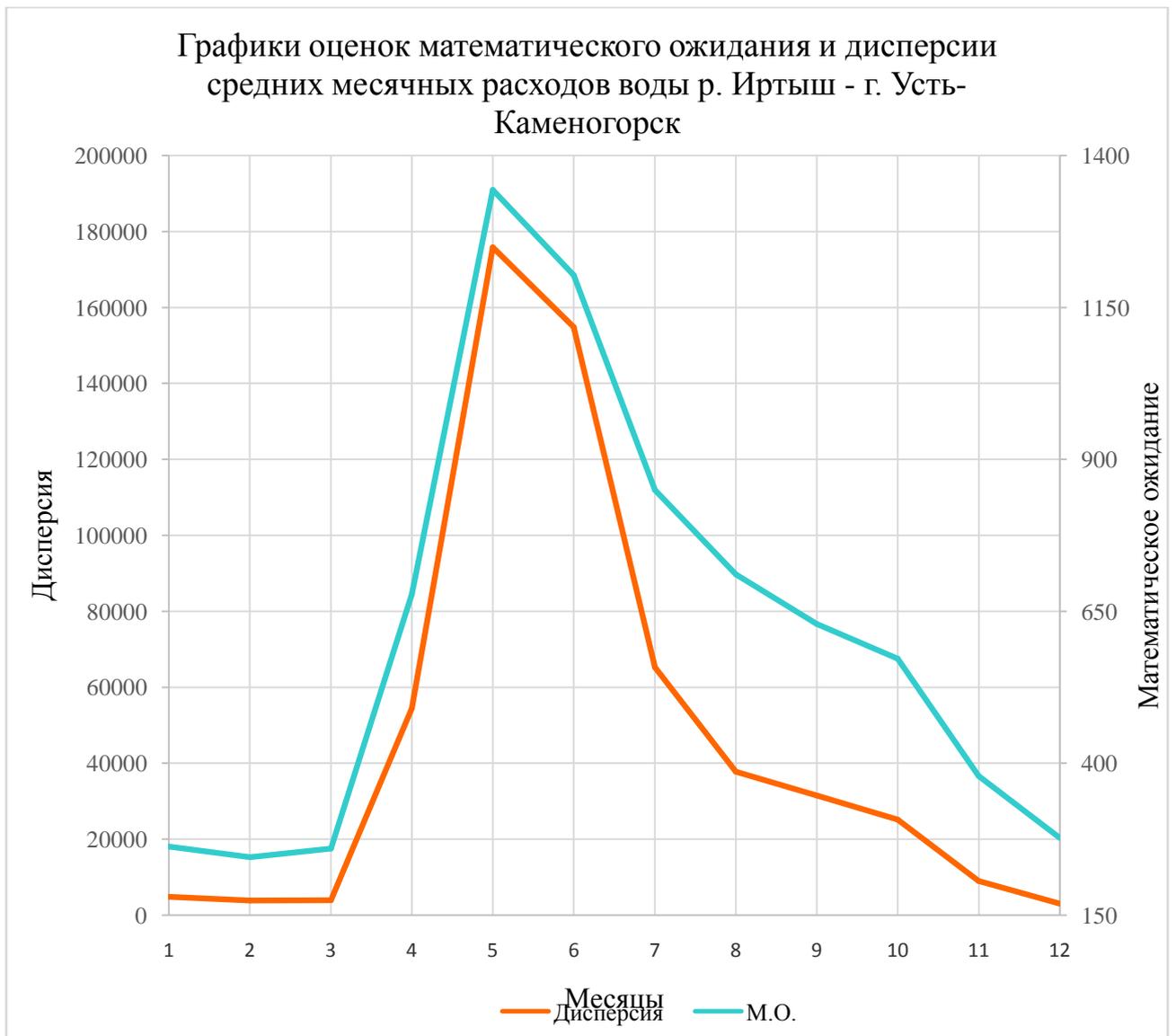


Рисунок 3.8 – График оценки математического ожидания и дисперсии средних месячных значений расхода воды р. Иртыш – г. Усть-Каменогорск (до строительства ГЭС)

