



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

Исследование вероятностной структуры рядов максимальных
расходов воды весеннего половодья с использованием

На тему показателя Хёрста

Исполнитель Вагнер Ксения Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Сикан Александр Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

Консультант _____
(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«10» июня 2022г.

Санкт-Петербург
2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ И КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ	6
1.1 Географическое положение	6
1.2 Рельеф и геологическое строение.....	7
1.3 Почвенный покров	10
1.4 Растительность	11
1.5 Гидрографическая сеть.....	14
1.6 Климат	17
2. КОМПЛЕКСНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЯДОВ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДА РФ	20
2.1 Исходные данные	20
2.2 Оценка значимости линейных трендов	21
2.3 Проверка рядов на однородность	24
2.4 Проверка рядов на случайность.....	27
2.5 Анализ суммарных и разностных интегральных кривых	30
3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЯДОВ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ С ПОМОЩЬЮ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЁРСТА	32
3.1 Эмпирический закон Хёрста	32
3.2 Показатель Хёрста для случайного процесса с независимыми сечениями (белого шума).....	35
3.3 Расчет показателя Хёрста для максимальных расходов рек Северо-Запада РФ	37
3.4 Сравнительный анализ показателя Хёрста.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	42
ПРИЛОЖЕНИЕ А	44
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	46

ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	76

ВВЕДЕНИЕ

В результате изменений климата и возрастающей антропогенной нагрузки на речные водосборы многие гидрологические ряды являются неоднородными и нестационарными.

В настоящее время для проверки рядов на однородность, стационарность и независимость используется целый набор критериев. Для проверки однородности – критерии Стьюдента и Фишера, для оценки выбросов – критерии Диксона и Смирнова-Граббса, для оценки трендов – критерий значимости коэффициента корреляции зависимости $x = f(t)$, для проверки случайности – критерий значимости выборочного коэффициента автокорреляции.

В этой ситуации в качестве универсального критерия может использоваться показатель Хёрста, который позволяет оценить соответствует ряд модели случайной величины или нет.

Опыт показывает, что ряды максимального стока при отсутствии климатических изменений и при отсутствии антропогенного воздействия описываются моделью случайной величины или моделью случайного процесса с независимыми сечениями (белый шум). Исключение составляют только реки, вытекающие из озер и крупные реки с широкой поймой, которая оказывает регулирующее влияние на максимальный сток.

Поскольку показатель Хёрста является характеристикой, в том числе, и трендоустойчивости нестационарные ряды всегда будут иметь показатель Хёрста отличный от показателя Хёрста белого шума.

Цель настоящей работы – оценить возможность использования показателя Хёрста для оценки неоднородности и нестационарности рядов максимальных расходов весеннего половодья на примере рек Северо-Запада РФ.

В связи с этим решались следующие задачи.

- Собрать данные о максимальных расходах рек СЗ РФ за весь период наблюдений, включая последние годы.
- Выполнить проверку рядов на однородность и стационарность с использованием критериев, рекомендуемых действующими нормативными документами.
- Для всех рядов рассчитать показатель Хёрста и оценить возможность его применения в качестве универсального критерия.

Работа состоит из 3 глав введения и заключения.

В первой главе представлено физико-географическое описание района исследований. Дана краткая характеристика климата и оценка его изменения в пределах рассматриваемой территории.

Во второй главе представлен комплексный статистический анализ рядов максимальных расходов весеннего половодья рек Северо-Запада РФ. Он включает себя оценку значимости линейных трендов, проверку рядов на однородность и проверку рядов на случайность.

В третьей главе описывается эмпирический закон Хёрста и его классификация. Представлен расчет показателя Херста для максимальных расходов рек Северо-Запада РФ. Показана возможность использования показателя Херста в качестве универсального критерия для проверки однородности и стационарности гидрологических рядов.

В разделе «Заключение» в краткой форме представлены результаты проведенного исследования.

Работа содержит 13 рисунков, 10 таблиц, 4 приложения и список литературы из 21 наименования. Общий объем работы 81 листов.

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ И КЛИМАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Географическое положение

Рассматриваемая территория расположена на северо-западе Европейской части России и занимает площадь около 400 тыс. км².

В административном отношении она включает Республику Карелию, Ленинградскую, Новгородскую и Псковскую области (рисунок 1.1).

Район имеет протяженную сухопутную границу. Он соседствует с Финляндией, Эстонией, Латвией и Беларусью.



Рисунок 1.1 – Карта района исследований.

1.2 Рельеф и геологическое строение

Рельеф района достаточно разнообразен и связан с его геолого-тектоническим строением (рисунок 1.2). По характеру геологического и геоморфологического строения территория разделяется на две области: Карелию и Северо-Запад.

Карелия в основном характеризуется холмисто-равнинным рельефом с абсолютными отметками, не более 200 м над уровнем моря; на северо-западе и западе отдельные массивы достигают высоты 350-600 м.

С запада и северо-запада местность в большей степени понижается по направлению к трем большим водным бассейнам, где имеются наименьшие абсолютные высоты: у Онежского озера (Восточно-Онежская равнина) – до 40 м; у Белого моря (Прибеломорская низменность) – до 10-20 м; у Ладожского озера (Северное Приладожье и Олонецкая равнина) – до 5-10 м. Рельеф водораздельных пространств между Онежским озером и Белым морем, Онежским и Ладожским озерами спокойный, слабо расчлененный, с небольшими колебаниями относительных высот.

Территория Северо-Запада по характеру рельефа отчетливо разделяется на две части: 1) северо-западную – низменную и 2) восточную, юго-восточную и южную – возвышенную.

Северо-западная часть расположена в пределах Прибалтийской низменности, уходящей на западе на территорию Эстонии и Латвии, а на севере и северо-востоке – в Карелию.

Прибалтийская низменность – довольно однообразная слабоволнистая равнина, на которой четко видно, как выделяется ряд возвышенностей и понижений. Абсолютные отметки поверхности в среднем составляют 50-100 м, однако наиболее значительные возвышенности достигают 200-300 м. К ним относятся: возвышенность в центральной части Карельского перешейка, Силурийское плато в центральной части Ленинградской области, Лужская

возвышенность, расположенная к северо-востоку от города Пскова, Судомская – к югу от городов Порхова и Бежаницкая – к югу от Новоржева.

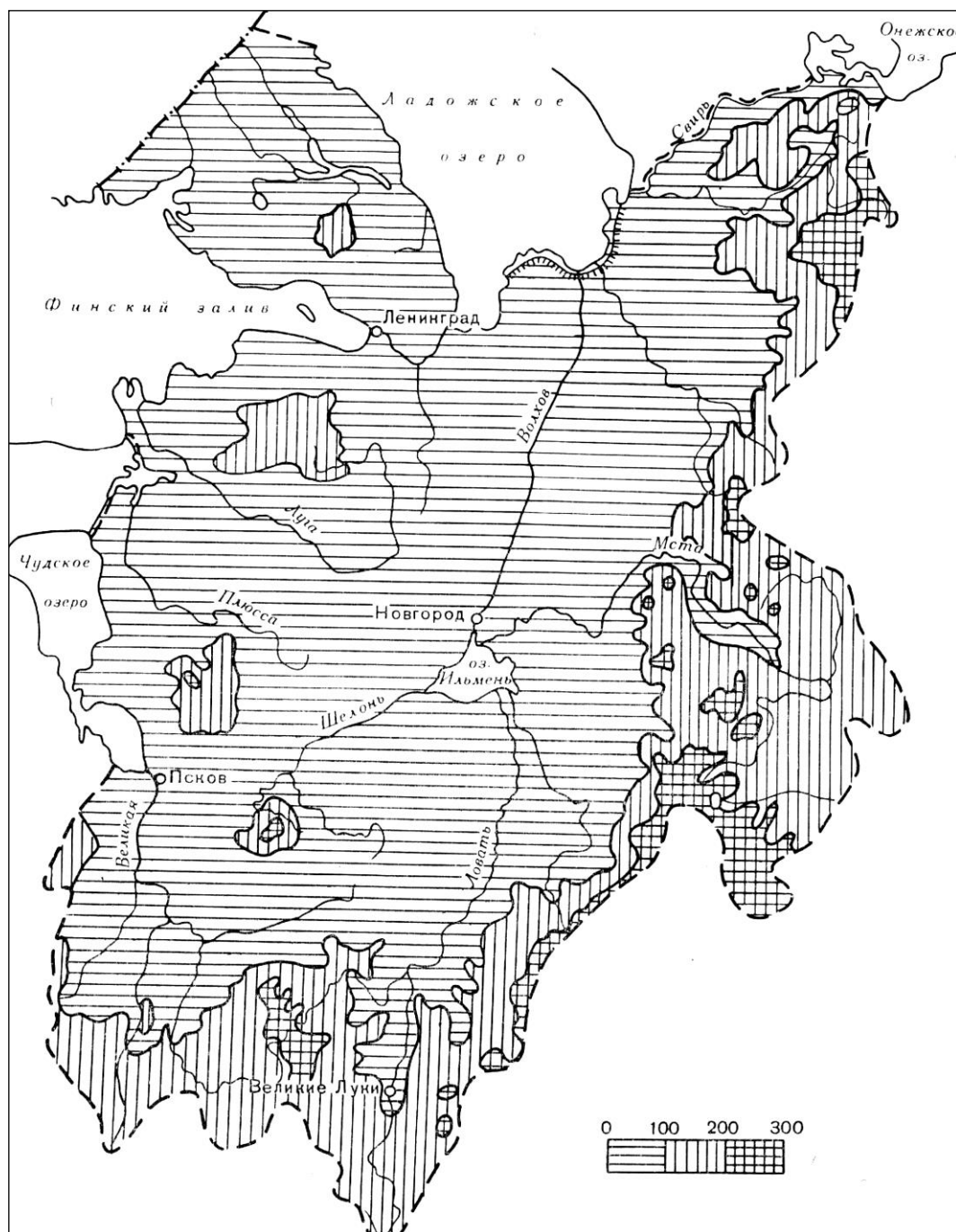


Рисунок 1.2 – Гипсометрическая карта Северо-Запада.

В своё время таявшие ледники, которые несли массы морены, образовали различные гряды и ледниковые холмы. Таяние заполняло все впадины водой, что в дальнейшем поспособствовало формированию множества озёр и болот.

Самые крупные из них это Чудское, Псковское, Ильмень, Валдайское. После отступления ледников большие площади территории превратились в плоские равнины, по которым протекают реки. В конечном итоге, современный рельеф — это совокупность плоских низин и холмисто-моренных участков.

В геологическом отношении территория Карелии является восточной частью Балтийского или Фенноскандинавского кристаллического щита и представляет собой область распространения древнейших кристаллических пород архейско-протерозойского комплекса.

Территория Северо-Запада в отличие от Карелии сложена в основном осадочными породами палеозойского комплекса.

Четвертичные отложения представляют собой сложный комплекс ледниковых отложений, морских песчано-глинистых отложений межледникового и послеледникового времени, озерно-аллювиальных и болотных отложений.

Территория Северо-Запада расположена почти целиком в пределах Русской платформы и сложена комплексом осадочных дочетвертичных отложений, залегающих под четвертичными на архейском или протерозойском кристаллическом основании. Только самая северная окраина территории — север Карельского перешейка — относится к южной оконечности Балтийского щита и сложена древнейшими кристаллическими породами архейско-протерозойского комплекса, представленного различного рода гнейсами и сланцами.

В границах описываемой территории карстовыми процессами затронуты растворимые отложения от нижнего ордовика до среднего карбона. Эти процессы локализуются в двух основных карстовых районах: на Силурийском (Ордовикском) и Карбоновом плато. В состав закарстованных пород входят доломиты, известняки, мергели, гипсы, соленосно-карбонатные породы.

1.3 Почвенный покров

Главными процессами на территории являются подзолообразование и заболачивание. Они обуславливаются холодным климатом, обильным увлажнением и в основном хвойными лесами.

Почвообразующей породой в северной части являются ледниковые наносы, которые являются в большей степени неоднородными, грубые по механическому составу; в южной части моренные отложения имеют разный состав – от песков до глин, что и определяет различие в механическом составе почв.

На 50% почвенный покров состоит из подзолов, подзолисто-глеевых, подзолистых (рисунок 1.3) и глееподзолистых почв, около 10% захватывают дерново-подзолистые почвы и дерново-подзолы иллювиально-железистые. Более 12% приходится на болотные почвы. Свыше 10% территории округа — это тундровые, арктотундровые, арктические почвы и криогенные комплексы.



Рисунок 1.3 – Подзолистые почвы.

Высокая влажность, заболоченность земель, малое количество органики в грунте в сочетании с холодным климатом сделали выращивание сельхозпродукции в областях Северо-Западного района сложным процессом.

Поддержание оптимальной температуры является обязательным для содержания различных культур, а также внедрение в почву различных удобрений.

Влагонасыщенность почв за теплый период сначала уменьшается и в июле-августе падает до самой низкой отметки. Затем начинается повышение влажности почвы из-за увеличения количества осадков и одновременно уменьшение потерь влаги на испарение и транспирацию.

1.4 Растительность

Северо-Западный район расположен в лесной зоне. По виду растительности его территория делится на две подзоны: хвойных лесов - к северу от Пскова и смешанных лесов - на юг от этого города (рисунок 1.5).

Севернее Пскова преобладают сосново-еловые массивы, местами заболоченные, с примесью березы, ольхи и осины. На низинных и переходных участках развиты лугово-болотные растения. Среди сосняков доминируют верещатники и брусничники, среди ельников - черничники и брусничники.

В подзоне смешанных лесов больше всего встречаются хвойно-широколиственные массивы, где к хвойным породам в значительном количестве примешаны липа, дуб, ясень, клен, ольха (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Флора Северо-Запада РФ.

На песчаных почвах распространены сосновые боры. На склонах речных долин и на водоразделах имеются небольшие участки дубняков. Для зоны типичны болота, облесенные сосной. Кустарниковый покров развит в просветах древостоя.

На открытых местах наиболее распространены ольха, можжевельник, ива всех видов, реже черемуха, жимолость, калина, рябина, крушина, бузина, орешник. Большие территории заняты сенокосными и пастбищными угодьями, где преобладает злаково-разнотравный и осоко-разнотравный покров. К сожалению, в травостое слишком мало бобовых растений, наиболее ценных для пчеловодства.

Растительный покров Северо-Запада значительно меняется. Сейчас более двух пятых территории занято сельскохозяйственными угодьями, одна пятая - болотами, остальные площади - лесами и кустарниками.

С течением времени тип растительности края несколько изменился – хвойные деревья потеснены лиственными, и на месте вырубленных или уничтоженных пожаром ельников появляются берзовые и осиновые леса,

заросли ольхи. По побережью Финского залива, река Волхову и Луге встречаются небольшие дубравы.

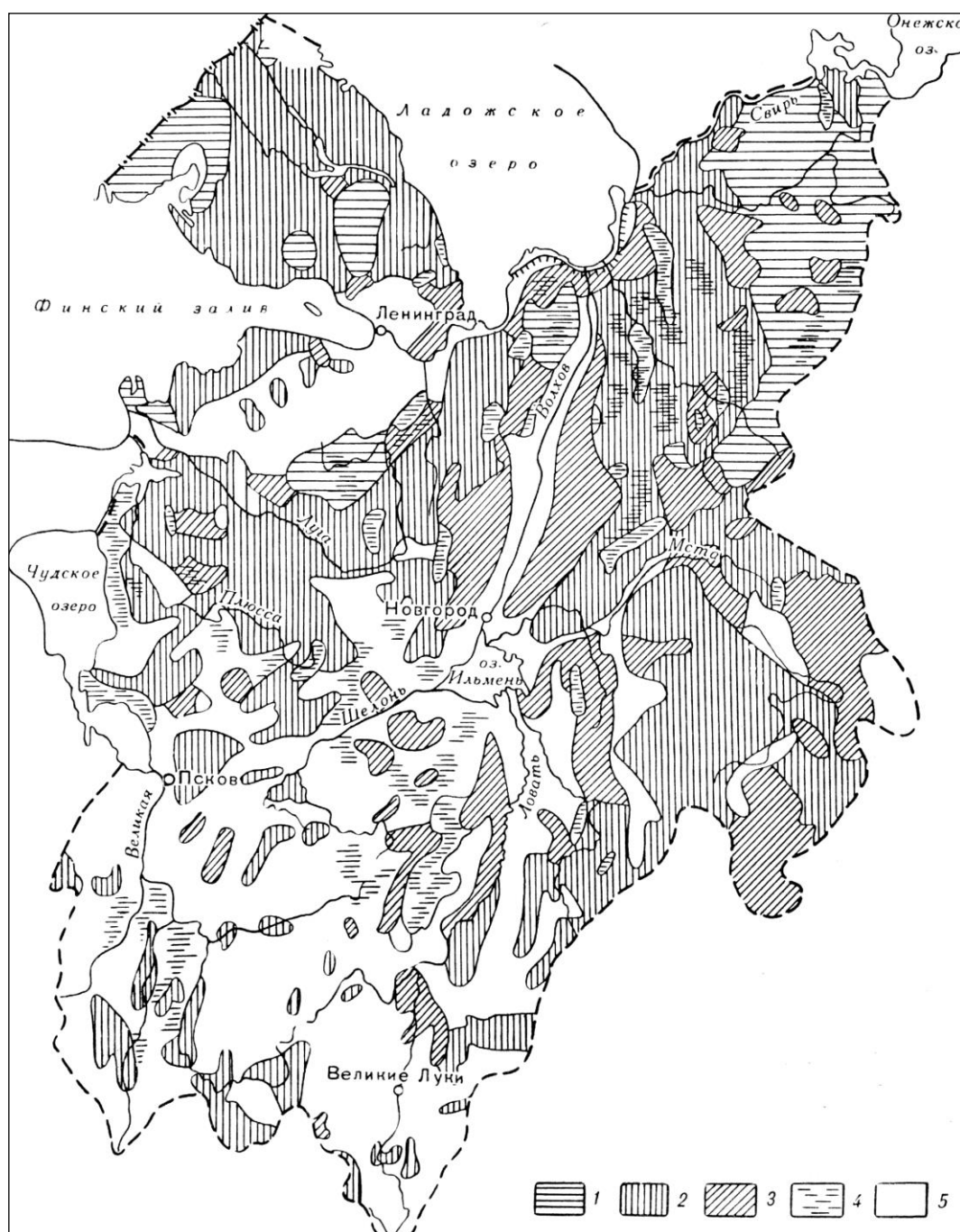


Рисунок 1.5 – Схематическая карта растительного покрова Северо-Запада.

1 – еловые леса, 2 – сосновые леса, 3 – березовые и осиновые леса, 4 – леса на болотах, 5 – сельскохозяйственные земли.

1.5 Гидрографическая сеть

Водные ресурсы округа представлены речной сетью протяжённостью около 1 177,04 тыс. км, озёрами и искусственными водоёмами площадью около 83,22 тыс. км², болотами и заболоченными землями общей площадью 256 817 км². Среди федеральных округов России Северо-Западный федеральный округ занимает первое место по густоте речной сети, второе место по озёрности территории после Сибирского и по заболоченности территорий после Уральского федерального округа; третье место по протяжённости речной сети, а также по площади озёр и искусственных водоёмов после Сибирского и Дальневосточного федеральных округов.

На территории Северо-Западного федерального округа расположены бассейны девяти крупнейших рек России – Северной Двины, Печоры, Невы, Мезени, Онеги, Нарвы, Немана и крайне незначительные части бассейнов Верхней Волги и Оби. Главной водной артерией района является р. Нева с площадью водосбора 281 000 км², значительная часть которой расположена на территории Карелии. Собственный бассейн р. Невы 5000 км², что составляет 1,8% общей площади водосбора.

Густота речной сети ее притоков колеблется от 0,70 (р. Мга) до 1,29 км/км² (р. Охта).

Гидрографической особенностью региона является большое количество болот, которые засыпаны, а в ближайших округах создают необычные пейзажи. Болота подразделяются на верховые с безлесной поверхностью или разреженными сосновыми насаждениями, практически без воды, и низинные травянисто-камышовые с редкими деревьями и большими пространствами воды. Как и озера, болота имеют большое значение в регулировании водного баланса. Гидрографическая среда широко освоена в хозяйственном отношении: построено много ГЭС, большое количество запруд и плотин с прудами и воохранилищами, многие реки судоходны. Практически все водоемы используются для водоснабжения и в технических целях. Некоторое количество

очистных сооружений в городах и поселках являются причиной загрязнения водоемов, что создает сложные экологические ситуации.

Большая часть рек Северо-Запада берет начало на главном водоразделе между Балтийским и Каспийским морями, который проходит по Валдайской возвышенности и Вепсовской возвышенности. Второй водораздел тянется с юга на север по Вязовской, Бежаницкой и Судомской возвышенностям и далее по повышенным точкам рельефа к западу от р. Волхова. Этот водораздел внутренний и разделяет бассейны рек, впадающих в Балтийское море. На нем находятся истоки рек Великой и Луги. Почти все реки по своему типу относятся к равнинным.

Рельеф так же сильно повлиял на особенности гидрографической сети Карелии. На значительной ее части реки прокладывают свой путь в направлении с северо-запада на юго-восток; так же ориентирована большая часть озер. Более крупные реки в северной части территории текут преимущественно в широтном, в южной – в меридиональном направлении. Гидрографическая сеть Карелии и Карельского перешейка представлена большей частью либо небольшими реками, либо короткими протоками, которые, соединяя между собой многочисленные озера, образуют отдельные озерно-речные системы. Геологически реки Карелии и Карельского перешейка очень молоды.

Прибалтийская низменность пересечена густой сетью рек, расходящейся в различных направлениях. Долины рек, как правило, врезаны неглубоко и лишь при пересечении склонов водораздельных возвышенностей они врезаются на глубину от 20 до 40 м и иногда до 50 м. Характерно развитие болот в низинах и на плоских междуречных пространствах.

В данной местности насчитывается 82503 озера с общей площадью 50062 км²; 80396 озер (97% общего числа) имеют площадь менее 1 км². Наряду с большим количеством мелких здесь расположены такие крупные озера, как Ладожское и Онежское, занимающие по площади первое и второе места в

Европе. Площадь зеркала этих озер равна 27420 км², что составляет 55% общей площади зеркала озер этой территории.

Распределение озер по территории Карелии и Северо-Запада неравномерное и обусловлено, в основном, геолого-геоморфологическим строением поверхности.