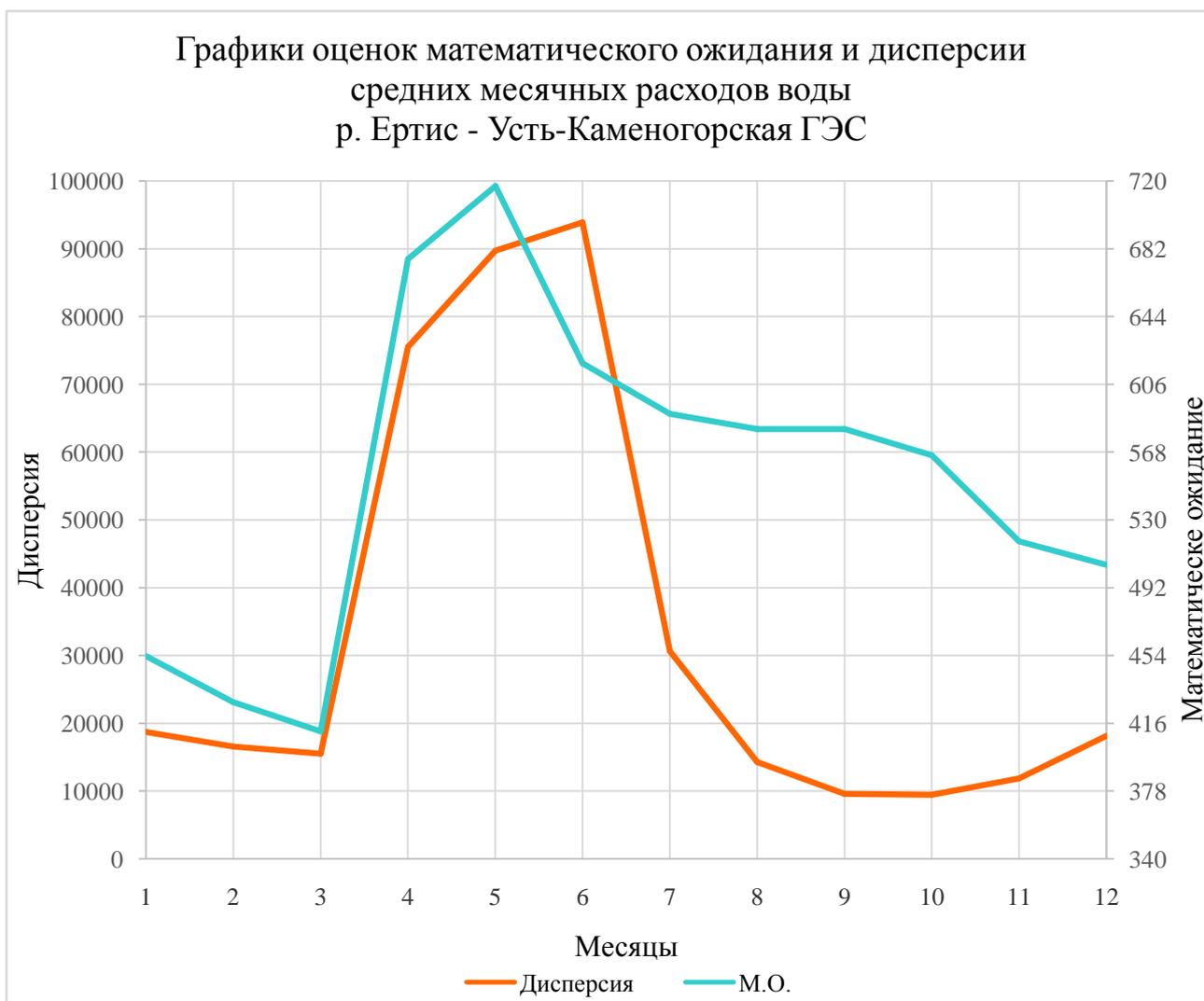


Рисунок 3.9 – График оценки математического ожидания и дисперсии средних месячных значений расхода воды р. Ертис –Усть-Каменогорская ГЭС

оценок математического ожидания $m(t)$, имеют вид кривых с широким, выраженным продолжительным половодьем. Основной максимум наблюдается в период весеннего половодья (апрель, май). Максимум дождевых паводков наблюдается в октябре. Минимумы на кривых математического ожидания $m(t)$ соответствуют зимней межени. Кривые дисперсии $D(t)$ практически повторяют особенности кривых математического ожидания $m(t)$, исключением является месяц июль. Это объясняется тем, что летние дождевые паводки наблюдались не каждый год, а бывали и засушливые года. Расчет вероятностных характеристик внутригодовой изменчивости речного стока для каждого месяца года для построения графиков приведены в Приложении Д.

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 целесообразности 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 $\beta_t = \{\beta_{1,t}, \dots, \beta_{12,t}\}$ – вектор белого шума с нулевым средним и дисперсией $\delta^2 = \{\delta^2_1, \dots, \delta^2_{12}\}$;
 $\varphi \beta_{t-1} = \{\varphi_1 \beta_{1,t-1}, \dots, \varphi_{12} \beta_{12,t-1}\}$ – вектор белого шума с нулевым средним и дисперсией $\delta^2 = \{\delta^2_1, \dots, \delta^2_{12}\}$;
 $\varepsilon_t = \{\varepsilon_{1,t}, \dots, \varepsilon_{12,t}\}$ – вектор белого шума с нулевым средним и дисперсией $\delta^2 = \{\delta^2_1, \dots, \delta^2_{12}\}$;
 $m = \{m_1, \dots, m_{12}\}$ – 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

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

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 АР (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, вытекающими 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 первого 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.