Одним из факторов, играющих существенную роль в формировании речного стока в бассейнах рек Карелии и Северо-Запада, являются подземные воды (таблица 1.1). Для данной территории характерно значительное развитие речной сети, что активизирует подземный сток в зоне интенсивного водообмена.

Таблица 1.1 – Подземный сток рек Северо-Запада

Река — пункт	Площадь водосбора, км ²	Модуль среднегодового общего стока, л/сек км ²	Подземный сток		Река — пункт	Площадь водосбора, км ²	Модуль среднегодового общего стока, л/сек км ²	Подземный сток	
			модуль, л/сек км ²	в % от общего				модуль, л/сек км ²	в % от общего
Перовка — пос. Гончарово	257	10,7	1,9	18	Полометь — д. Яжелбицы	631	10,9	2,8	35
Мга — д. Горы	709	(7,3)	2,0	27	Ловать — г. Великие Луки	3 270	6,4	2,2	54
Охта — д. Новое Деякин	340	(8,3)	2,5	30	Ловать — г. Холм	14 700	7,2	1,5	21
Оять — д. Шангиничи	4 930	10,5	2,4	23	Шелонь — д. Заполье	6 820	6,4	1,0	16
Паша — с. Часовенское	5 710	10,4	2,2	21	Луга — ст. Толмачево	5 990	7,4	2,6	35
Сясь — д. Яхново	6 230	8,4	2,0	24	Систа — д. Среднее Райково	573	11,4	3,7	32
Тихвинка — д. Горелуха	2 070	9,3	2,6	28	Оредеж — пгт Вырица	659	11,6	5,5	47
Кересть — д. Сябренницы	833	7,2	0,76	11	Плюсса — г. Сланцы	6 340	7,9	3,1	39
Пчевжа — д. Белая	1 690	7,2	1,8	25	Великая — д. Пятоново	20 200	6,2	1,8	28
Мста — пос. Потерпелицы	12 200	8,9	2,5	28	Утроя — д. Большая Губа	2 970	5,8	1,7	29
Мста — д. Девкино	22 500	8,9	2,6	29					
Веребушка (Веребья) — с. Оксочи	90,3	8,8	2,0	20					

Подземные воды на территории Карелии заключены в породах кристаллического фундамента и перекрывающей их толще четвертичных отложений. В рыхлых отложениях четвертичного возраста и в зоне выветривания древних пород развит комплекс безнапорных, реже слабо-напорных подземных вод, уровень которых располагается на глубине 0-2 м в понижениях рельефа и может достигать глубины 100 м под вершинами гор.

Большая часть территории Ленинградской, Псковской и Новгородской областей входит в Ленинградский артезианский бассейн, сложенный главным образом палеозойскими терригенными и карбонатными осадками. Основным

источником подземного питания рек описываемой территории являются грунтовые воды, часто гидравлически связанные с рекой, и напорные подземные воды.

1.6 Климат

Климат Северо-Западного Федерального округа — умеренно континентальный и субарктический. На климат сильно влияет география региона: его омывают моря Северного Ледовитого и Атлантического океанов, поэтому на северо-западе округа зима теплее, чем обычно в этих широтах, а лето холоднее.

Огромные массы тепла, поступающие с атлантическим воздухом, и влияние Нордкапской ветви теплого течения Гольфстрим, вызывают характерную положительную температурную аномалию (средние температуры воздуха здесь выше средних для данных широт).

На большей части территории Северо-Западного федерального округа годовые суммы осадков более чем на 100 мм превышают возможное испарение. В Псковской и Новгородской областях, на юге Ленинградской области, а также на большей части республики Коми разность годовых сумм осадков и годовой суммы испаряемости составляет почти 300 мм. По показателю увлажнения вся территория района входит в зону избыточного увлажнения

Частая смена воздушных масс, а также циклоны объясняют типичную для региона неустойчивую погоду. Особенно резкие и частые изменения погоды характерны прилегающим к Балтийскому морю районам, северному и восточному побережью Кольского полуострова, а в переходные сезоны также и Архангельскому Северу.

Абсолютный минимум температур -55°C зафиксирован в Ижме и Усть-Щугоре. Средние июльские температуры в материковой части изменяются от $+18, +19^{\circ}\text{C}$ на юге, до $+8^{\circ}\text{C}$ на северо-востоке. Более низкие температуры июля

наблюдаются на островах Новой Земли ($+5^{\circ}\text{C}$) и на Земле Франца-Иосифа (0°C).

Безморозный период длится от 58 дней на северо-востоке республики Коми, до 140 дней на юге Псковской области.

Дожди и снегопады бывают часто, до 160-200 дней в году. В целом дожди преобладают обложные, морозящие. Хотя чаще всего осадки выпадают осенью и зимой, но большая их часть приходится на теплый период года.

Среднегодовая температура воздуха в Санкт-Петербурге составляет 5°C , в западных районах области $3,8-5^{\circ}\text{C}$, в восточных районах $2,7-3,5^{\circ}\text{C}$; [4]

Среднее многолетнее число дней в году со среднесуточной температурой выше 0°C в Санкт-Петербурге составляет 232 дня;

Средняя дата перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C в сторону положительных значений весной – 29 марта (по области 4-9 апреля), в сторону отрицательных значений осенью – 17 ноября (по области 12-14 ноября);

Самый холодный месяц – февраль со средней температурой от $-8,0^{\circ}\text{C}$ до $-8,5^{\circ}\text{C}$;

Самый теплый месяц – июль со средней температурой от $17,4^{\circ}\text{C}$ до $18,0^{\circ}\text{C}$ (рисунок 1.6).

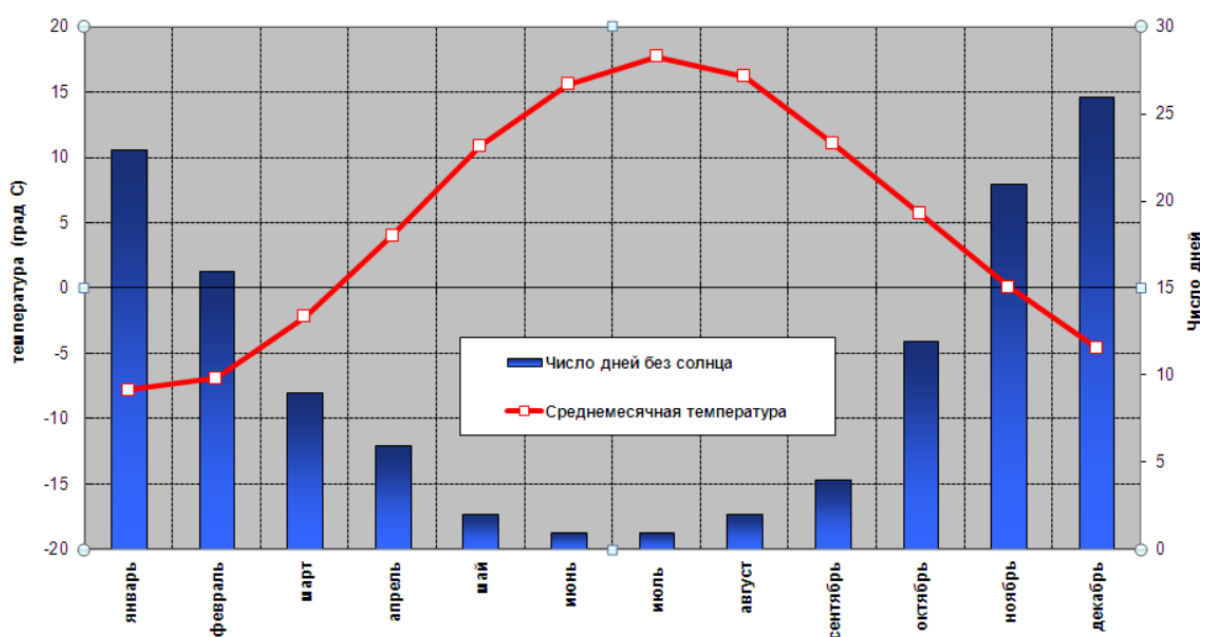


Рисунок 1.6 – Средние многолетние данные о температуре воздуха и числе пасмурных дней в Санкт-Петербурге.

Как было показано в работе [11], «в настоящее время на всей территории Северо-Запада наблюдается увеличение среднегодовой температуры воздуха главным образом за счет увеличения температуры воздуха за холодный период года. Заметное потепление началось в конце 80-х годов XX века» (рисунок 1.7).

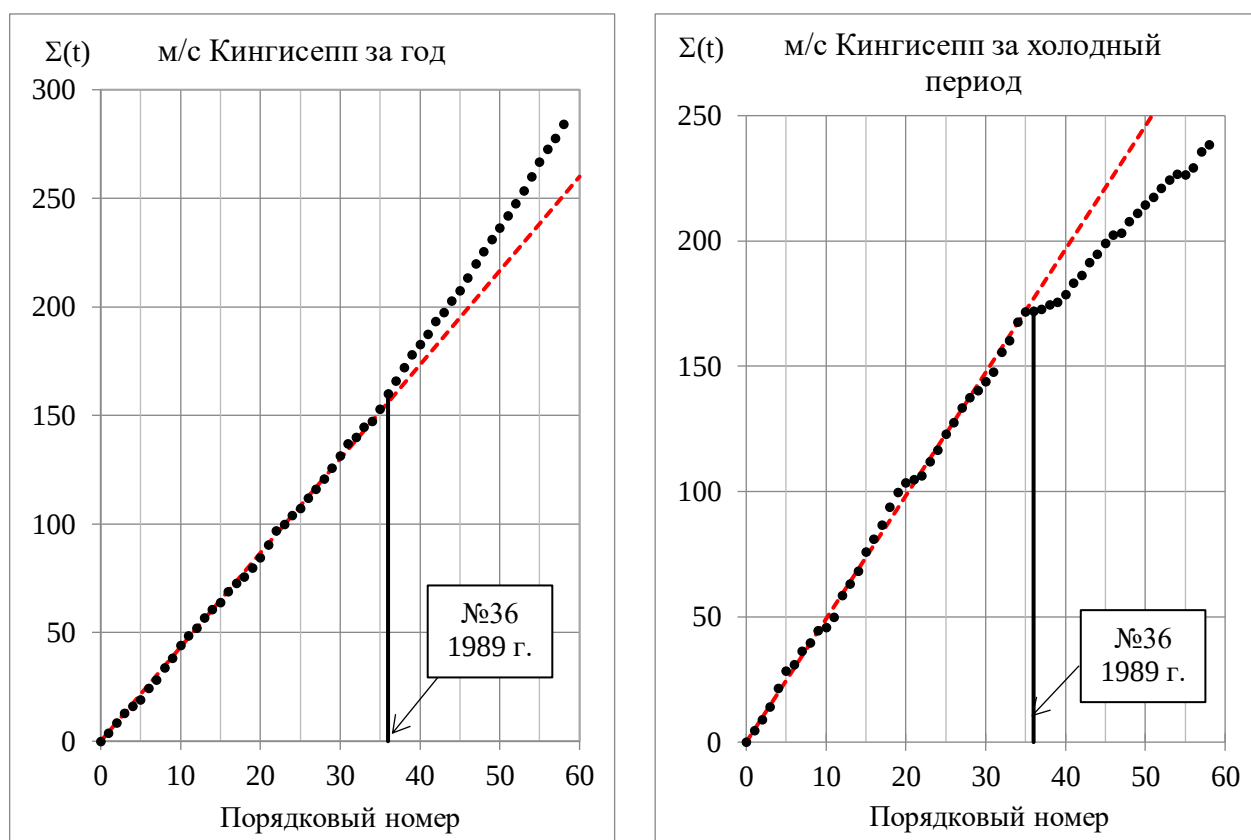


Рисунок 1.7 – Интегральные кривые среднегодовых температур воздуха для метеостанции Кингисепп за год и холодный периоды.

«На севере, востоке и юге наблюдается значимый тренд на увеличение осадков за холодный период. Наибольшее приращение осадков отмечается на востоке территории. Выявленные изменения климата привели к изменениям в рядах речного стока».

2. КОМПЛЕКСНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЯДОВ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ РЕК СЕВЕРО-ЗАПАДА РФ

2.1 Исходные данные

В качестве исходных данных использовались ряды максимальных расходов воды весеннего половодья рек Северо-Запада России. В общей сложности проанализировано 62 ряда. Распределение рядов по грациям площадей водосбора представлено в таблице 2.1, по продолжительности наблюдений – в таблице 2.2. Схема расположения постов показана на рисунке 2.1.

Таблица 2.1 – Распределение постов по грациям площадей водосборов

Диапазон площадей водосборов	$F < 200$	$200 < F \leq 1000$	$1000 < F \leq 5000$	$5000 < F \leq 20000$	$F > 20000$
Количество	4	30	17	9	2

Таблица 2.2 – Распределение постов по продолжительности рядов наблюдений

Продолжительность рядов, n	$n \leq 60$	$60 < n \leq 80$	$80 < n \leq 100$	$n > 100$	Всего
Количество	3	40	17	2	62
%	4,88	64,5	27,4	3,22	100

Как видно из таблицы 2.2, 95% рядов имеют продолжительность более 60 лет.

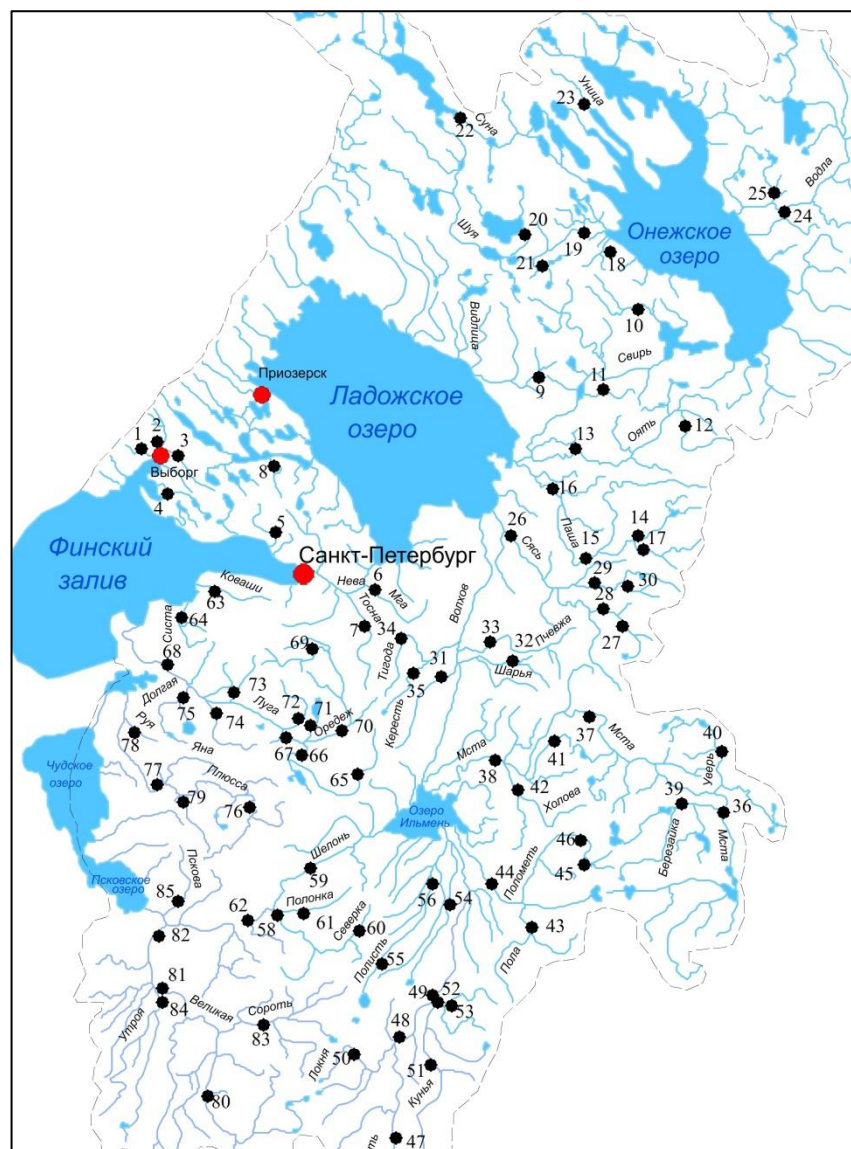


Рисунок 2.1 – Схема расположения гидрологических постов.

2.2 Оценка значимости линейных трендов

Трендом называется плавное и устойчивое изменение уровня явления во времени. Проверка значимости линейных трендов в рядах гидрологических характеристик выполнялась с использованием критерия значимости коэффициента корреляции для зависимости $x = f(t)$, где x – значение исследуемой характеристики в i -том году; t – время (годы).

Тренд считался незначимым, если выполнялось условие:

$$\frac{|R|}{\sigma_R} < t_{2\alpha} , \quad (2.1)$$

где $t_{2\alpha}$ – нормированная ордината распределения Стьюдента при уровне значимости 2α и числе степеней свободы $\nu = n - 2$.

σ_R – стандартная ошибка коэффициента корреляции, определяемая по формуле:

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{1 - R^2}}{\sqrt{n - 2}}. \quad (2.2)$$

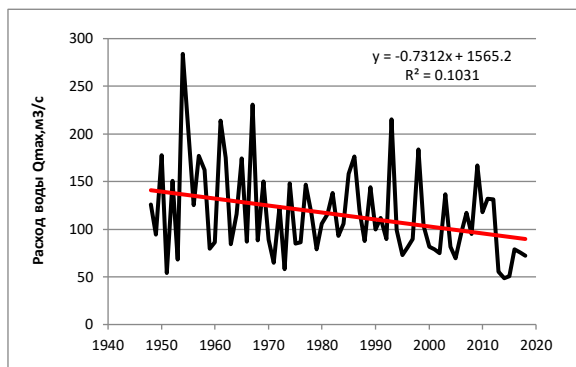
Хронологические графики максимальных расходов весеннего половодья представлены в приложении Б. Результаты проверки рядов на значимость тренда представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты проверки рядов максимальных расходов весеннего половодья рек Северо-Запада РФ на значимость тренда.

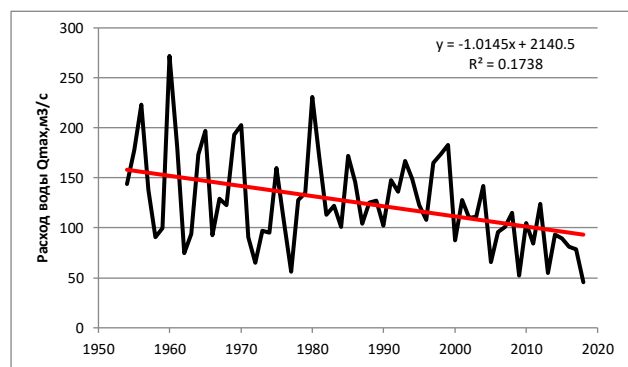
№	Река - Створ	n	R ²	R	s _R	R/s _R	t _{2α}	H ₀ : R = 0
1	Авлога - Матокса	65	0,10	0,31	0,12	2,58	2,00	опроверг
2	Большой тудер - Бабяхтино	74	0,06	0,25	0,11	2,22	1,99	опроверг
4	Великая - Гуйтово	75	0,15	0,39	0,11	3,64	1,99	опроверг
3	Великая - Опочка	70	0,10	0,32	0,11	2,80	2,00	опроверг
5	Великая - Пятаново	85	0,13	0,36	0,10	3,51	1,99	опроверг
6	Видлица - Большие Горы	84	0,04	0,19	0,11	1,77	1,99	не опров
7	Воложба - Воложба	79	0,00	0,04	0,11	0,36	1,99	не опров
8	Воложба - Пареево	68	0,05	0,23	0,12	1,95	2,00	не опров
9	Вьюн - Запорожское	65	0,04	0,21	0,12	1,67	2,00	не опров
10	Гороховка - Токарево	71	0,02	0,14	0,12	1,19	1,99	не опров
11	Дымка - Долмачево	71	0,03	0,17	0,12	1,40	1,99	не опров
12	Ивина - Ладва	65	0,17	0,42	0,11	3,64	2,00	опроверг
13	Капша - Еремина Гора	66	0,00	0,07	0,12	0,54	2,00	не опров
14	Кересть - Сябраницы	76	0,00	0,07	0,12	0,58	1,99	не опров
15	Коваши - Лендовщина	66	0,06	0,24	0,12	1,98	2,00	не опров
16	Кудеб - Севериково	68	0,26	0,51	0,11	4,78	2,00	опроверг
17	Кунья - Уварово	57	0,12	0,35	0,13	2,73	2,00	опроверг
18	Кунья - Холм	65	0,04	0,20	0,12	1,59	2,00	не опров
20	Ловать - Великие Луки	84	0,15	0,39	0,10	3,83	1,99	опроверг
21	Ловать - Узкое	75	0,15	0,38	0,11	3,55	1,99	опроверг
19	Ловать - Холм	98	0,08	0,29	0,10	2,97	1,98	опроверг
22	Локня - Бородино	62	0,24	0,49	0,11	4,36	2,00	опроверг
23	Лососинка - Петрозаводск	59	0,16	0,40	0,12	3,32	2,00	опроверг
24	Луга - Кингисепп	76	0,11	0,34	0,11	3,08	1,99	опроверг
25	Луга - Луга	81	0,03	0,16	0,11	1,49	1,99	не опров
26	Луга - Толмачево	100	0,15	0,38	0,09	4,11	1,98	опроверг
27	Мга - Горы	82	0,02	0,13	0,11	1,17	1,99	не опров
28	Мерега - Куйтежа	71	0,04	0,21	0,12	1,75	1,99	не опров

№	Река - Створ	n	R ²	R	S _R	R/S _R	t _{2a}	H ₀ : R = 0
29	Мста - Девкино	86	0,05	0,22	0,11	2,08	1,99	опроверг
30	Мста - Потерпелицы	68	0,02	0,14	0,12	1,16	2,00	не опров
31	Нева - Новосаратовка	160	0,00	0,00	0,08	0,06	1,98	не опров
32	Немина - Немино	62	0,10	0,31	0,12	2,52	2,00	опроверг
33	Оредеж - Вырица	81	0,01	0,07	0,11	0,66	1,99	не опров
34	Орлинка - Орлинка	66	0,09	0,30	0,12	2,55	2,00	опроверг
35	Охта - Новое Девяткино	75	0,09	0,30	0,11	2,72	1,99	опроверг
36	Оять - Мининская	74	0,00	0,07	0,12	0,57	1,99	не опров
37	Оять - Шангиничи (Акулова гора)	77	0,03	0,19	0,11	1,64	1,99	не опров
38	Паша - Дуброво	85	0,00	0,02	0,11	0,16	1,99	не опров
39	Паша - Часовенское	85	0,01	0,09	0,11	0,81	1,99	не опров
40	Перехода - Подсосонье	73	0,14	0,38	0,11	3,46	1,99	опроверг
41	Перовка - Гончарово	71	0,16	0,4	0,11	3,65	1,99	опроверг
42	Петровка - Дружноселье	70	0,27	0,52	0,10	5,00	2,00	опроверг
43	Плюсса - Брод	81	0,07	0,27	0,11	2,53	1,99	опроверг
44	Плюсса - Плюсса	81	0,12	0,35	0,11	3,29	1,99	опроверг
45	Пола - Налючи	70	0,01	0,12	0,12	0,99	2,00	не опров
46	Пчевжа - Белая	77	0,06	0,25	0,11	2,28	1,99	опроверг
47	Пяльма - Пяльма	67	0,07	0,26	0,12	2,17	2,00	опроверг
48	Рагнукса - Харловская	64	0,11	0,33	0,12	2,74	2,00	опроверг
49	Систа - Среднее райково	74	0,11	0,33	0,11	3,00	1,99	опроверг
50	Ситня - Пески	65	0,11	0,33	0,12	2,79	2,00	опроверг
51	Сороть - Осинкино	87	0,18	0,42	0,10	4,27	1,99	опроверг
52	Тигода - Любань	75	0,04	0,21	0,11	1,85	1,99	не опров
53	Тихвинка - Горелуха	138	0,07	0,26	0,08	3,09	1,98	опроверг
54	Тосна - Тосно	75	0,01	0,10	0,12	0,84	1,99	не опров
55	Уверь - Меглецы	83	0,01	0,10	0,11	0,91	1,99	не опров
56	Уза - Дубская	72	0,28	0,53	0,10	5,27	1,99	опроверг
57	Уница - Уница	70	0,00	0,04	0,12	0,31	2,00	не опров
58	Утроя - Б. Губа	81	0,24	0,49	0,10	5,03	1,99	опроверг
59	Цна - Жилотково	58	0,01	0,08	0,13	0,59	2,00	не опров
60	Шелонь - Порхов	64	0,08	0,28	0,12	2,28	2,00	опроверг
61	Шуя - Бесовец	84	0,00	0,05	0,11	0,43	1,99	не опров
62	Ящера - Долговка	68	0,07	0,26	0,12	2,21	2,00	опроверг

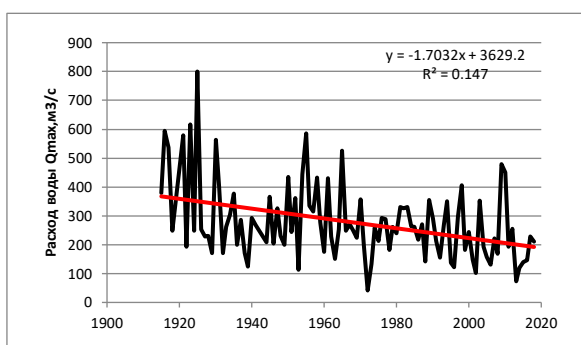
Как видно из таблицы 2.1, из 62 рядов 35 имеют значимый тренд (на понижение), что составляет 56% от общего числа рядов. Примеры рядов со значимым трендом представлены на рисунке 2.2.



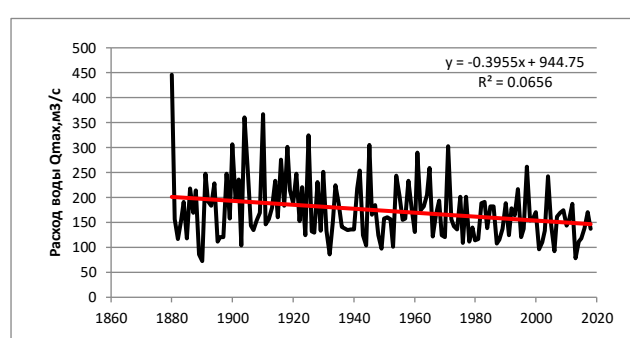
Великая - Опочка



Ивина - Ладва



Луга - Толмачево



Тихвинка - Горелуха

Рисунок 2.2 – Хронологические графики максимальных расходов весеннего половодья со значимым трендом.

2.3 Проверка рядов на однородность

Оценку однородности рядов гидрологических наблюдений осуществляют на основе генетического и статистического анализов исходных данных наблюдений. Определение расчетных гидрологических характеристик производят по данным за весь период наблюдений.

Определение однородности рядов осуществлялось с помощью двух критериев Стьюдента и Фишера.

Критерий Фишера позволяет оценить однородность ряда по дисперсии. Эмпирическое значение статистике Фишера рассчитывалось по формуле:

$$F^* = \frac{D_1^*}{D_2^*} \quad (2.3)$$

где D_1^* и D_2^* – дисперсии по первой и второй частям анализируемого ряда, при этом в качестве первой дисперсии обычно рассматривают ту, которая больше ($D_1^* \geq D_2^*$).

Критическое значение статистики Фишера рекомендуется определять по таблицам, опубликованным в [9], в зависимости от числа степеней свободы $\nu_1 = n_1 - 1$, $\nu_2 = n_2 - 1$ при уровне значимости $2\alpha = 5\%$ (n_1 и n_2 – длина первой и второй частей ряда).

Гипотеза об однородности рядов не опровергалась, если выполнялись условие:

$$F^* < F_{2\alpha} \quad (2.4)$$

Критерий Стьюдента позволяет оценить однородность ряда по среднему значению. Эмпирическое значение Статистика Стьюдента рассчитывалось по формуле:

$$t^* = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{S} \sqrt{\frac{mn}{m+n}} \quad (2.5)$$

$\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ – средние значения по первой и второй частям анализируемого ряда;

σ_1 и σ_2 – среднеквадратические отклонения по первой и второй частям ряда;

S – стандартное отклонение объединенного ряда, определяемое по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2.6)$$

Критическое значение статистики Стьюдента рекомендуется определять по таблицам, опубликованным в [9], в зависимости от числа степеней свободы $\nu = n_1 + n_2 - 2$ при уровне значимости $2\alpha = 5\%$.

Гипотеза об однородности рядов не опровергалась, если выполнялись условие:

$$|t^*| < t_{2\alpha} \quad (2.7)$$

В настоящей работе проверка однородности проводилась с использованием пакета анализа MS Excel. Результаты проверки представлены в таблице 2.2 и в обобщенном виде – в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Результаты проверки рядов максимальных расходов весеннего половодья на однородность

№	Река - Створ	n	Статистика Стьюдента			Статистика Фишера		
			t*	t _{2α}	H ₀ : Q ₁ = Q ₂	F*	F _{2α}	H ₀ : D ₁ = D ₂
1	Авлога - Матокса	65	0,48	2,00	не опроверг	1,34	2,04	не опроверг
2	Большой тудер - Бабяhtiно	74	1,58	1,99	не опроверг	1,31	1,94	не опроверг
4	Великая - Гуйтово	75	2,41	1,99	опровер	2,62	1,93	опровер
3	Великая - Опочка	70	1,70	2,00	не опроверг	1,76	1,98	не опроверг
5	Великая - Пятаново	85	2,76	1,99	опровер	3,07	1,85	опровер
6	Видлица - Большие Горы	84	-2,37	1,99	опровер	1,26	1,86	не опроверг
7	Воложба - Воложба	79	0,43	1,99	не опроверг	1,19	1,90	не опроверг
8	Воложба - Пареево	68	-2,10	2,00	опровер	2,72	2,00	опровер
9	Вьун - Запорожское	65	0,91	2,00	не опроверг	5,22	2,04	опровер
10	Гороховка - Токарево	71	1,35	1,99	не опроверг	1,82	1,97	не опроверг
11	Дымка - Долмачево	71	2,07	1,99	опровер	1,98	1,97	опровер
12	Ивина - Ладва	65	2,50	2,00	опровер	2,17	2,04	опровер
13	Капша - Еремина Гора	66	-0,083	2,00	не опроверг	2,31	2,02	опровер
14	Кересть - Сябраницы	76	0,43	1,99	не опроверг	2,82	1,92	опровер
15	Коваши - Лендовщина	66	0,74	2,00	не опроверг	3,44	2,02	опровер
16	Кудеб - Севериково	68	3,31	2,00	опровер	7,61	2,00	опровер
17	Кунья - Уварово	57	1,45	2,00	не опроверг	1,79	2,15	не опроверг
18	Кунья - Холм	65	0,65	2,00	не опроверг	1,26	2,03	не опроверг
19	Ловать - Великие Луки	84	2,87	1,99	опровер	2,90	1,86	опровер
21	Ловать - Узкое	75	2,25	1,99	опровер	1,89	1,94	не опроверг
20	Ловать - Холм	98	3,34	1,98	опровер	1,39	1,77	не опроверг
22	Локня - Бородино	62	2,57	2,00	опровер	3,13	2,07	опровер
23	Лососинка - Петрозаводск	59	-4,04	2,00	опровер	1,18	2,11	не опроверг
24	Луга - Кингисепп	76	2,09	1,99	опровер	1,08	1,92	не опроверг
25	Луга - Луга	81	1,03	1,99	не опроверг	1,05	1,89	не опроверг
26	Луга - Толмачево	100	3,57	1,98	опровер	2,51	1,76	опровер
27	Мга - Горы	82	-0,38	1,99	не опроверг	1,08	1,88	не опроверг
28	Мерега - Куйтежа	71	1,05	1,99	не опроверг	2,03	1,97	опровер
29	Мста - Девкино	86	2,08	1,99	опровер	1,68	1,85	не опроверг
30	Мста - Потерпелицы	68	0,16	2,00	не опроверг	1,44	2,00	не опроверг
31	Нева - Новосаратовка	160	0,85	1,98	не опроверг	1,25	1,56	не опроверг
32	Немина - Немино	62	1,53	2,00	не опроверг	1,24	2,07	не опроверг
33	Оредеж - Вырица	81	-0,31	1,99	не опроверг	3,93	1,88	опровер
34	Орлинка - Орлинка	66	1,72	2,00	не опроверг	1,41	2,02	не опроверг
35	Охта - Новое Девяткино	75	3,62	1,99	опровер	2,66	1,94	опровер
36	Оять - Мининская	74	-1,40	1,99	не опроверг	1,93	1,94	не опроверг
37	Оять - Шангиничи (Акулова гора)	77	-1,65	1,99	не опроверг	1,16	1,92	не опроверг

№	Река - Створ	n	Статистика Стьюдента			Статистика Фишера		
			t*	t _{2α}	H ₀ : Q ₁ = Q ₂	F*	F _{2α}	H ₀ : D ₁ = D ₂
38	Паша - Дуброво	85	-0,78	1,99	не опроверг	1,10	1,86	не опроверг
39	Паша - Часовенское	85	-0,75	1,99	не опроверг	1,03	1,86	не опроверг
40	Перехода - Подсосонье	73	2,54	1,99	опровер	3,12	1,95	опровер
41	Перовка - Гончарово	71	2,76	1,99	опровер	3,78	1,97	опровер
42	Петровка - Дружноселье	70	3,89	2,00	опровер	2,44	1,98	опровер
43	Плюсса - Брод	81	1,95	1,99	не опроверг	1,81	1,89	не опроверг
44	Плюсса - Плюсса	81	2,71	1,99	опровер	3,00	1,89	опровер
45	Пола - Налючи	70	0,69	2,00	не опроверг	1,30	1,98	не опроверг
46	Пчевжа - Белая	77	2,89	1,99	опровер	6,51	1,92	опровер
47	Пяльма - Пяльма	67	1,80	2,00	не опроверг	1,36	2,02	не опроверг
48	Рагнукса - Харловская	64	1,46	2,00	не опроверг	1,79	2,05	не опроверг
49	Систа - Среднее райково	74	2,27	1,09	опровер	2,93	1,94	опровер
50	Ситня - Пески	65	1,84	2,00	не опроверг	1,98	2,04	не опроверг
51	Сороть - Осинкино	87	2,69	1,99	опровер	2,31	1,84	опровер
52	Тигода - Любань	75	2,07	1,99	опровер	1,71	1,94	не опроверг
53	Тихвинка - Горелуха	138	2,43	1,98	опровер	2,49	1,62	опровер
54	Тосна - Тосно	75	0,66	1,99	не опроверг	1,42	1,94	не опроверг
55	Уверь - Меглецы	83	-0,47	1,99	не опроверг	1,36	1,87	не опроверг
56	Уза - Дубская	72	4,35	1,99	опровер	13,9	1,97	опровер
57	Уница - Уница	70	-0,16	2,00	не опроверг	1,95	1,98	не опроверг
58	Утроя - Б. Губа	81	3,45	1,99	опровер	3,31	1,89	опровер
59	Цна - Жилотково	58	0,22	2,00	не опроверг	2,01	2,13	не опроверг
60	Шелонь - Порхов	64	1,36	2,00	не опроверг	1,42	2,05	не опроверг
61	Шуя - Бесовец	84	0,40	1,99	не опроверг	1,85	1,86	не опроверг
62	Ящера - Долговка	68	1,97	2,00	не опроверг	1,65	2,00	не опроверг

Таблица 2.3 Число случаев опровержения гипотезы об однородности для рядов максимальных расходов весеннего половодья

Опровержение нулевой гипотезы по критериям					
Стьюдента		Фишера		Стьюдента и (или) Фишера	
абсолютное	в, %	абсолютное	в, %	абсолютное	в, %
27	44	26	42	33	53

Как видно из таблицы 2.3 гипотеза об однородности опровергается более, чем для половины рассмотренных рядов.

2.4 Проверка рядов на случайность

Для проверки ряда на случайность использовался критерий значимости выборочного коэффициента автокорреляции (r).

Автокорреляция – это взаимосвязь между величинами ряда, сдвинутыми по времени. Считается, что в подавляющем большинстве случаев ряды максимальных расходов воды соответствуют модели случайной величины, то есть r – статистически незначим. Но при этом предполагается, что ряды однородны и стационарны.

Для неоднородных и нестационарных рядов коэффициент автокорреляции может оказаться статистически значимым, например, если анализируется ряд с хорошо выраженным трендом.

В настоящей работе коэффициент автокорреляции принимался статистически незначимым, если выполняется условие:

$$\frac{|r - m_r|}{\sigma_r} < t_{2\alpha}, \quad (2.8)$$

где $t_{2\alpha}$ – нормированная ордината распределения Стьюдента при уровне значимости 2α и числе степеней свободы $\nu = n - 2$.

m_r – математическое ожидание выборочного коэффициента автокорреляции.

σ_r – стандартная ошибка выборочного коэффициента автокорреляции.

Параметры m_r и σ_r определялись по формулам:

$$m_r = -1 / (n - 1). \quad (2.9)$$

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{1 - r^2}}{\sqrt{n - 2}}. \quad (2.10)$$

Результаты проверки рядов на случайность представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты проверки рядов максимальных расходов весеннего половодья на значимость коэффициента автокорреляции

№	Река - Створ	n	r(1)	m_r	σ_r	$[r - m_r] / \sigma_r$	$t_{2\alpha}$	$H_0: r(1) = 0$
1	Авлога - Матокса	65	0,13	-0,016	0,12	1,16	2,00	не опроверг
2	Большой тудер - Бабяхино	74	0,27	-0,014	0,11	2,48	1,99	опроверг
4	Великая - Гуйтово	75	0,12	-0,014	0,11	1,20	1,99	не опроверг
3	Великая - Опочка	70	-0,07	-0,014	0,12	-0,45	2,00	не опроверг

№	Река - Створ	n	r(1)	m _r	σ _r	[r-m _r]/σ _r	t _{2α}	H ₀ : r(1) = 0
5	Великая - Пятаново	85	0,13	-0,012	0,11	1,33	1,99	не опроверг
6	Видлица - Большие Горы	84	-0,07	-0,012	0,11	-0,51	1,99	не опроверг
7	Воложба - Воложба	79	0,02	-0,013	0,11	0,26	1,99	не опроверг
8	Воложба - Пареево	68	0,29	-0,015	0,12	2,56	2,00	опровер
9	Вьун - Запорожское	65	0,35	-0,016	0,12	3,00	2,00	опровер
10	Гороховка - Токарево	71	0,26	-0,014	0,12	2,32	1,99	опровер
11	Дымка - Долмачево	71	-0,15	-0,014	0,12	-1,12	1,99	не опроверг
12	Ивина - Ладва	65	0,30	-0,016	0,12	2,62	2,00	опровер
13	Капша - Еремина Гора	66	0,20	-0,015	0,12	1,77	2,00	не опроверг
14	Кересть - Сябренницы	76	0,21	-0,013	0,11	2,00	1,99	опровер
15	Коваши - Лендовщина	66	0,07	-0,015	0,12	0,73	2,00	не опроверг
16	Кудеб - Севериково	68	0,23	-0,015	0,12	2,08	2,00	опровер
17	Кунья - Уварово	57	0,13	-0,018	0,13	1,15	2,00	не опроверг
18	Кунья - Холм	65	-0,07	-0,016	0,12	-0,44	2,00	не опроверг
20	Ловать - Великие Луки	84	0,15	-0,012	0,11	1,47	1,99	не опроверг
21	Ловать - Узкое	75	0,14	-0,014	0,11	1,37	1,99	не опроверг
19	Ловать - Холм	98	-0,10	-0,01	0,10	-0,87	1,98	не опроверг
22	Локня - Бородино	62	0,15	-0,016	0,12	1,34	2,00	не опроверг
23	Лососинка - Петрозаводск	59	0,30	-0,017	0,13	2,45	2,00	опровер
24	Луга - Кингисепп	76	0,26	-0,013	0,11	2,40	1,99	опровер
25	Луга - Луга	81	0,24	-0,013	0,11	2,26	1,99	опровер
26	Луга - Толмачево	100	0,10	-0,010	0,10	1,13	1,98	не опроверг
27	Мга - Горы	82	-0,10	-0,012	0,11	-0,80	1,99	не опроверг
28	Мерега - Куйтежа	71	0,15	-0,014	0,12	1,45	1,99	не опроверг
29	Мста - Девкино	86	0,09	-0,012	0,11	1,00	1,99	не опроверг
30	Мста - Потерпелицы	68	0,23	-0,015	0,12	2,02	2,00	опровер
31	Нева - Новосаратовка	160	0,45	0,006	0,08	5,78	1,98	опровер
32	Немина - Немино	62	0,13	-0,016	0,12	1,17	2,00	не опроверг
33	Оредеж - Вырица	81	0,18	-0,013	0,11	1,75	1,99	не опроверг
34	Орлинка - Орлинка	66	0,28	-0,015	0,12	2,43	2,00	опровер
35	Охта - Новое Девяткино	75	0,15	-0,014	0,11	1,44	1,99	не опроверг
36	Оять - Мининская	74	0,27	-0,014	0,11	2,44	1,99	опровер
37	Оять - Шангиничи (Акулова гора)	77	0,33	-0,013	0,11	3,02	1,99	опровер
38	Паша - Дуброво	85	0,19	-0,012	0,11	1,85	1,99	не опроверг
39	Паша - Часовенское	85	0,02	-0,012	0,11	0,30	1,99	не опроверг
40	Перехода - Подсосонье	73	-0,07	-0,014	0,12	-0,46	1,99	не опроверг
41	Перовка - Гончарово	71	0,29	-0,014	0,12	2,57	1,99	опровер
42	Петровка - Дружноселье	70	0,41	-0,014	0,12	3,60	2,00	опровер
43	Плюсса - Брод	81	0,27	-0,013	0,11	2,55	1,99	опровер
44	Плюсса - Плюсса	81	0,25	-0,013	0,11	2,40	1,99	опровер
45	Пола - Налючи	70	0,19	-0,014	0,12	1,76	2,00	не опроверг
46	Пчевжа - Белая	77	0,14	-0,013	0,11	1,34	1,99	не опроверг
47	Пяльма - Пяльма	67	-0,08	-0,015	0,12	-0,52	2,00	не опроверг
48	Рагнукса - Харловская	64	0,23	-0,016	0,12	1,98	2,00	не опроверг
49	Систа - Среднее райково	74	0,15	-0,014	0,11	1,41	1,99	не опроверг
50	Ситня - Пески	65	0,16	-0,016	0,12	1,47	2,00	не опроверг

№	Река - Створ	n	r(1)	m _r	σ _r	[r-m _r]/σ _r	t _{2α}	H ₀ : r(1) = 0
51	Сороть - Осинкино	87	0,04	-0,012	0,11	0,53	1,99	не опроверг
52	Тигода - Любань	75	0,06	-0,014	0,11	0,62	1,99	не опроверг
53	Тихвинка - Горелуха	138	-0,06	-0,007	0,08	-0,65	1,98	не опроверг
54	Тосна - Тосно	75	0,08	-0,014	0,11	0,81	1,99	не опроверг
55	Уверь - Меглецы	83	0,20	-0,012	0,11	1,98	1,99	не опроверг
56	Уза - Дубская	72	0,24	-0,014	0,12	2,19	1,99	опровер
57	Уница - Уница	70	0,02	-0,014	0,12	0,29	2,00	не опроверг
58	Утроя - Б. Губа	81	0,26	-0,013	0,11	2,47	1,99	опровер
59	Цна - Жилотково	58	0,36	-0,018	0,13	2,92	2,00	опровер
60	Шелонь - Порхов	64	0,14	-0,016	0,12	1,26	2,00	не опроверг
61	Шуя - Бесовец	84	-0,08	-0,012	0,11	-0,65	1,99	не опроверг
62	Ящера - Долговка	68	0,17	-0,015	0,12	1,53	2,00	не опроверг

Как видно из таблицы 2.4, значимые коэффициенты автокорреляции выявлены у 22 рядов из 62, что составляет 35% от общего числа рядов.

2.5 Анализ суммарных и разностных интегральных кривых

Для выявления дат изменений условий формирования максимального весеннего стока на реках Северо-Запада строились суммарные и разностные интегральные кривые. Графики суммарных кривых представлены в приложении Г и на рисунке 2.3. Как видно на рисунках точка перелома приходится на начало 70-х годов XX века.