Из таблицы 3.1 видно, что параметры φ_1 моделей стока рек меняются от 0.39 в период весеннего периода (май) до 0.85 в октябре для гидропоста р. Кара Ертис – с. Боран; от 0.73

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. Кара Ертис – с. Боран												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	62.4	58.6	70.2	224	640	964	573	338	219	153	99.5	67.8
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	154	137	375	8874	52237	148538	78059	17707	8485	3575	1197	341
φ_1	0.92	0.65	0.40	0.45	0.39	0.76	0.87	0.76	0.83	0.85	0.75	0.81
φ_2	0.53	0.42	0.43	0.27	0.05	0.14	0.27	0.24	0.29	0.41	0.43	0.43
р. Ертис – Бухтарминская ГЭС												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	473	448	421	639	587	504	537	544	564	557	533	528
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	13731	12509	13168	77910	28684	8889	5326	5026	6674	6769	8495	12861
φ_1	0.84	0.89	0.36	0.13	0.37	0.77	0.75	0.80	0.84	0.69	0.85	0.78
φ_2	0.52	0.46	0.68	0.72	0.29	0.28	0.34	0.34	0.48	0.30	0.38	0.51
р. Ертис – г. Усть-Каменогорск (1903-1962 г.)												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	262	244	258	693	1392	1221	854	711	630	574	378	273
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	4846	3785	4193	52679	144985	133118	59395	37093	33927	27168	8478	2716
φ_1	0.98	0.98	0.55	0.18	0.73	0.83	0.91	0.89	0.94	0.91	0.87	0.88
φ_2	0.17	0.22	0.23	0.31	-0.07	-0.02	-0.12	0.02	-0.02	0.07	0.15	0.21
р. Ертис – Усть-Каменогорская ГЭС (1963-2015 г.)												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	454	428	411	676	717	618	590	581	581	566	518	505
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	18731	16553	15517	75557	89738	93911	30623	14268	9569	9434	11875	18164
φ_1	0.90	0.92	0.35	0.15	0.73	0.88	0.86	0.81	0.85	0.63	0.86	0.86
φ_2	0.65	0.63	0.75	0.70	0.62	0.67	0.46	0.58	0.40	0.23	0.45	0.69

Продолжение таблицы 2.1

Вероятностная характеристика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
р. Ертис – г. Усть-Каменогорск (1903-2015 г.)												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	369	346	344	683	1016	885	706	639	603	570	456	402
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	21657	19240	16284	65499	226458	201011	60545	28553	20944	17297	15196	24546
φ_1	0.95	0.95	0.30	0.13	0.85	0.89	0.90	0.85	0.90	0.59	0.87	0.93
φ_2	0.77	0.77	0.79	0.56	0.61	0.60	0.33	0.30	0.10	0.12	0.57	0.85
р. Ертис – с. Семярка (1957-1994 г.)												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	467	484	473	1653	2071	1295	901	818	754	801	664	481
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	14169	21333	18793	221416	479126	318284	130251	68955	31980	23445	26301	23149
φ_1	0.83	0.82	0.57	0.09	0.69	0.86	0.84	0.73	0.71	0.45	0.67	0.67
φ_2	0.50	0.52	0.55	0.37	0.21	0.51	0.54	0.64	0.52	-0.05	0.02	0.55
р. Ертис – с. Семярка (1995-2015 г.) с 1987 г. запущена ШБ ГЭС												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	544	536	587	1584	1739	967	793	757	736	768	724	646
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	5507	8183	10984	170925	275854	54586	14300	9315	8208	7917	7142	4976
φ_1	0.74	0.41	0.53	-0.52	-0.01	0.33	0.27	0.51	0.27	0.26	0.52	0.43
φ_2	-0.02	0.21	0.14	-0.12	0.42	0.08	-0.05	0.09	-0.11	0.02	-0.06	-0.01
р. Ертис – с. Семярка (1957-2015 г.)												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	496	500	519	1592	1878	1118	835	775	732	772	681	551
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	15502	19713	22589	238601	462345	235698	87897	50771	29482	26214	25652	26066
φ_1	0.86	0.81	0.58	0.08	0.67	0.84	0.84	0.78	0.78	0.62	0.71	0.42
φ_2	0.39	0.55	-0.01	0.07	-0.14	-0.068	0.24	0.17	0.33	0.24	-0.049	0.20