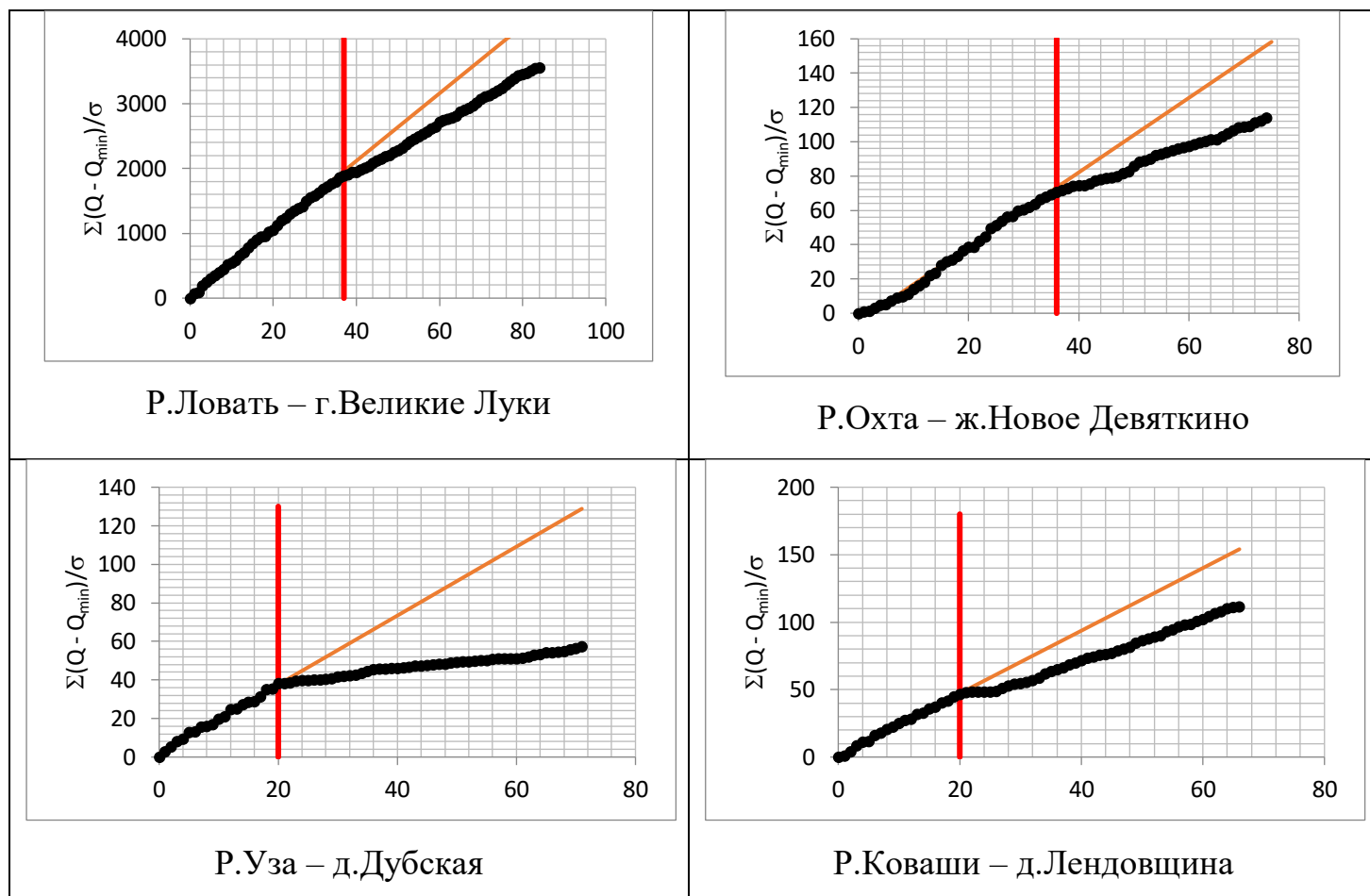


Рисунок 2.3 – Суммарные кривые максимальных расходов весеннего половодья с характерными точками перелома.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ РЯДОВ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ С ПОМОЩЬЮ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЁРСТА

3.1 Эмпирический закон Хёрста

В последние годы для описания вероятностной структуры гидрологических рядов стали использовать показатель Хёрста, названный в честь британского гидролога Гарольда Эдвина Хёрста (1880-1978).

Хёрст долгие годы работал в Египте, где изучал водный режим реки Нил и получил прозвище Абу-Нил («отец Нила»).

Изучив записи о наводнениях на реке Нил за 800 лет, Хёрст обнаружил в них закономерность: за годом с высоким уровнем воды обычно следовал еще один год с высоким уровнем, а за годом с низким уровнем воды – еще один год с низким уровнем. Это было похоже на циклы с непредсказуемым периодом.

Для описания таких рядов Хёрст разработал собственную теорию, которую сейчас называют эмпирическим законом Хёрста. Для сравнения различных типов временных рядов Хёрст ввел следующее соотношение:

$$R / S = N^H , \quad (3.1)$$

где R/S – нормированный размах разностной интегральной кривой; N – число наблюдений; H – показатель Хёрста.

Если в двойных логарифмических координатах найти наклон R/S как функцию от N , то тем самым получим оценку H . Эта оценка не связана с какими-либо предположениями относительно лежащего в основе распределения, т. е. является непараметрической.

Из формулы (3.1) следует, что показатель Хёрста равен

$$H = \frac{\lg(R/S)}{\lg(N)} . \quad (3.2)$$

В настоящее время принята следующая классификация для показателя Хёрста:

1) $H = 0,5$. Указывает на случайный ряд. События случайны и некоррелированы. Настоящее не влияет на будущее.

2) $0 \leq H < 0,5$. Данный диапазон соответствует антиперсистентным рядам. Такой тип системы часто называют – «возврат к среднему». Если система демонстрирует «рост» в предыдущий период, то, скорее всего, в следующем периоде начнется спад. И наоборот, если шло снижение, то вероятен близкий подъем. Такой ряд более изменчив, чем ряд случайный, так как состоит из частых реверсов спад-подъем.

3) $0,5 < H < 1,0$. Имеем персистентные, или трендоустойчивые ряды. Если ряд возрастает (убывает) в предыдущий период, то, вероятно, что он будет сохранять эту тенденцию какое-то время в будущем. Чем ближе H к 0,5, тем более зашумлен ряд и тем менее выражен его тренд.

Показатель Хёрста может быть преобразован во фрактальную размерность D с помощью следующей формулы:

$$D = 2 - H . \quad (3.3)$$

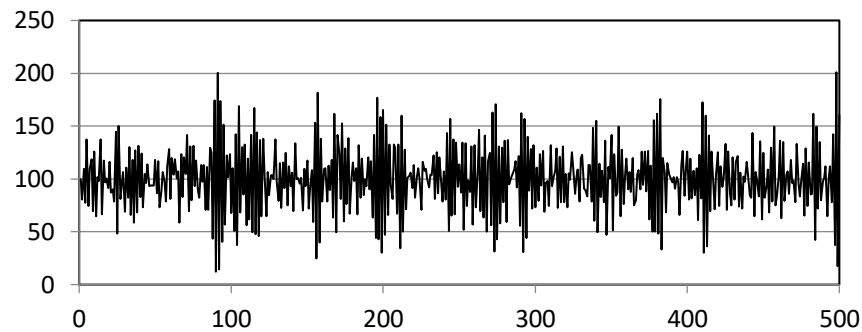
Фрактальная размерность временного ряда, или накопленных изменений при случайном блуждании, равна 1,5. Фрактальная размерность кривой линии равна 1, а фрактальная размерность геометрической плоскости равна 2. Таким образом, фрактальная размерность случайного блуждания лежит между кривой линией и плоскостью.

Если $H = 0,5$, то $D = 1,5$. Обе величины характеризуют независимую случайную последовательность.

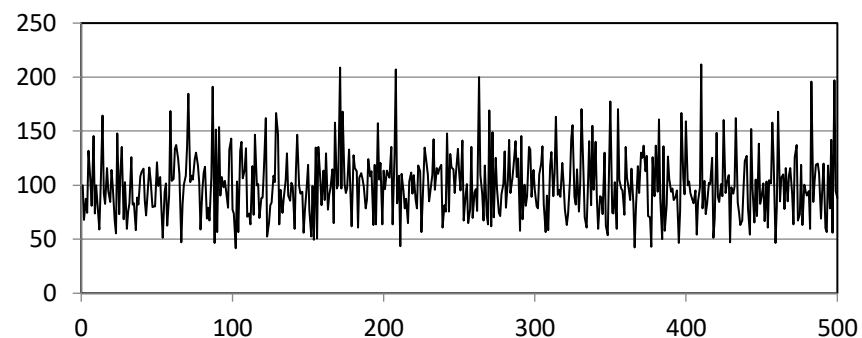
Величина $0,5 < H \leq 1$ будет соответствовать фрактальной размерности, более близкой к кривой линии. Это персистентный временной ряд, дающий более гладкую, менее зазубренную линию, нежели случайное блуждание.

Антиперсистентная величина H ($0 < H < 0,5$) дает соответственно более высокую фрактальную размерность и более прерывистую линию, чем случайное блуждание, и, следовательно, характеризует систему, более подверженную переменам (рисунок 3.1).

1. Антиперсистентный ряд, $H < 0,5$



2. Белый шум, $H = 0,5$



3. Персистентный ряд, $H > 0,5$

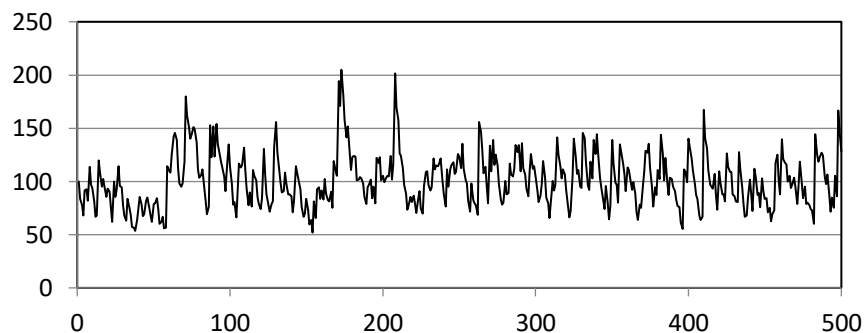


Рисунок 3.1 – Основные типы процессов по показателю Хёрста (из книги Б. Мандельброта и Р.Л. Хадсона «(Не)послушные рынки: фрактальная революция в финансах»).

Оказалось, что показатель Хёрста для уровней Нила существенно выше 0,5 (для р. Нил $H = 0,73$) и, следовательно, этот ряд нельзя рассматривать, как реализацию случайного процесса с независимыми сечениями. Аналогичную структуру имели ряды и многих других природных явлений. В общей сложности Хёрст изучил 51 различное природное явление и почти во всех случаях показатель Хёрста превышал 0,5 (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – R/S анализ Хёрста для различных природных рядов

Явление	Свойства K на основании природных явлений						Коэфф. автокорреляции
	Диапазон N лет	Число Явления	Множества	Среднее	Станд. откл.	Диапазон	
Речной сбор	10-100	39	94	0.72	0.091	0.50-0.94	0.025±0.26 n=15 0.07±0.08* n=65
Roda Gauge	80-1.080	1	66	0.77	0.055	0.58-0.86	
Уровни рек и озер	44-176	4	13	0.71	0.082	0.59-0.85	
Количество осадков	24-211	39	173	0.70	0.088	0.46-0.91	
Годичные донные отложения							
Озеро Саки	50-2.000	1	114	0.69	0.064	0.56-0.87	-0.07±0.11 n=39
Моен и Тамискаминг	50-1.200	2	90	0.77	0.094	0.50-0.95	
Коринтос и Хейлибери	50-650	2	54	0.77	0.098	0.51-0.91	
Температура	29-60	18	120	0.68	0.087	0.46-0.92	
Давление	29-96	8	28	0.63	0.070	0.51-0.76	0.025±0.26 n=15 0.07±0.08* n=65
Число солнечных пятен	38-190	1	15	0.75	0.056	0.65-0.85	
Годовые кольца и еловый индекс	50-900	5	105	0.79	0.076	0.56-0.94	
Суммарные и средние значения разделов							
Водная статистика		83	346	0.72	0.08	0.46-0.94	-0.07±0.11 n=39
Годичные донные отложения		5	258	0.74	0.09	0.50-0.95	
Метеорология и деревья		32	268	0.72	0.08	0.46-0.94	
Итоговые суммарные и средние значения	10-2.000	120	872	0.726	0.082	0.46-0.95	

Было высказано предположение, что эти ряды имеют так называемую «долговременную» или даже «бесконечную» память в отличие рядов с короткой памятью – типа авторегрессии первого или второго порядка $AR(1)$ и $AR(2)$.

В настоящее время теория Хёрста нашла широкое применение при анализе финансовых рынков. Использовать этот подход в гидрологии следует с осторожностью, так как в большинстве случаев длина гидрологических рядов не превышает 100 лет, что не позволяет объективно доказать правомерность применения этой модели.

3.2 Показатель Хёрста для случайного процесса с независимыми сечениями (белого шума)

В 1951 году Хёрст предложил формулу для оценки математического ожидания отношения (R/S) от длины выборки (n) для случайной последовательности типа белого шума.

$$\overline{(R/S)} = (n\pi/2)^{0,5}. \quad (3.4)$$

Однако, как показали дальнейшие исследования эта формула дает систематическую погрешность при малых значениях n . Много лет спустя Эннис и Ллойд (1976) для устранения систематической погрешности вывели следующее выражение:

$$\overline{(R/S)} = \frac{\Gamma[0,5(n-1)]}{\pi^{0,5}\Gamma(0,5n)} \sum_k^{n-1} \sqrt{\frac{n-k}{k}}. \quad (3.5)$$

Это выражение можно рекомендовать при $n < 300$. При больших значениях n выражение (3.5) использовать затруднительно, так как значение Γ -функции становится слишком большим для памяти большинства персональных компьютеров. Для $n > 300$ можно рекомендовать другую формулу:

$$\overline{(R/S)} = (n\pi/2)^{-0,5} \sum_k^{n-1} \sqrt{\frac{n-k}{k}}. \quad (3.6)$$

Позже Э.Э. Петерс показал, что формула (3.5) при малых значениях n все еще дает небольшое завышение параметра (R/S) и предложил эмпирическую поправку к формулам (3.5-3.6).

$$\delta = \frac{n-0,5}{n}. \quad (3.7)$$

В окончательном виде формулы (3.5-3.6) с учетом поправки (3.7) принимают вид:

$$\overline{(R/S)} = \frac{\Gamma[0,5(n-1)]}{\pi^{0,5}\Gamma(0,5n)} \sum_k^{n-1} \sqrt{\frac{n-k}{k}} \left(\frac{n-0,5}{n} \right), \quad (3.8)$$

$$\overline{(R/S)} = (n\pi/2)^{-0,5} \sum_k^{n-1} \sqrt{\frac{n-k}{k}} \left(\frac{n-0,5}{n} \right). \quad (3.9)$$

Математическое ожидание для эмпирической оценки показателя Хёрста в этом случае приближенно определяется по формуле

$$\overline{H} = \frac{\lg(\overline{R/S})}{\lg(N)}, \quad (3.10)$$

где $\overline{(R/S)}$ рассчитывается по формулам (3.8-3.9).

Формула (3.10) дает небольшую смещённость оценки показателя Хёрста, так в ней вместо среднего логарифма (R/S) используется логарифм среднего.

В настоящее время нет общепринятой формулы для оценки стандартной ошибки эмпирического значения показателя Хёрста. Поэтому в данной работе использовалась формула, полученная методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) в ВКР студентов Цай А.А (2014 г.) и Петрова И.С (2018 г.):

$$\sigma_H = 14N^{-0,23} \quad (3.11)$$

Зависимость σ_H от длины ряда показана на рисунке 3.2.

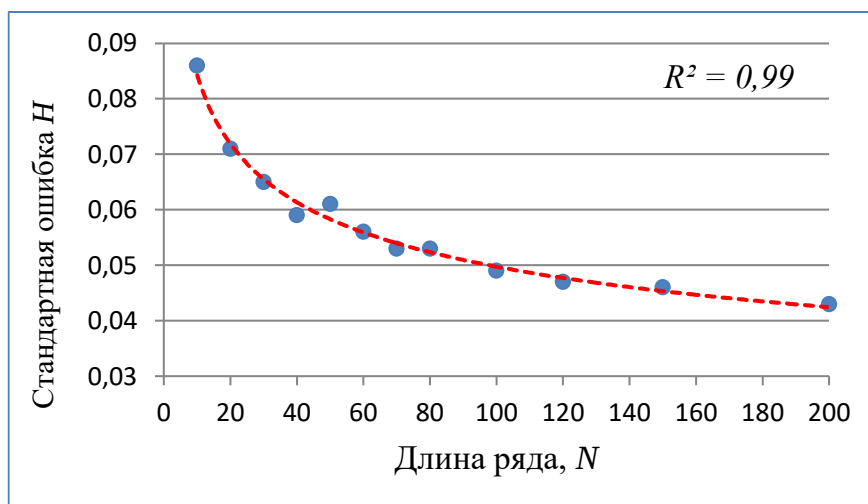


Рисунок 3.2 – Зависимость σ_H белого шума от длины выборки по результатам моделирования.

3.3 Расчет показателя Хёрста для максимальных расходов рек Северо-Запада РФ

Для всех исследуемых рек Северо-Запада РФ была выполнена оценка показателя Хёрста по формуле (3.2). Гипотеза о случайности ряда по критерию Хёрста не опровергалась, если выполнялось условие:

$$\frac{H^* - \bar{H}}{\sigma_H} < t_{2\alpha} \quad (3.12)$$

где H^* – эмпирическое значение показателя Хёрста; $\bar{H}$ – среднее значение показателя Хёрста, определяемое по формуле (3.10); σ_H – стандартная ошибка

показателя Хёрста, определяемая по формуле (3.11); $t_{2\alpha}$ – статистика Стьюдента при уровне значимости $2\alpha = 5\%$ и числе степеней свободы $(n - 1)$.

Результаты расчета представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты проверки рядов максимальных расходов весеннего половодья на случайность с использованием показателя Хёрста

№	Река - Створ	n	H*	H	σ_H	$(H^* - H)/\sigma_H$	$t_{2\alpha}$	$H_0: H \approx 0,5$
6	Авлога - Матокса	65	0,56	0,53	0,054	0,56	2,00	не опр.
7	Большой тудер - Бабахтино	74	0,68	0,53	0,052	2,88	1,99	опроверг.
9	Великая - Гуйтово	75	0,66	0,53	0,052	2,51	1,99	опроверг.
1	Великая - д. Пятаново	85	0,67	0,53	0,050	2,78	1,99	опроверг.
8	Великая - Опочка	70	0,56	0,53	0,053	0,57	2,00	не опр.
10	Видлица - Большие Горы	84	0,57	0,53	0,051	0,79	1,99	не опр.
11	Воложба - Воложба	79	0,55	0,53	0,051	0,39	1,99	не опр.
12	Воложба - Пареево	68	0,59	0,53	0,053	1,13	2,00	не опр.
13	Вьун - Запорожское	65	0,59	0,53	0,054	1,12	2,00	не опр.
14	Гороховка - Токарево	71	0,59	0,53	0,053	1,14	1,99	не опр.
15	Дымка - Долмачево	71	0,62	0,53	0,053	1,71	1,99	не опр.
16	Ивина - Ладва	65	0,62	0,53	0,054	1,68	2,00	не опр.
17	Капша - Еремина Гора	66	0,66	0,53	0,053	2,43	2,00	опроверг.
18	Кересть - Сябраницы	76	0,56	0,53	0,052	0,58	1,99	не опр.
19	Коваши - Лендовщина	66	0,62	0,53	0,053	1,69	2,00	не опр.
20	Кудеб - Севериково	68	0,69	0,53	0,053	3,02	2,00	опроверг.
4	Кунья -Уварово	57	0,65	0,52	0,055	2,35	2,00	опроверг.
5	Кунья -Холм	65	0,58	0,53	0,054	0,93	2,00	не опр.
3	Ловать - Великие Луки	84	0,65	0,53	0,051	2,37	1,99	опроверг.
21	Ловать - Узкое	75	0,63	0,53	0,052	1,93	1,99	не опр.
2	Ловать - Холм	98	0,61	0,53	0,049	1,64	1,98	не опр.
22	Локня - Бородино	62	0,66	0,53	0,054	2,40	2,00	опроверг.
23	Лососинка - Петрозаводск	59	0,68	0,52	0,055	2,92	2,00	опроверг.
24	Луга - Кингисепп	76	0,60	0,53	0,052	1,35	1,99	не опр.
25	Луга - Луга	81	0,55	0,53	0,051	0,39	1,99	не опр.
26	Луга - Толмачево	100	0,62	0,53	0,049	1,85	1,98	не опр.
27	Мга - Горы	82	0,60	0,53	0,051	1,38	1,99	не опр.
28	Мерега - Куйтежа	71	0,64	0,53	0,053	2,09	1,99	опроверг.
29	Мста - Девкино	86	0,62	0,53	0,050	1,79	1,99	не опр.
30	Мста - Потерпелицы	68	0,58	0,53	0,053	0,94	2,00	не опр.
31	Нева - Новосаратовка	160	0,51	0,53	0,044	-0,46	1,98	не опр.
32	Немина - Немино	62	0,58	0,53	0,054	0,92	2,00	не опр.
33	Оредеж - Вырица	81	0,60	0,53	0,051	1,37	1,99	не опр.
34	Орлинка - Орлинка	66	0,62	0,50	0,053	2,25	2,00	опроверг.
35	Охта - Новое Девяткино	75	0,67	0,53	0,052	2,70	1,99	опроверг.
36	Оять - Мининская	74	0,63	0,53	0,052	1,92	1,99	не опр.
37	Оять - Шангиничи (Акулова гора)	77	0,68	0,53	0,052	2,91	1,99	не опр.
38	Паша - Дуброво	85	0,62	0,53	0,050	1,79	1,99	не опр.
39	Паша - Часовенское	85	0,59	0,53	0,050	1,19	1,99	не опр.
40	Перехода - Подсосонье	73	0,61	0,53	0,052	1,53	1,99	не опр.

№	Река - Створ	n	H*	H	σ_H	$(H^* - H)/\sigma_H$	$t_{2\alpha}$	$H_0: H \approx 0,5$
41	Перовка - Гончарово	71	0,64	0,53	0,053	2,09	1,99	опроверг.
42	Петровка - Дружноселье	70	0,64	0,53	0,053	2,09	2,00	опроверг.
43	Плюсса - Брод	81	0,63	0,53	0,051	1,96	1,99	не опр.
44	Плюсса - Плюсса	81	0,65	0,53	0,051	2,36	1,99	опроверг.
45	Пола - Налючи	70	0,59	0,53	0,053	1,14	2,00	не опр.
46	Пчевжа - Белая	77	0,66	0,53	0,052	2,52	1,99	опроверг.
47	Пяльма - Пяльма	67	0,63	0,53	0,053	1,88	2,00	не опр.
48	Рагнукса - Харловская	64	0,63	0,53	0,054	1,86	2,00	не опр.
49	Систа - Среднее райково	74	0,63	0,53	0,052	1,92	1,99	не опр.
50	Ситня - Пески	65	0,59	0,53	0,054	1,12	2,00	не опр.
51	Сороть - Осинкино	87	0,67	0,53	0,050	2,79	1,99	опроверг.
52	Тигода - Любань	75	0,60	0,53	0,052	1,35	1,99	не опр.
53	Тихвинка - Горелуха	138	0,58	0,53	0,045	1,11	1,98	не опр.
54	Тосна - Тосно	75	0,55	0,53	0,052	0,39	1,99	не опр.
55	Уверь - Меглецы	83	0,54	0,53	0,051	0,20	1,99	не опр.
56	Уза - Дубская	72	0,73	0,53	0,052	3,82	1,99	опроверг.
57	Уница - Уница	70	0,55	0,53	0,053	0,38	2,00	не опр.
58	Утроя - Б. Губа	81	0,70	0,53	0,051	3,34	1,99	опроверг.
59	Цна - Жилотково	58	0,54	0,52	0,055	0,36	2,00	не опр.
60	Шелонь - Порхов	64	0,64	0,53	0,054	2,04	2,00	опроверг.
61	Шуя - Бесовец	84	0,46	0,53	0,051	-1,39	1,99	не опр.
62	Ящера - Долговка	68	0,57	0,53	0,053	0,75	2,00	не опр.

3.4 Сравнительный анализ показателя Хёрста

Поскольку показатель Хёрста является характеристикой, в том числе, к трендоустойчивости нестационарные ряды всегда будут иметь показатель Хёрста отличный от показателя Хёрста белого шума. В настоящей работе исследовалась возможность использования показателя Хёрста для оценки неоднородности и нестационарности рядов максимальных расходов весеннего половодья на примере рек Северо-Запада РФ.

Был выполнен сравнительный анализ показателя Хёрста для однородных и неоднородных рядов. Результаты представлены в приложении А и в таблице 3.3, а также на рисунке 3.1.

Таблица 3.3 – Результаты проверки рядов максимальных расходов весеннего половодья на однородность, стационарность и случайность.

№	Статистический критерий	Число неоднородных (нестационарных) рядов	
		абсолютное	в процентах, %
	Всего рядов	62	100
1	Значимость тренда	35	56
2	Критерий Стьюдента	27	44
3	Критерий Фишера	26	42
4	Критерий Фишера или Стьюдента	33	53
5	Всего неоднородных рядов (опровержение хотя бы по одному из критериев: 1,2 или 3)	45	73
6	Неоднородность по трем критериям одновременно (1,2 и 3)	18	29
7	Значимость k -та автокорреляции	22	35
8	Ряд не случаен по Хёрсту	21	34
9	Ряд не случаен по Хёрсту, но однороден	1	

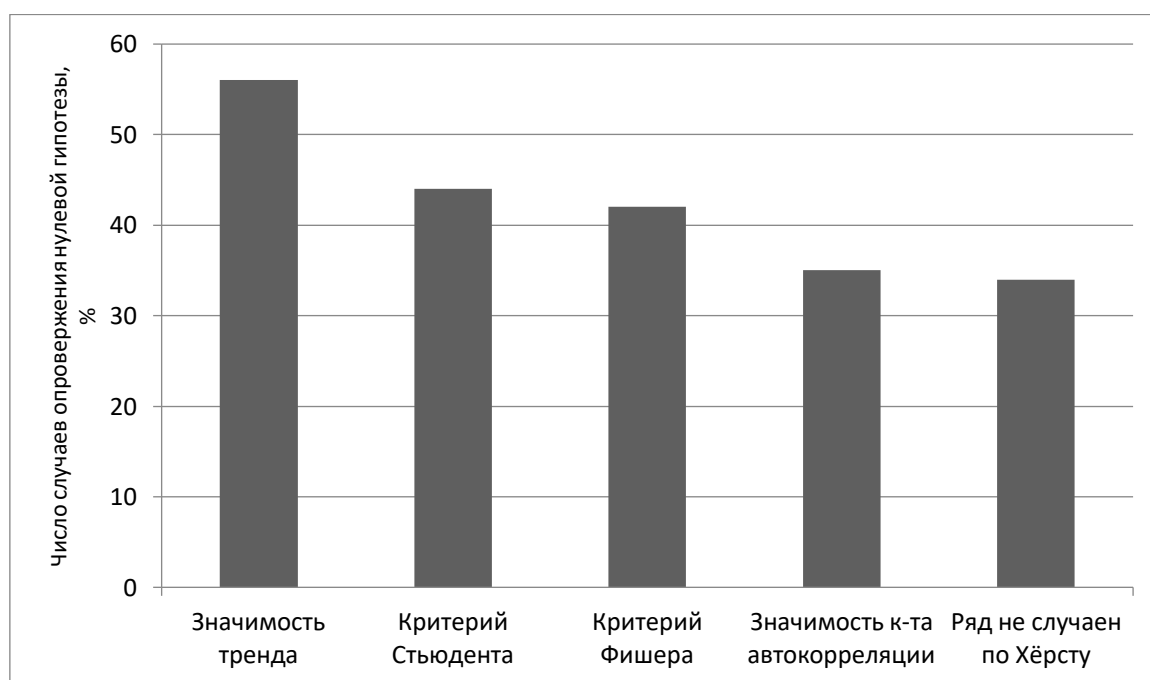


Рисунок 3.3 – Число случаев опровержения нулевой гипотезы, %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью настоящей работы являлась оценка возможности использования показателя Хёрста в качестве универсального критерия для выявления неоднородности и нестационарности рядов максимальных расходов весеннего половодья.

Многочисленно было проанализировано 62 ряда по критерию Стьюдента, Фишера, автокорреляции и значимости тренда. Результаты представлены в приложении А.

Как видно из результатов, 73 % рядов являются неоднородными хотя бы по одному из критериев, а в 29 % случаев ряды являются неоднородными по трем критериям сразу. При этом если ряд не соответствует модели «белого шума» по критерию Хёрста, то он практически всегда неоднороден.

Поскольку показатель Хёрста является характеристикой, в том числе, к трендоустойчивости неоднородные и нестационарные ряды в большинстве случаев будут иметь показатель Хёрста отличный от показателя Хёрста белого шума.

Исходя из проделанной работы, показатель Хёрста можно использовать как универсальный критерий для оценки неоднородности и нестационарности временных рядов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 365 с.
2. Давыдов Л. К. Общая гидрология. / Л. К. Давыдов, А. А. Дмитриева, Н. Г. Конкина. Под ред. д-ра геогр. наук, проф. А. Д. Добровольского и д-ра геогр. наук, проф. М. И. Львовича. - 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 462 с.
3. Евстигнеев В. М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
4. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 444 с.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Индигирский район. – Гидрометеиздат. Л.: – 1972 год. – 651 с.
6. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 424 с.
7. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 279 с.
8. СНиП 2.01.14-83. Определение расчётных гидрологических характеристик. – М.: Стройиздат, 1985. – 35 с.
9. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.
10. Сорокина Н.Б., Федоров А.В., Самотесов Е.Д. Климат Северо-Западного региона России. – М.: НИА-Природа, РЭФИА, 2004. – 104 с.
11. Ионина А.Э. Влияние изменений климата на водный режим рек Северо-Запада РФ: магистерская диссертация. СПб. РГГМУ., 2019.
12. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков. – М.: – Интернет-Трейдинг, 2004.
13. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических

наблюдений. – СПб.: Ротапринт ГНЦ ААНИИ, 2007. – 67 с.

14. Руководство по гидрологической практике. Том II. Управление вод- 42
ными ресурсами и практика применения гидрологических методов. (ВМО-
№ 168). 2012 г
15. Копач Д. М. Исследование области применения Хёрста. –
СанктПетербург:Санкт – Петербургский государственный
инженерноэкономический университет, 2007 – 25 с.
16. Мандельброт, Бенуа, Хадсон, Ричард Л. (Не) послушные рынки:
фрактальная революция в финансах: Пер.с англ.- М.: Издательский дом
«Вильямс», 2006. – 400с. : ил. – Парал.тит.англ.

ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕСУРСЫ

1. Википедия. [Электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://ru.wikipedia.org/wiki/Лена> (дата обращения: 24.12.2021)
2. Вода России – Северо-Западный федеральный округ [Электронный
ресурс]. Режим доступа: [https://water-rf.ru/Регионы_России/2205/Северо-
Западный_федеральный_округ](https://water-rf.ru/Регионы_России/2205/Северо-Западный_федеральный_округ) (дата обращения 24.12.2021)
3. ЕАИС ГМВО. [Электронный ресурс]. Режим доступа:
<https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 24.12.2021)
4. Погода и климат. [Электронный ресурс]. Режим доступа:
<http://www.pogodaiklimat.ru/history.php> (дата обращения: 24.12.2021)
5. ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и
мониторингу окружающей среды» [Электронный ресурс]. Режим
доступа: <http://www.meteo.nw.ru/> (дата обращения: 15.11.2021)

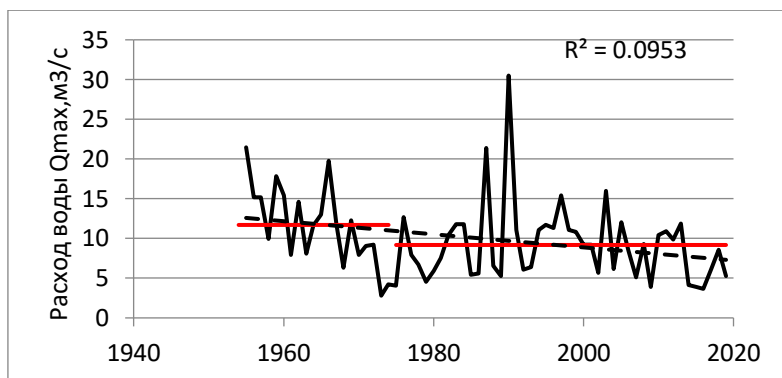
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Сводная таблица проверки рядов максимальных расходов весеннего половодья на однородность, стационарность и случайность

№	Река - Створ	n	Опровержение (1) или неопровержение нулевой гипотезы				
			Херст	Тренд	Стьюдент	Фишер	Автокорреляция
			$H_0: H \gg 0,5$	$H_0: R = 0$	$H_0: Q_1 = Q_2$	$H_0: D_1 = D_2$	$H_0: r(1) = 0$
1	Авлога - Матокса	65		1			
2	Большой тудер - Бабяхтино	74	1	1			1
3	Великая - Гуйтово	75	1	1	1	1	
4	Великая - Опочка	70	1	1			
5	Великая - Пятаново	85		1	1	1	
6	Видлица - Большие Горы	84			1		
7	Воложба - Воложба	79					
8	Воложба - Пареево	68			1	1	1
9	Вьон - Запорожское	65				1	1
10	Гороховка - Токарево	71					1
11	Дымка - Долмачево	71			1	1	
12	Ивина - Ладва	65		1	1	1	1
13	Капша - Еремина Гора	66	1			1	
14	Кересть - Сябраницы	76				1	1
15	Коваши - Лендовщина	66				1	
16	Кудеб - Севериково	68	1	1	1	1	1
17	Кунья - Уварово	57	1	1			
18	Кунья - Холм	65					
19	Ловать - Великие Луки	84	1	1	1	1	
20	Ловать - Узкое	75		1	1		
21	Ловать - Холм	98		1	1		
22	Локня - Бородино	62	1	1	1	1	
23	Лососинка - Петрозаводск	59	1	1	1		1
24	Луга - Кингисепп	76		1	1		1
25	Луга - Луга	81					1
26	Луга - Толмачево	100		1	1	1	
27	Мга - Горы	82					
28	Мерега - Куйтежа	71	1			1	
29	Мста - Девкино	86		1	1		
30	Мста - Потерпелицы	68					1
31	Нева - Новосаратовка	160					1
32	Немина - Немино	62		1			
33	Оредеж - Вырица	81				1	
34	Орлинка - Орлинка	66	1	1			1
35	Охта - Новое Девяткино	75	1	1	1	1	
36	Оять - Мининская	74					1
37	Оять - Шангиничи (Акулова гора)	77	1				1
38	Паша - Дуброво	85					
39	Паша - Часовенское	85					
40	Перехода - Подсосонье	73		1	1	1	

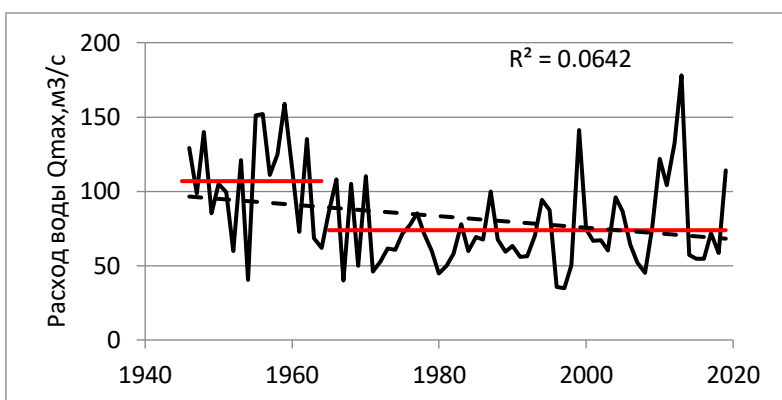
41	Перовка - Гончарово	71	1	1	1	1	1
42	Петровка - Дружноселье	70	1	1	1	1	1
43	Плюсса - Брод	81		1			1
44	Плюсса - Плюсса	81	1	1	1	1	1
45	Пола - Налючи	70					
46	Пчевжа - Белая	77	1	1	1	1	
47	Пяльма - Пяльма	67		1			
48	Рагнукса - Харловская	64		1			
49	Систа - Среднее райково	74		1	1	1	
50	Ситня - Пески	65		1			
51	Сороть - Осинкино	87	1	1	1	1	
52	Тигода - Любань	75			1		
53	Тихвинка - Горелуха	138		1	1	1	
54	Тосна - Тосно	75					
55	Уверь - Меглецы	83					
56	Уза - Дубская	72	1	1	1	1	1
57	Уница - Уница	70					
58	Утроя - Б. Губа	81	1	1	1	1	1
59	Цна - Жилотково	58					1
60	Шелонь - Порхов	64	1	1			
61	Шуя - Бесовец	84					
62	Ящера - Долговка	68		1			

Знак 1 означает, что гипотеза об однородности и стационарности опровергается.

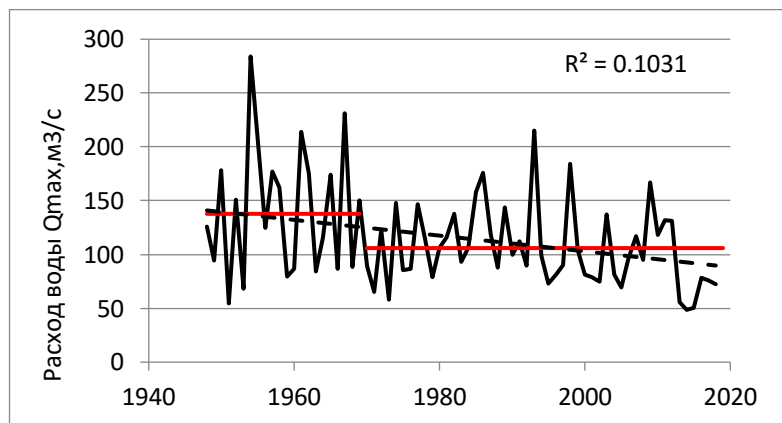
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – хронологические кривые максимальных расходов воды
весеннего половодья.



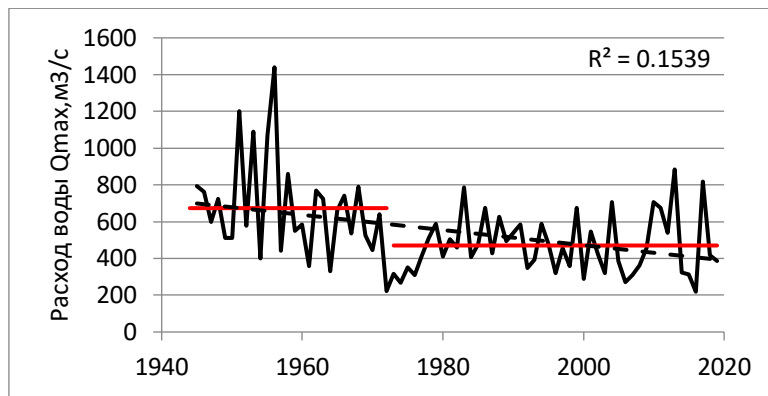
Авлога – д. Матокса;
Тренд значим



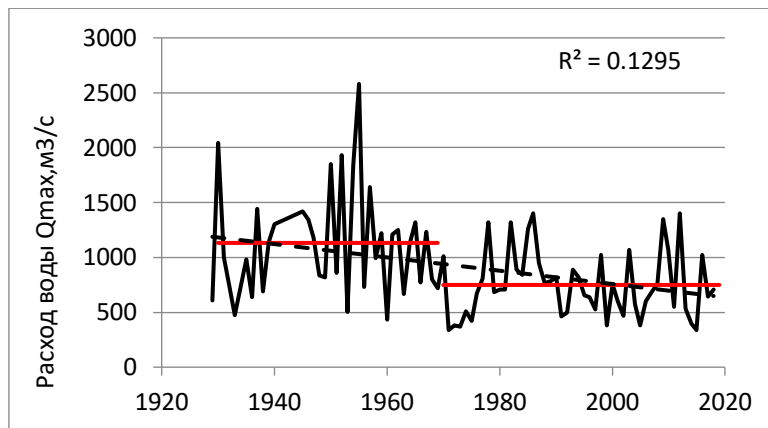
Большой Тудер – д.
Бабяхтино;
Тренд значим



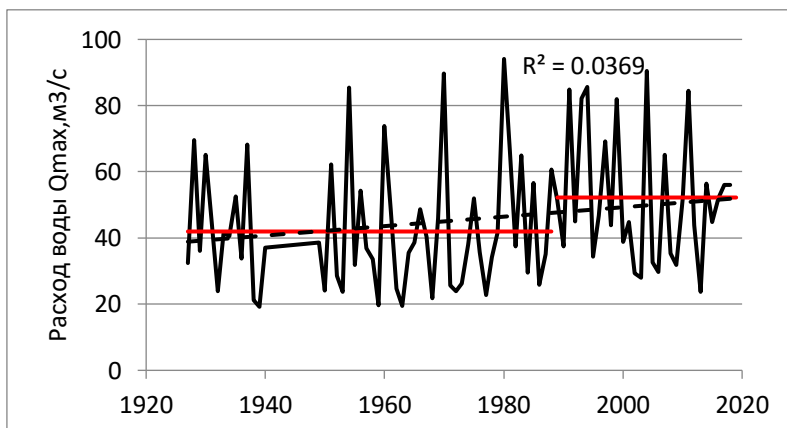
Великая – г. Опочка;
Тренд значим



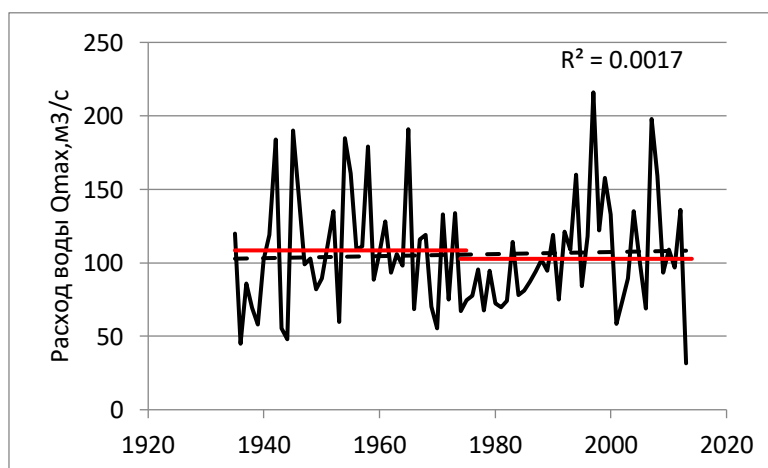
Великая – д. Гуйтово;
Тренд значим



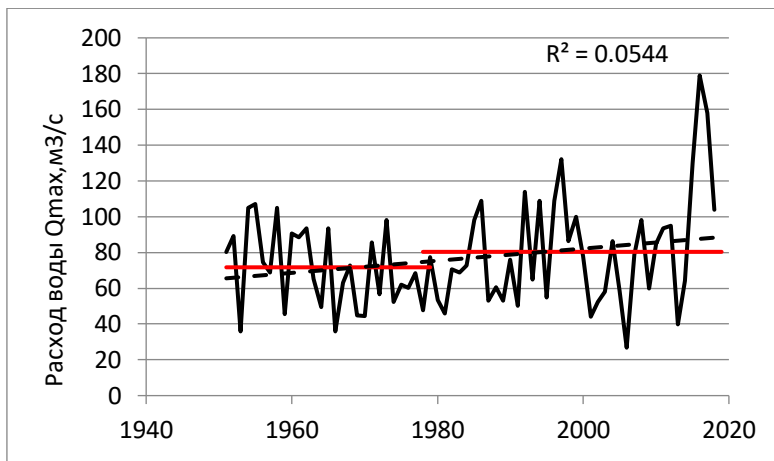
Великая – д. Пятаново;
Тренд значим



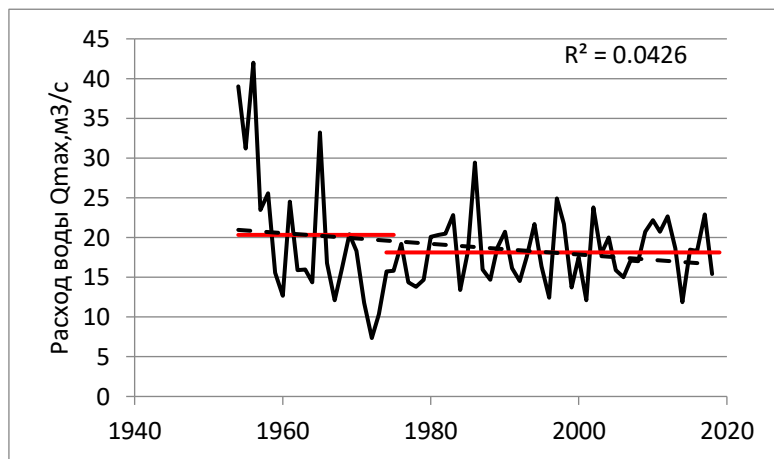
Видлица – с. Большие
Горы;
Тренд незначим