Продолжение таблицы 2.1

Вероятностная характеристика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
р. Оба – г. Шемонаиха (1956-1986 г.)												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	26.5	22.3	32.6	425	641	293	120	83.3	83.0	135.1	90.3	30.2
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	114	74.7	435	30927	62690	28040	5386	2801	4649	7106	5564	109
φ_1	0.82	0.22	0.35	0.23	0.74	0.55	0.70	0.17	0.42	0.29	0.20	0.55
φ_2	0.58	0.40	0.10	0.40	0.049	-0.15	0.26	0.19	-0.035	0.21	-0.13	0.47
р. Оба – г. Шемонаиха (1987-2015 г.)												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	21.5	17.1	30.1	452	567	227	111	78.4	83.7	100	65.1	28.1
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	196	142	361	33360	70265	16419	4277	3681	7883	6635	2346	250
φ_1	0.89	0.63	0.57	0.52	0.60	0.68	0.46	0.30	0.13	0.33	0.62	0.65
φ_2	0.50	0.51	0.23	0.08	0.31	-0.03	0.015	0.16	0.017	0.15	0.12	0.47
р. Оба – г. Шемонаиха (1956-2015 г.)												
$m(t), \text{м}^3/\text{с}$	24.5	20.3	31.9	445	619	266	118	81.8	86.0	122	79.7	30.3
$D(t), (\text{м}^3/\text{с})^2$	151	109	384	29116	63153	22311	4654	3140	6220	7181	4055	189
φ_1	0.86	0.41	0.41	0.30	0.66	0.58	0.55	0.22	0.25	0.32	0.35	0.67
φ_2	0.53	0.50	0.12	0.14	0.13	-0.10	0.10	0.14	-0.03	0.18	-0.04	0.38

Заключение

В настоящей выпускной квалификационной работе выполнен анализ многолетних и внутригодовых колебаний водности реки Ертис с использованием данных среднегодовых, среднемесячных расходов воды, а также извлеченных из них ежегодных последовательностей значений для характерных месяцев года.

Использовались данные по постам р. Кара Ертис – с. Боран, р. Иртыш – г. Усть-каменогорск, р. Ертис – Усть-каменогорская ГЭС, р. Ертис – с. Семиарка. Период наблюдений составил с 1903 по 2015 годы. Водохранилище Буктырма многолетнего регулирования, Усть-Каменогорское – суточного регулирования, Шульбинское – сезонного регулирования. Таким образом, естественный режим наблюдается только на р. Кара Ертис. В г. Усть-Каменогорск речной сток техногенно нарушен Усть-Каменогорским водохранилищем, в г. Семей, с. Семиарка – Шульбинским водохранилищем.

Многолетние колебания анализировались по традиционно используемым данным среднегодовых расходов воды, а также по ежегодным последовательностям значений для характерных месяцев года. Ежегодные последовательности рассматривались как стационарные случайные процессы. Для установления многоводных и маловодных годов в стоке анализируемой реки привлекался квантильный анализ данных. В качестве основных вероятностных характеристик использовались квантили X_{\min} , $X_{0.25}$, $X_{0.5}$, $X_{0.75}$, X_{\max} и основанные на них другие расчетные параметры.

Для выделения трендов на отрезках локальной нестационарности использовалась низкочастотная фильтрация Баттерворта.

Выполненный анализ показал, что в стоке реки Ертис, на рассмотренных постах, многоводные условия пришлись

Для рек Кара Ертис и Ертис в створе г. Усть-Каменогорск наблюдались: 1941-1973, 1946, 1947, 1952, 1954, 1956. Синхронные маловодные годы: 1939,

1944, 1945, 1951, 1953; добавляя, при этом, створ в с. Семиярка, наблюдаем следующие синхронные многоводные годы: 1957-1959, 1969-1973, 1994. Синхронные маловодные годы: 1962-1965, 1967, 1975, 1976, 1978, 1980-1983, 1986, 1991, 2000, 2006, 2008, 2009, 2011, 2012.

Экстремально многоводный год наблюдался на гидропосту р. Ертис – с. Семиярка в 1958 г. Экстремальных маловодных лет не было.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. Давыдов, Л. К. Гидрография СССР. Т.2. [Текст]/ Л. К. Давыдов – Л.: Изд-во ЛГУ, 1955. – 600 с.
6. Мякишева, Н.В. многокритериальная классификация озер [Текст]/ Н.В. Мякишева – Спб.: РГГМУ, 2009 – 159 с.
7. Гоюй, Ч. Определение водных ресурсов районов с интенсивным развитием хозяйственной деятельности (на примере озера Нанси КНР) [Текст]/ Чжан Гоюй – Спб: 2012. – 103 с.