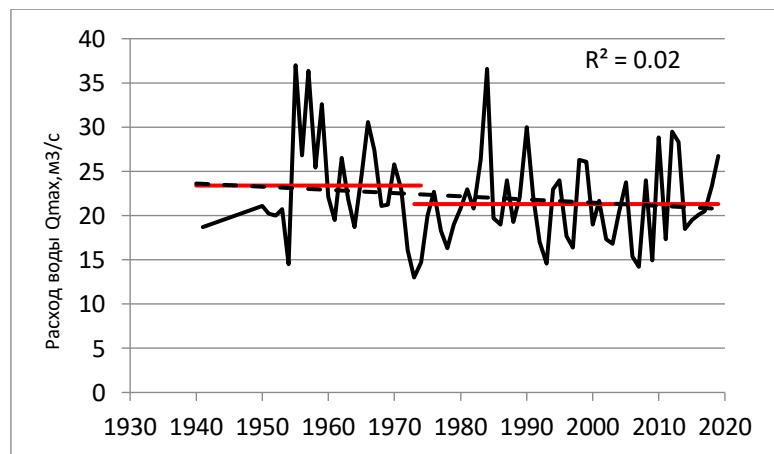
Воложба – д. Воложба;
Тренд незначим



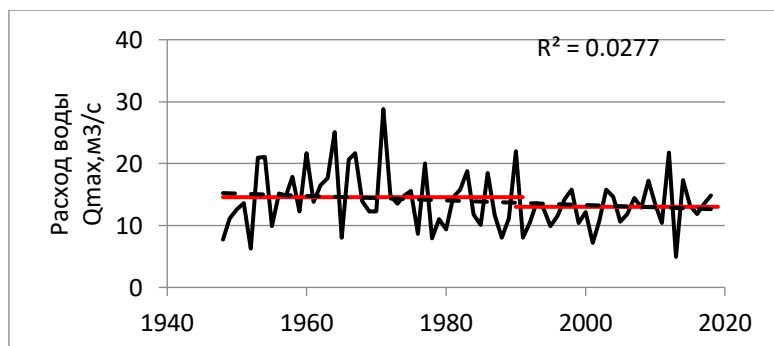
Воложба – д. Пареево;
Тренд незначим



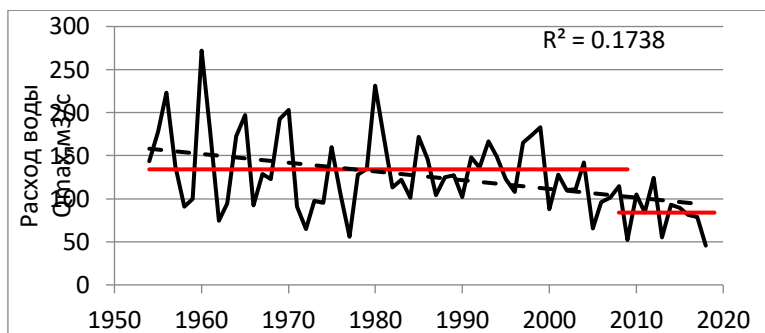
Вьюн – д. Запорожское;
Тренд незначим



Гороховка – п. Токарево;
Тренд незначим

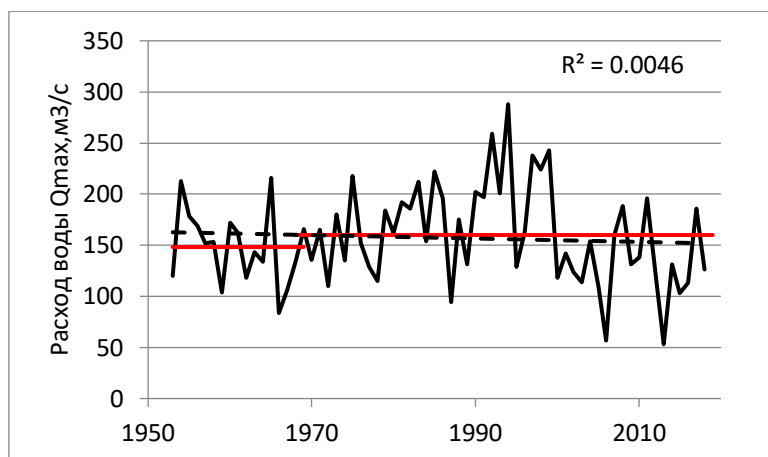


Дымка – д. Долмачево;
Тренд незначим



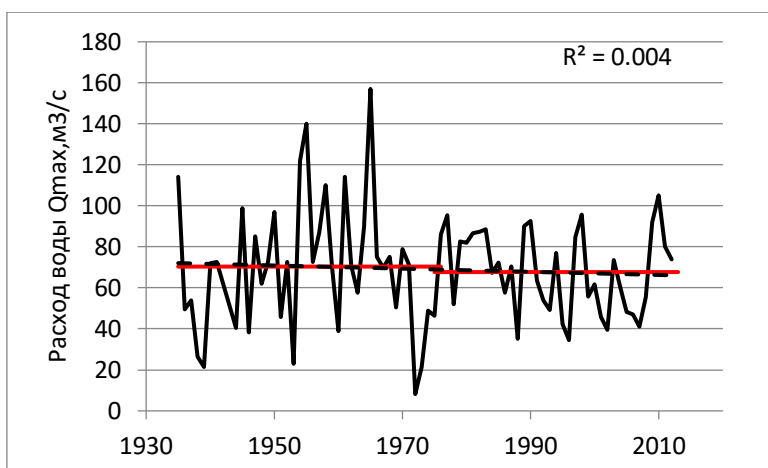
Ивина – пгт. Ладва;

Тренд значим



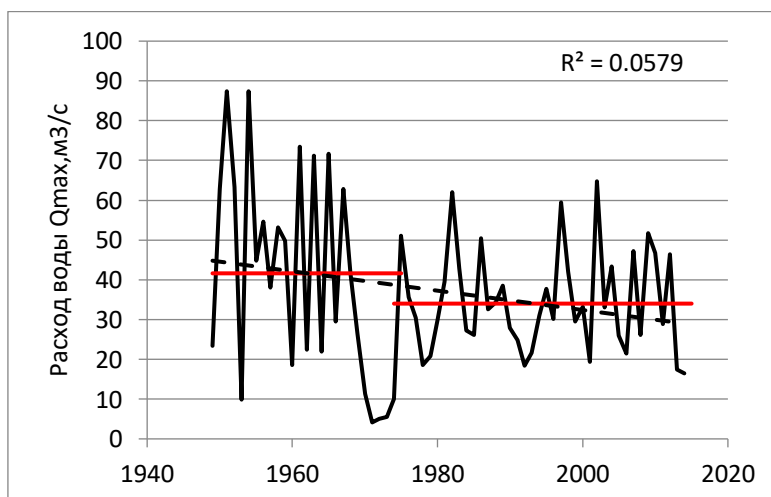
Капша – д. Еремина Гора;

Тренд незначим



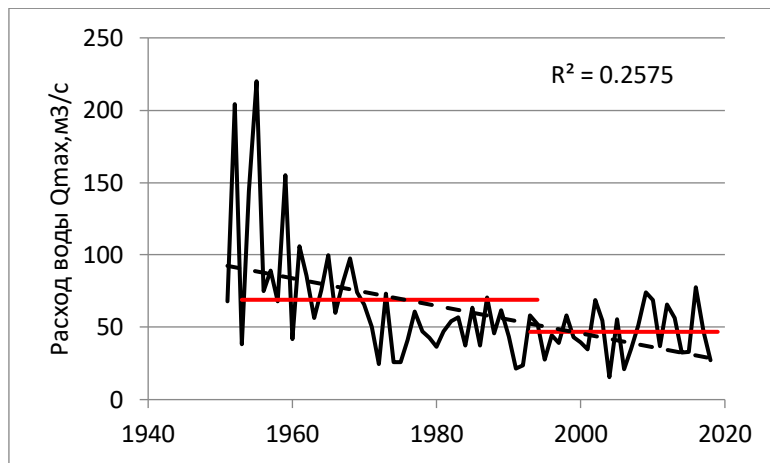
Кересть – с.Сябраницы;

Тренд незначим

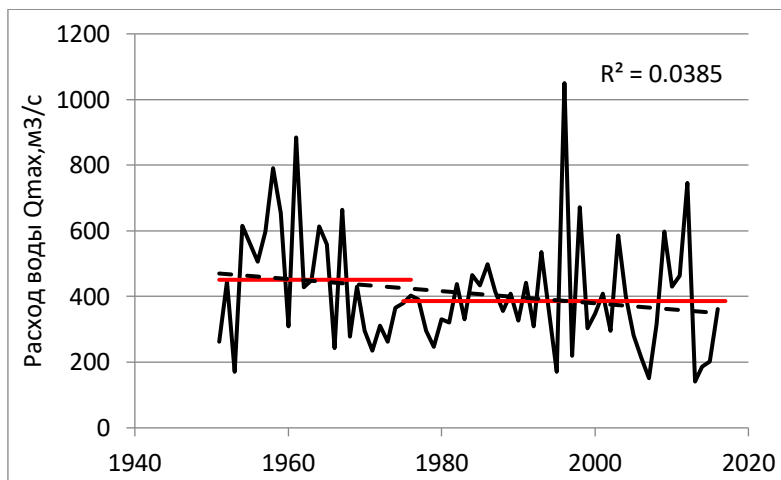


Коваши – д. Лендовщина;

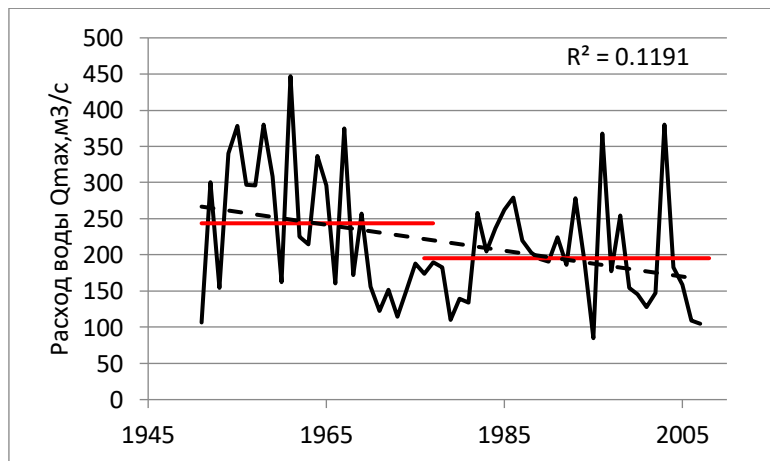
Тренд незначим



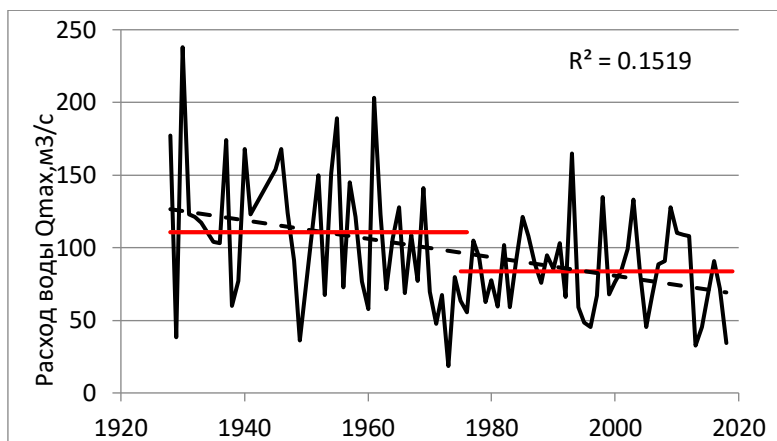
Кудеб – д. Севериково;
Тренд значим



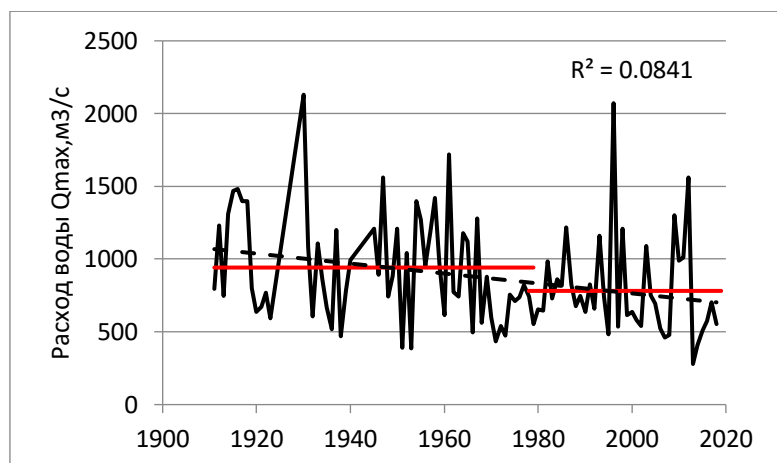
Кунья – г. Холм;
Тренд незначим



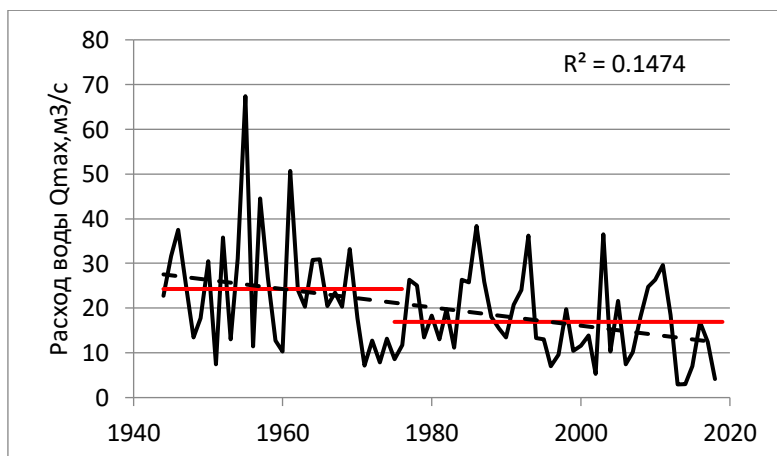
Кунья – д. Уварово;
Тренд значим



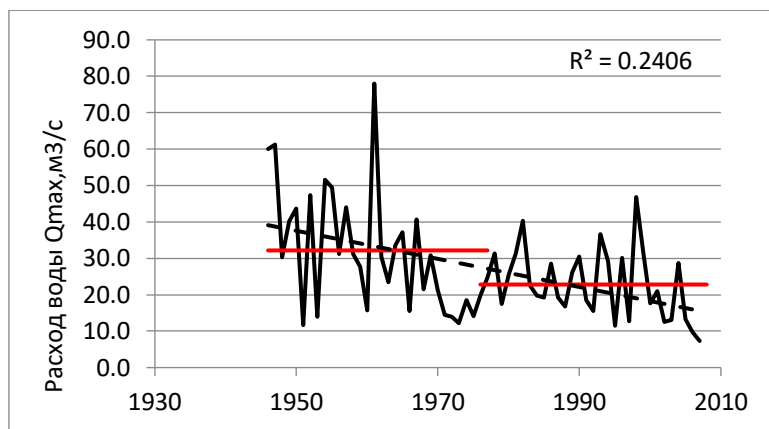
Ловать – г. Великие Луки;
Тренд значим



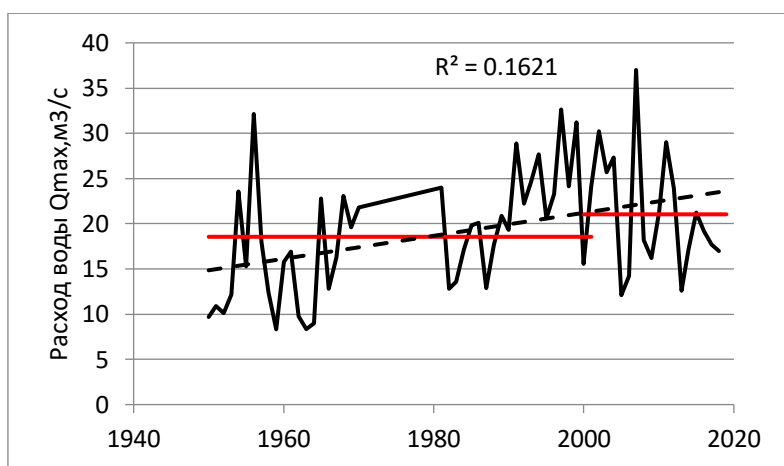
Ловать – г. Холм;
Тренд значим



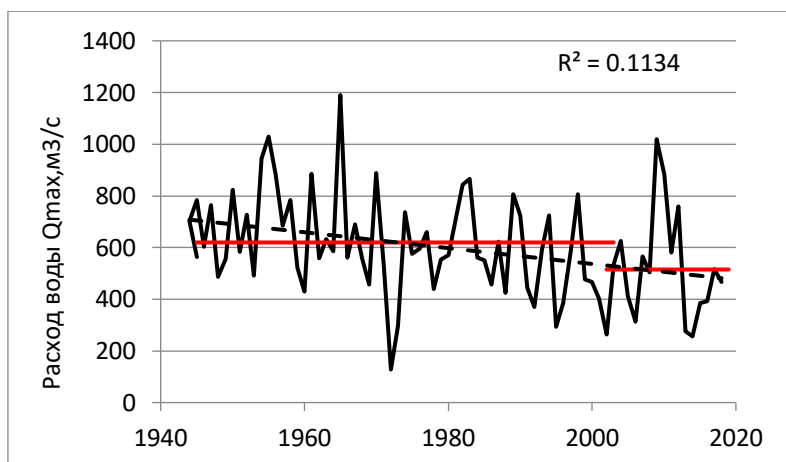
Ловать – д. Узкое;
Тренд значим



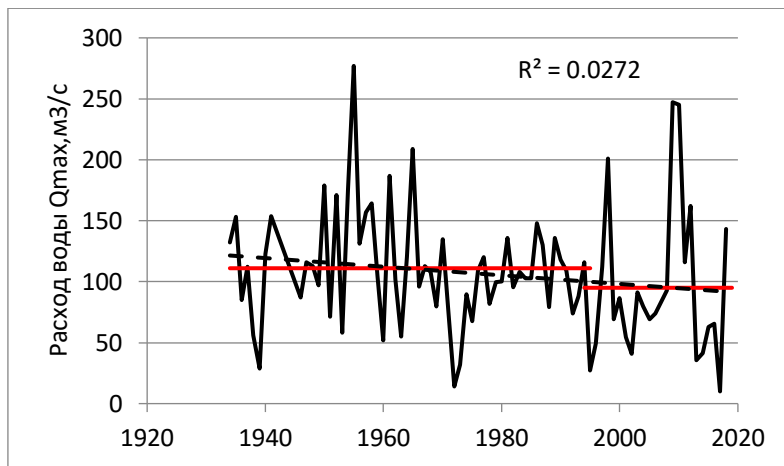
Локня – д. Бородино;
Тренд значим



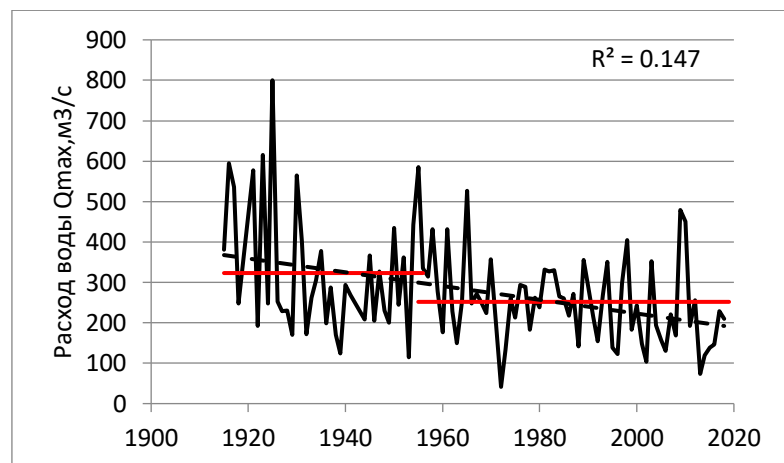
Лососинка – г.
Петрозаводск;
Тренд значим



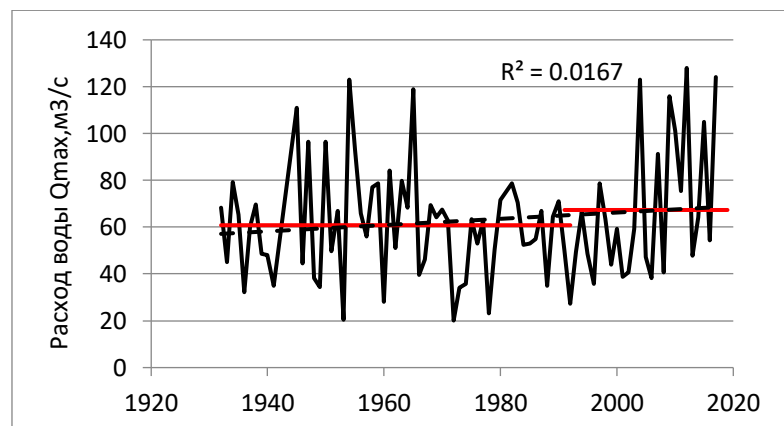
Луга – г. Кингисепп;
Тренд значим



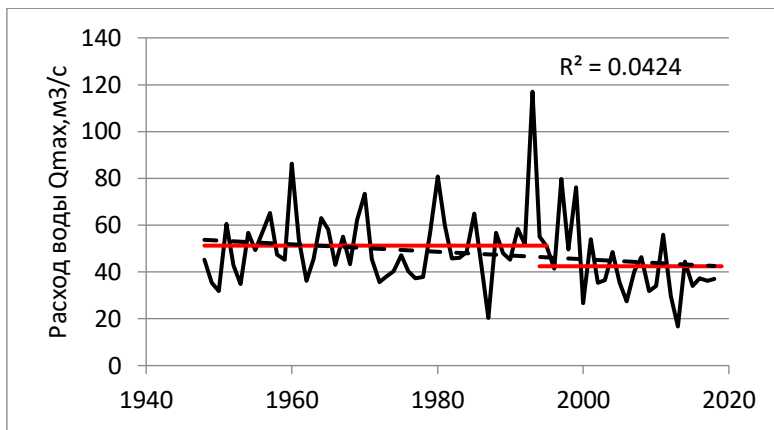
Луга – г. Луга;
Тренд незначим



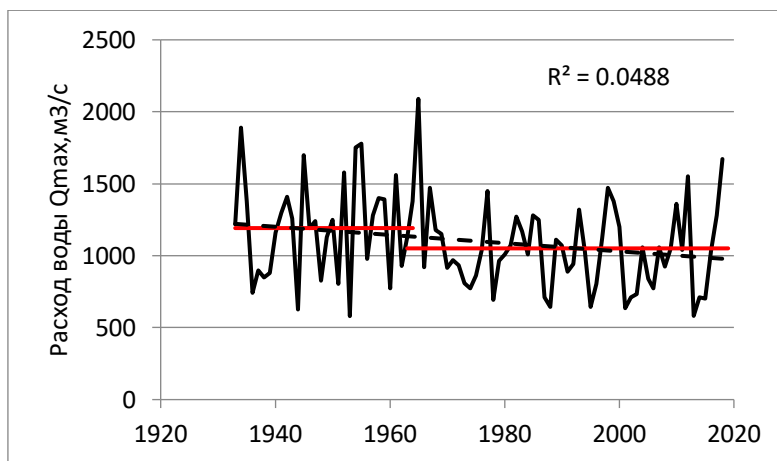
Луга – ст. Толмачево;
Тренд значим



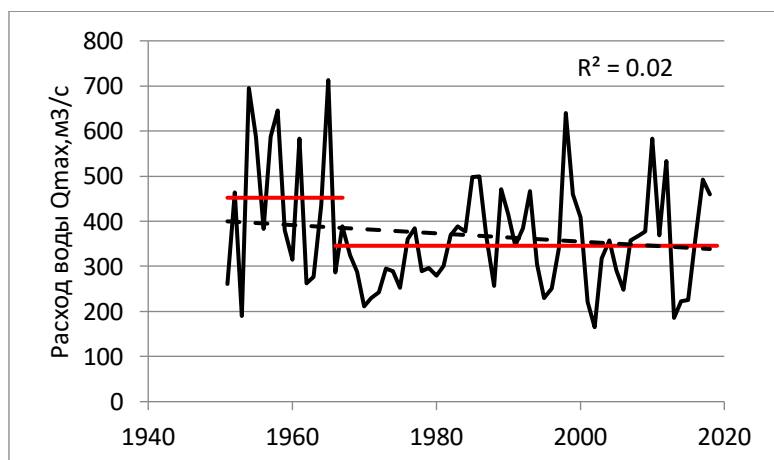
Мга – д. Горы;
Тренд значим



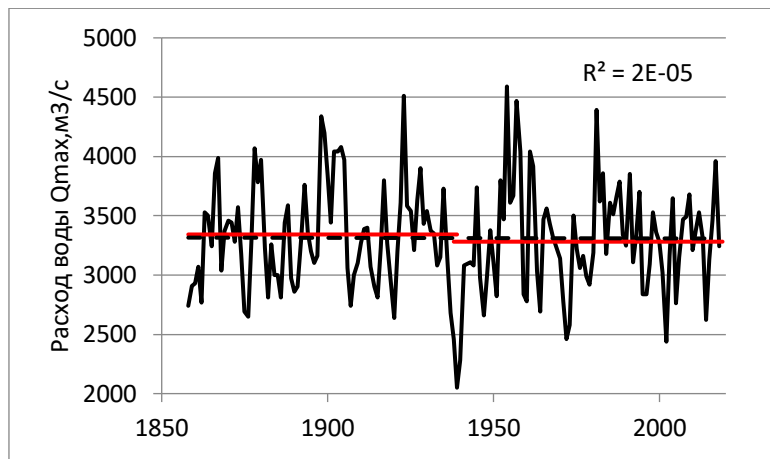
Мерега – д. Куйтежа;
Тренд незначим



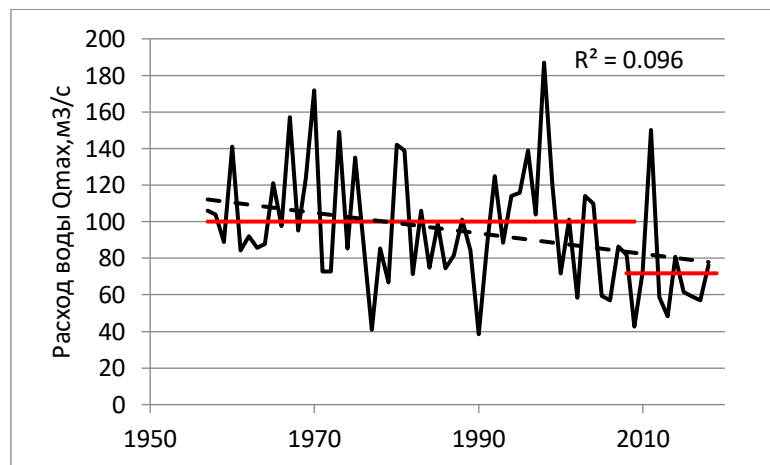
Мста – д. Девкино;
Тренд значим



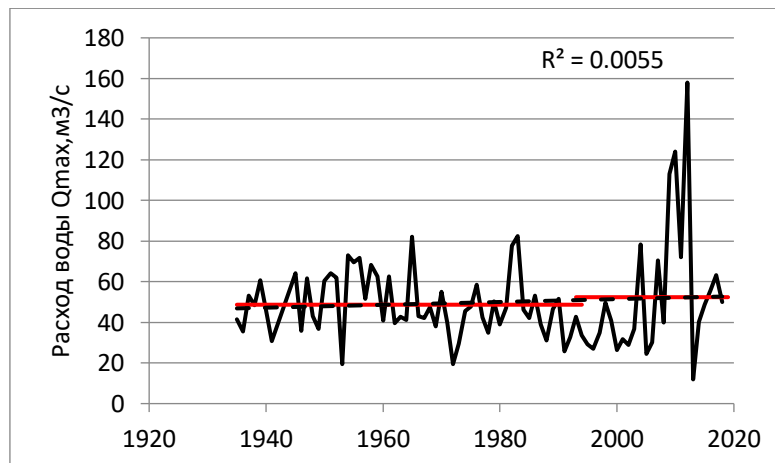
Мста – д. Потерпелицы;
Тренд незначим



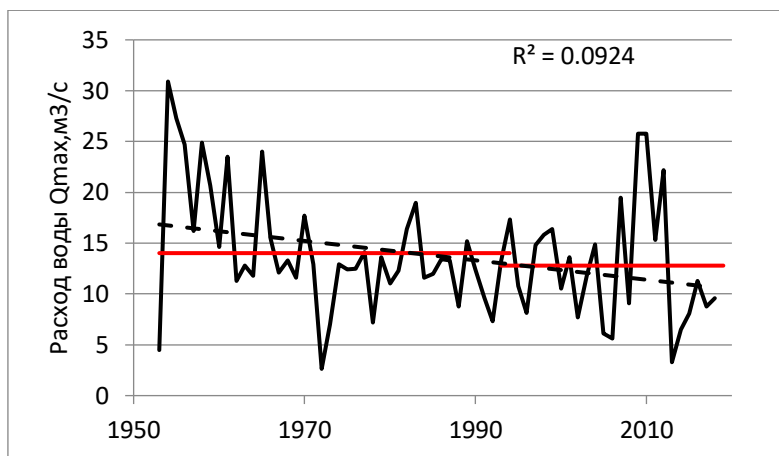
Нева – д. Новосаратовка;
Тренд незначим



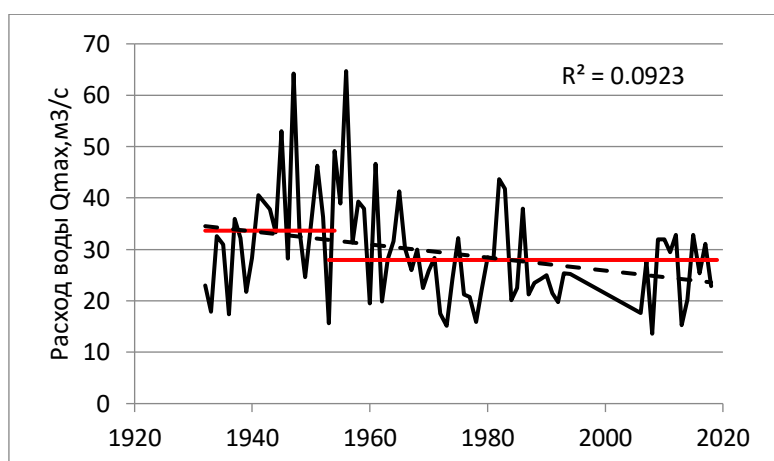
Немина – п. Немино;
Тренд значим



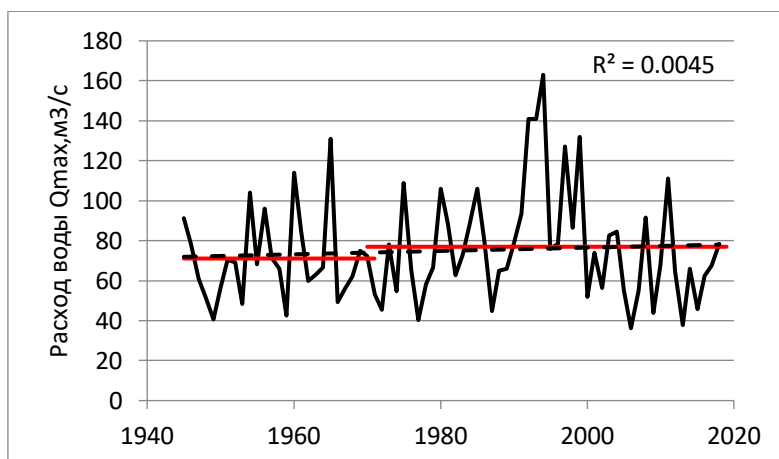
Оредеж – пгт. Вырица;
Тренд незначим



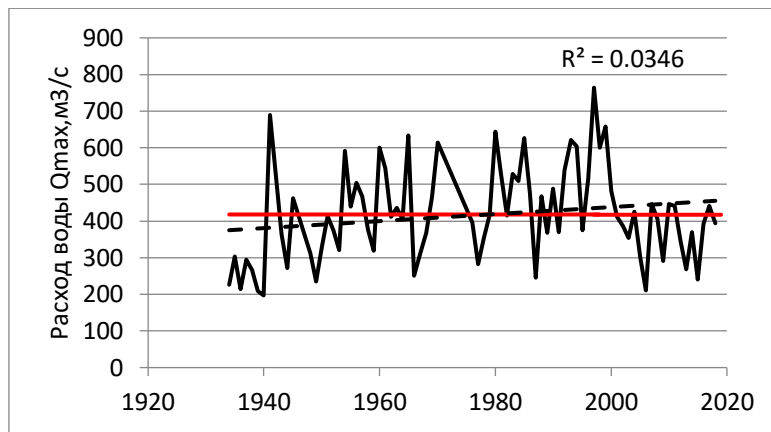
Орлинка – уроч. Орлинка;
Тренд значим



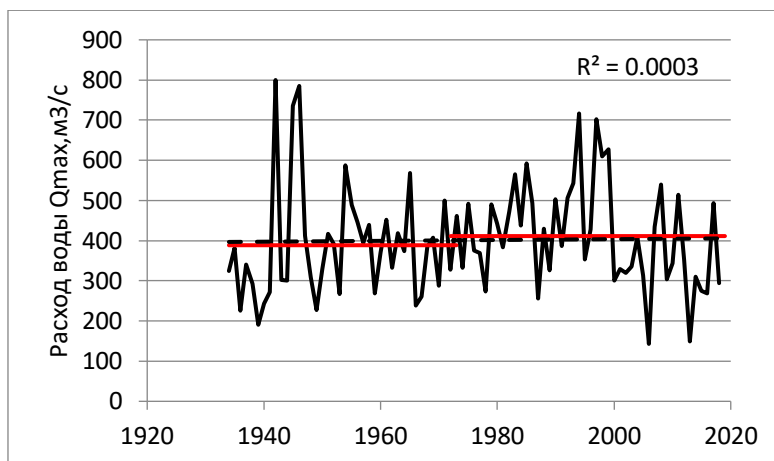
Охта – ж. Новое Девяткино;
Тренд значим



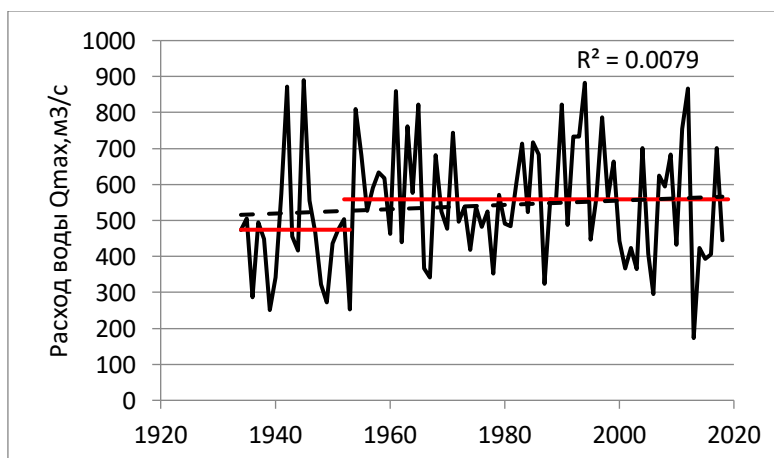
Оять – д. Мининская;
Тренд незначим



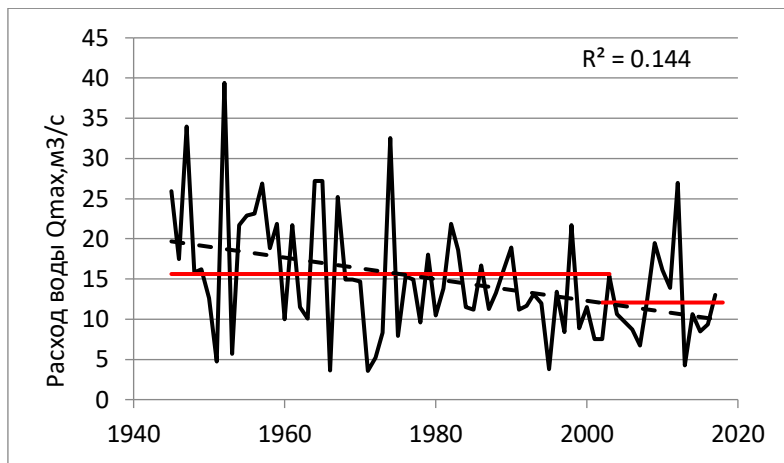
Оять – д. Акулова Гора;
Тренд незначим



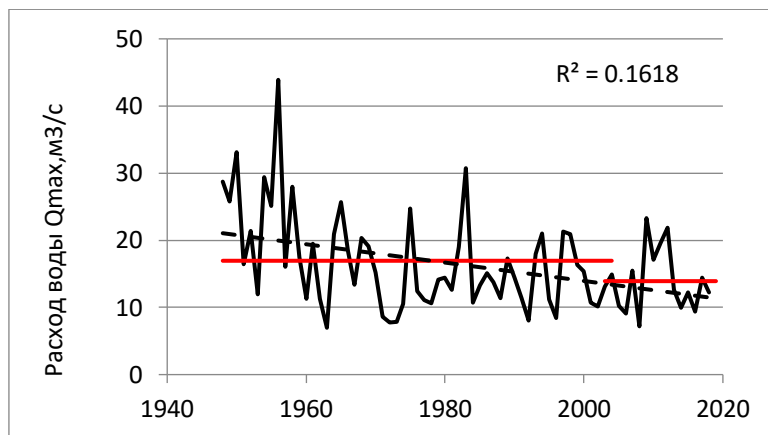
Паша – д. Дуброво;
Тренд незначим



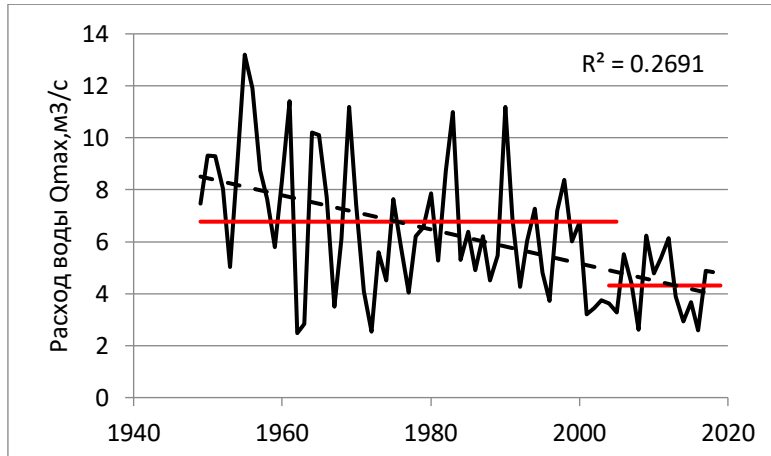
Паша – с. Часовенское;
Тренд незначим



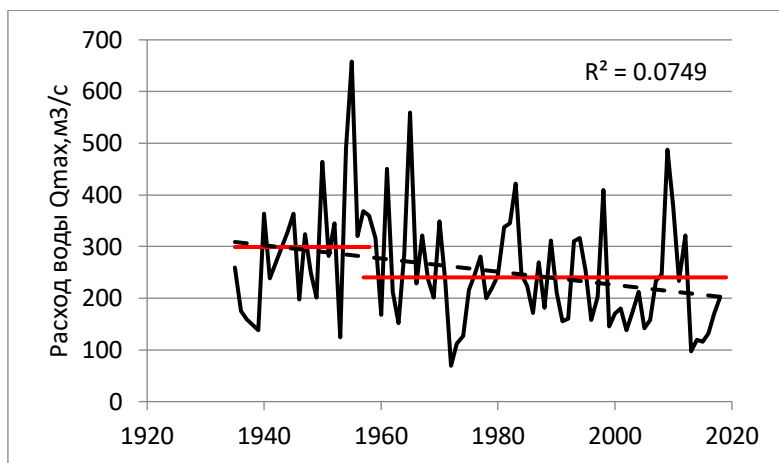
Перехода – д. Подсосонье;
Тренд значим



Петровка – п. Гончарово;
Тренд значим

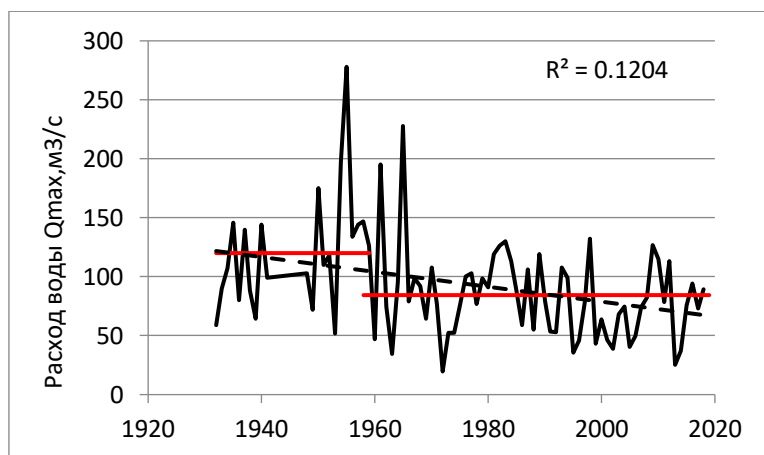


Петровка – п. Дружноселье;
Тренд значим



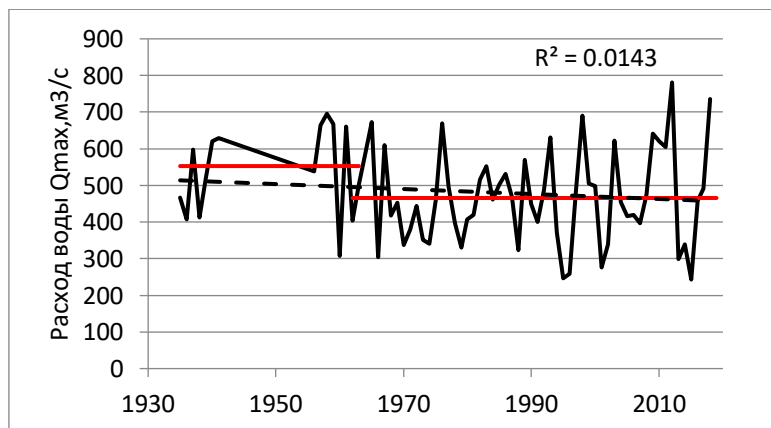
Плюсса – д. Брод;

Тренд значим



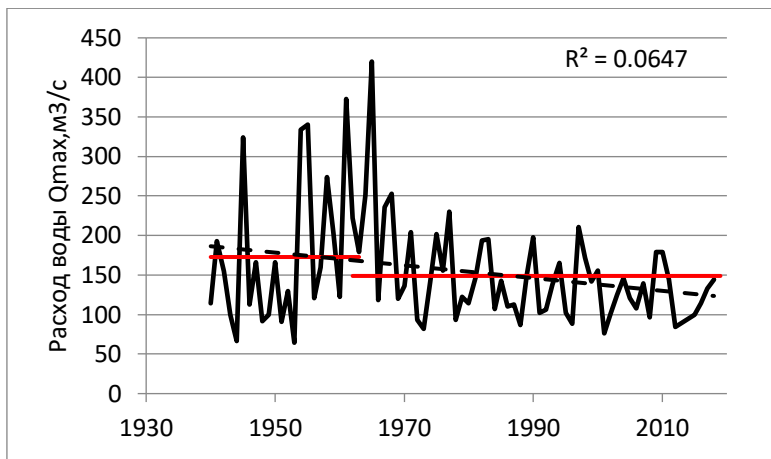
Плюсса – с. Плюсса;

Тренд значим



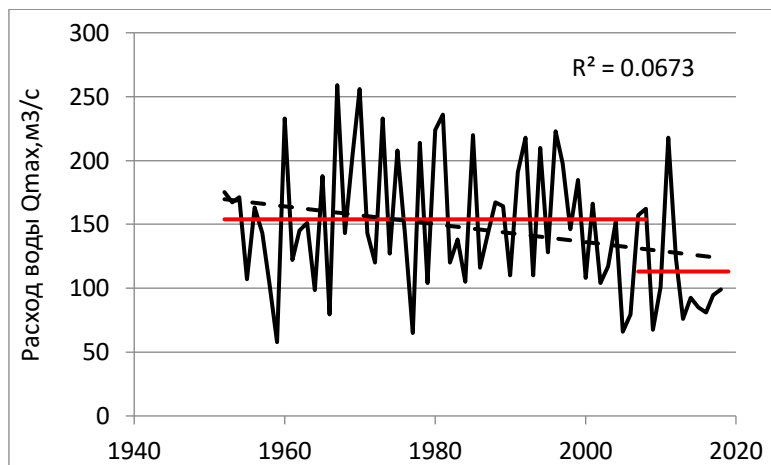
Пола – д. Налючи;

Тренд незначим



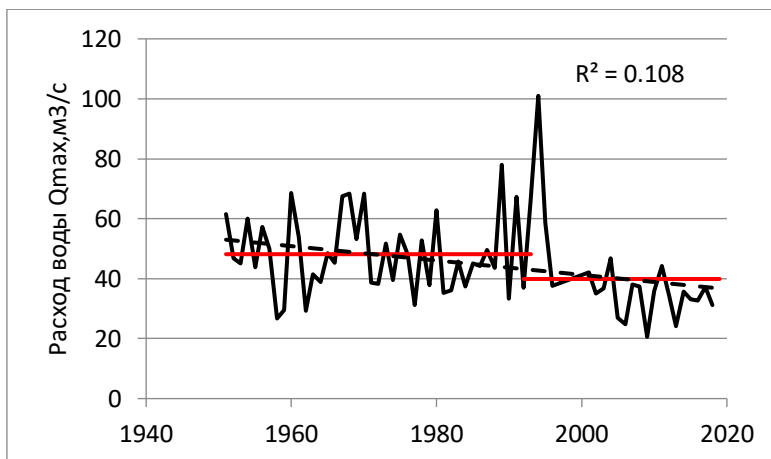
Пчевжа – д. Белая;

Тренд значим



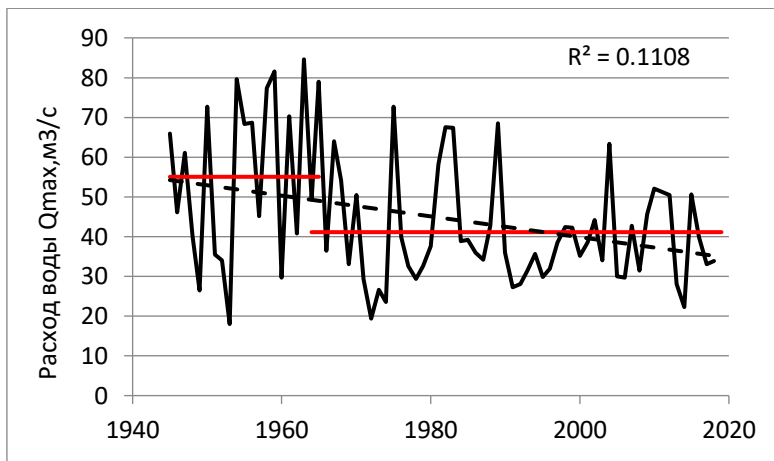
Пяльма – д. Пяльма;

Тренд значим

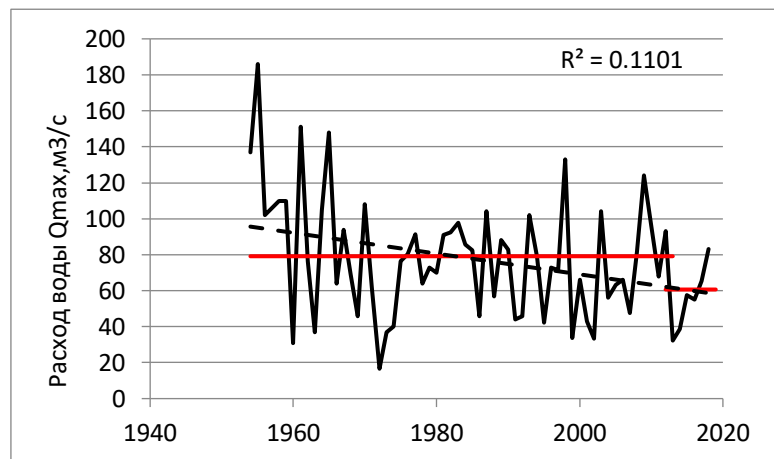


Рагнукса – д. Харловская;

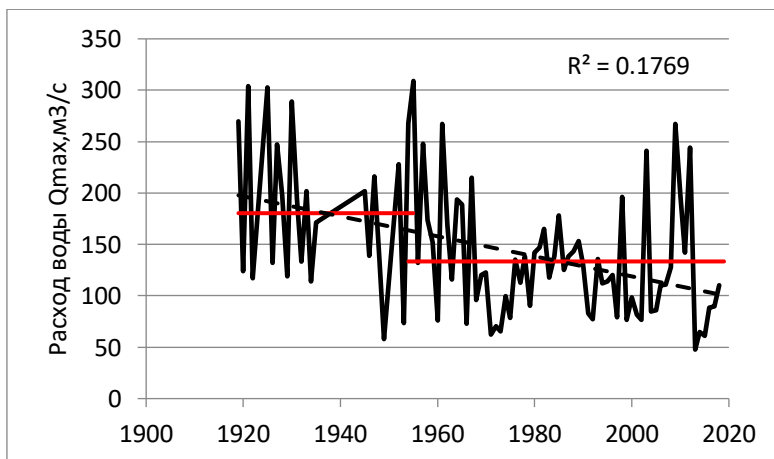
Тренд значим



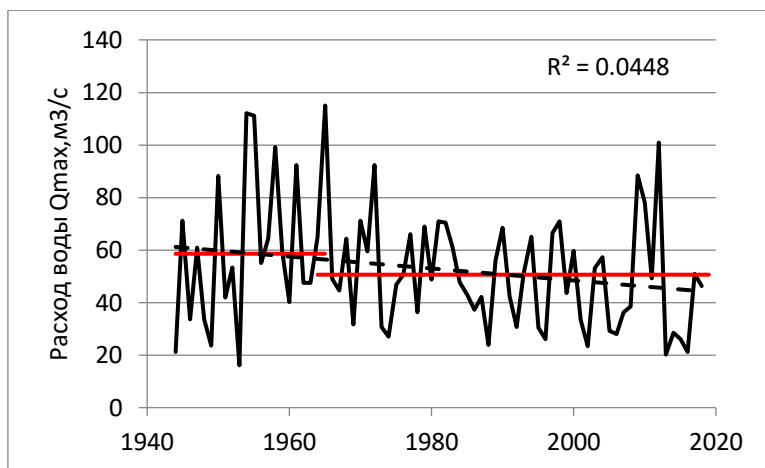
Систа – д. Среднее Райково;
Тренд значим



Ситня – д. Песким;
Тренд значим

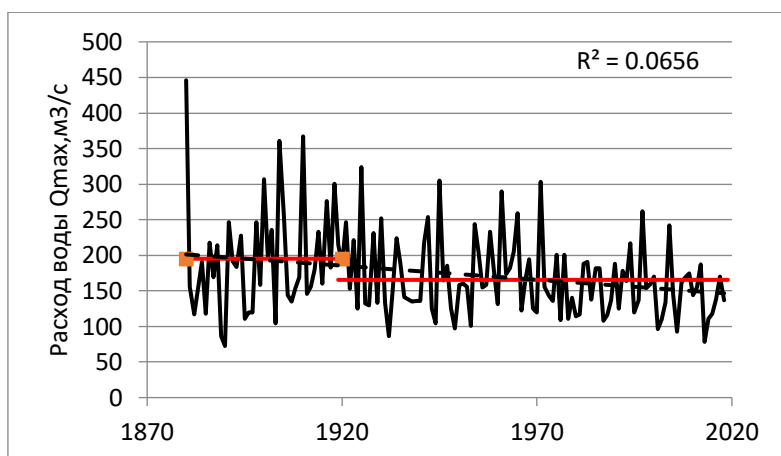


Сороть – д. Осинкино;
Тренд значим



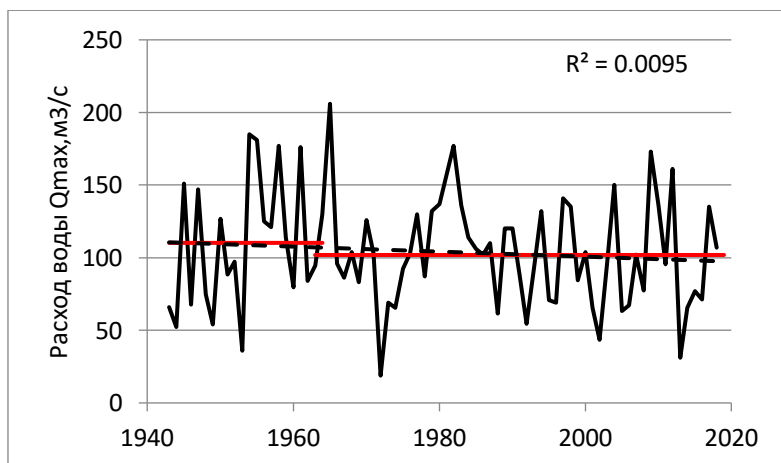
Тигода – ст. Любань;

Тренд незначим



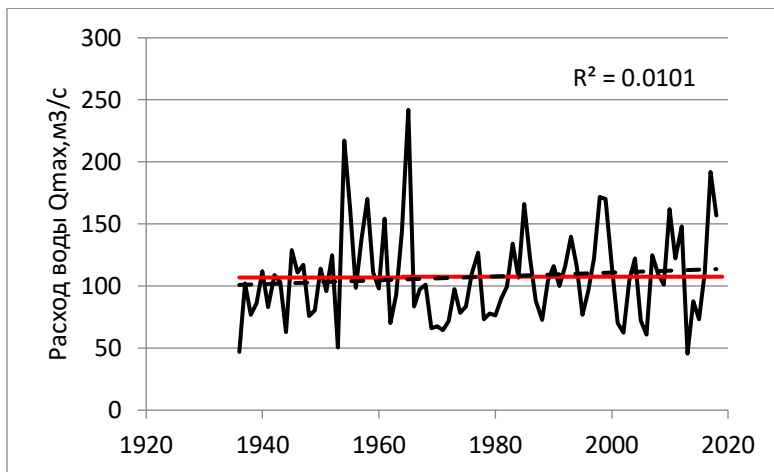
Тихвинка – д. Горелуха;

Тренд значим

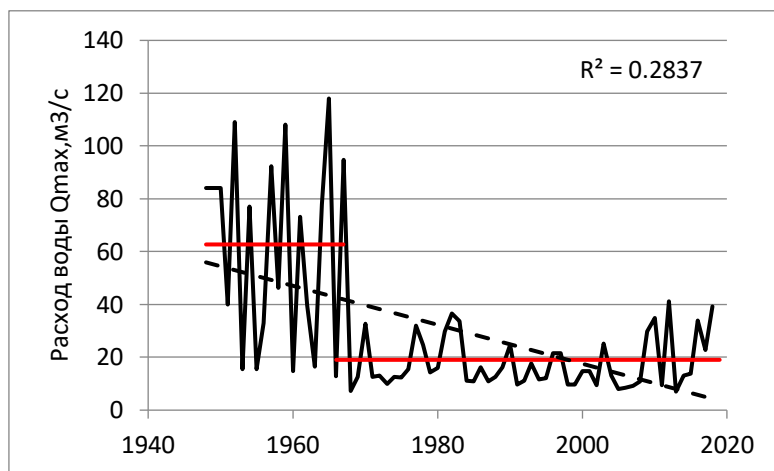


Тосна – д. Тосно;

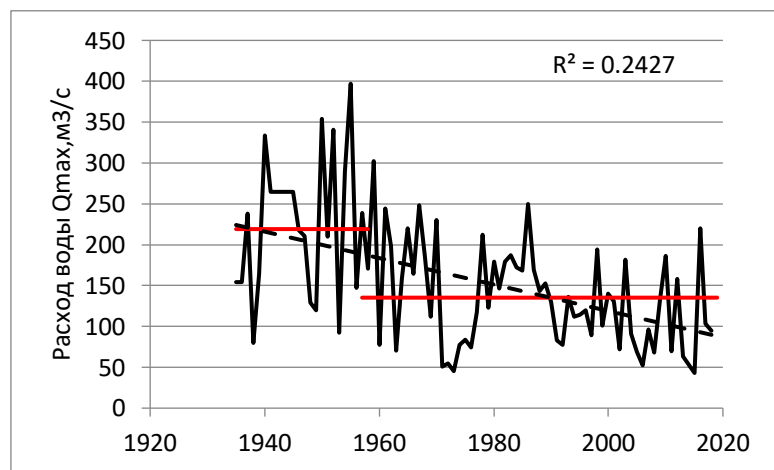
Тренд незначим



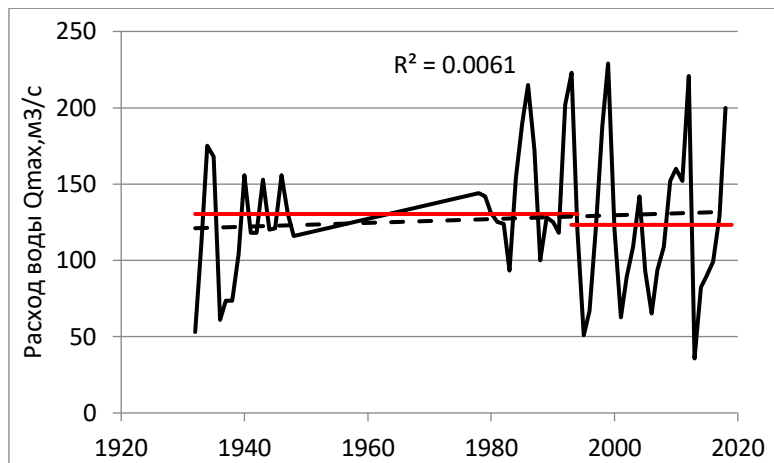
Уверь – д. Меглецы;
Тренд незначим



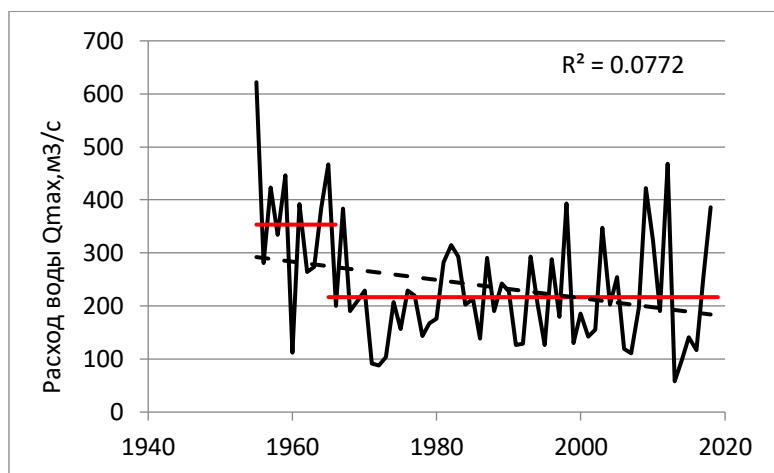
Уза – д. Дубская;
Тренд значим



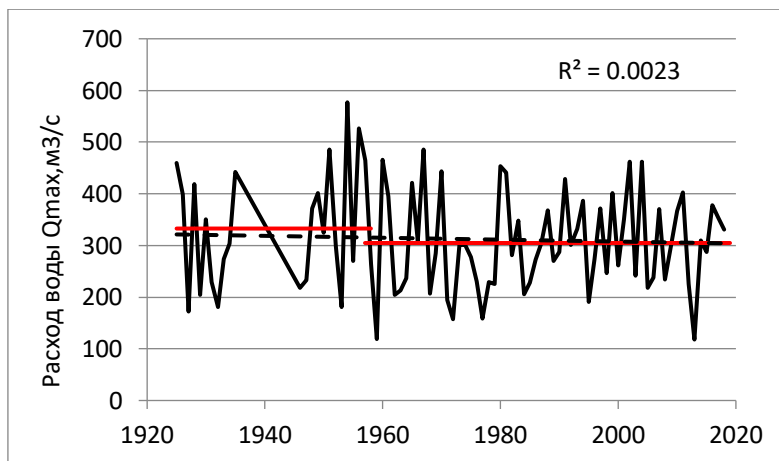
Утроя – д. Большая Губа;
Тренд значим



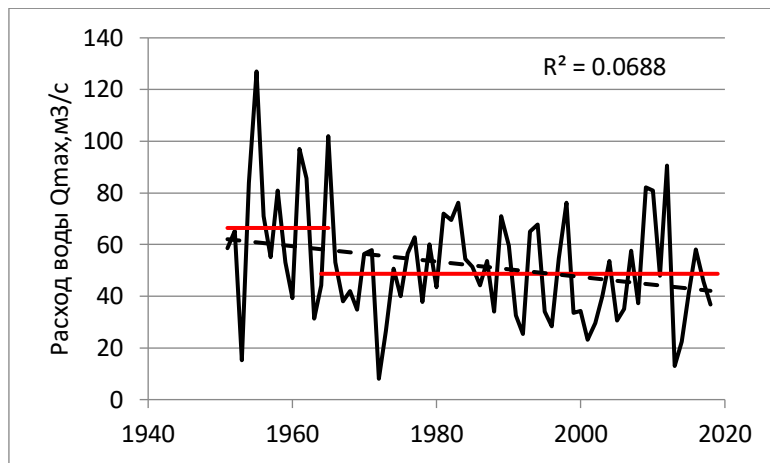
Цна – д. Жилотково;
Тренд незначим



Шелонь – г. Порхов;
Тренд значим



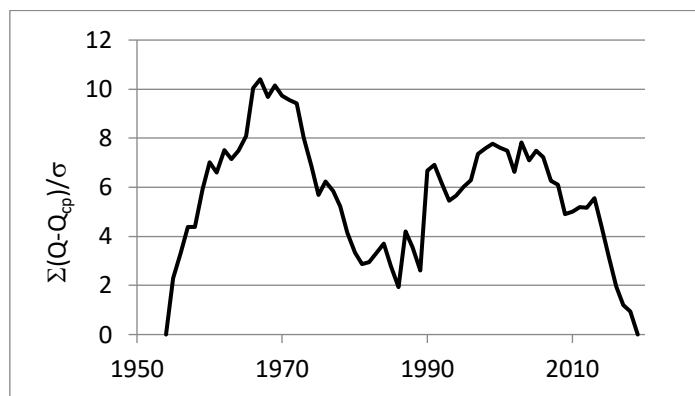
Шуя – д. Бесовец;
Тренд незначим



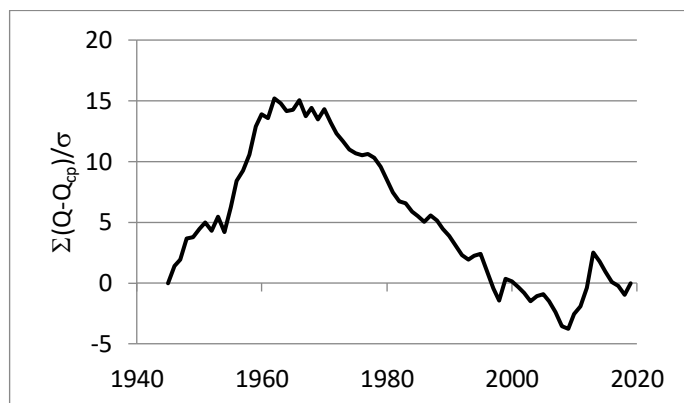
Ящера – д. Долговка;

Тренд значим

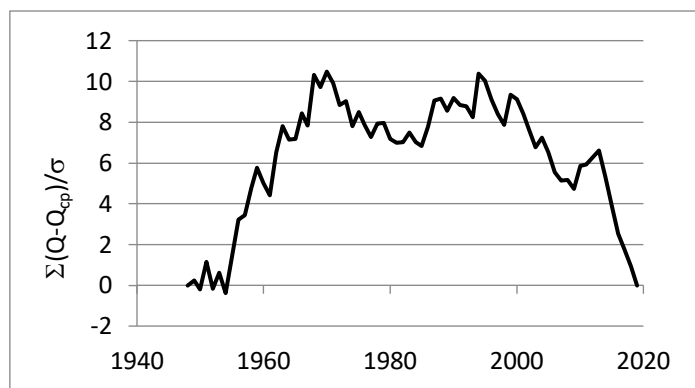
ПРИЛОЖЕНИЕ В – разностно-интеграл кривые максимальных расходов воды
весеннего половодья.



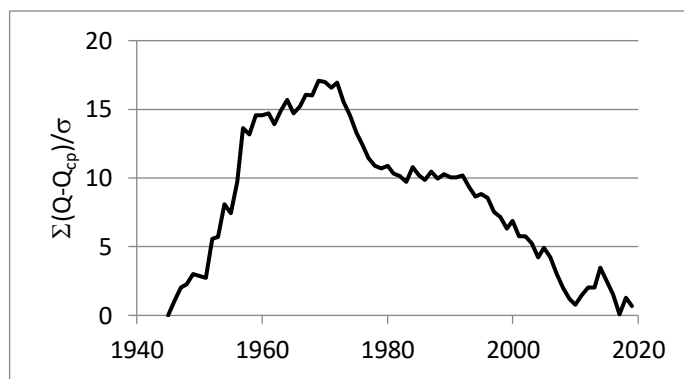
Авлога – д. Матокса



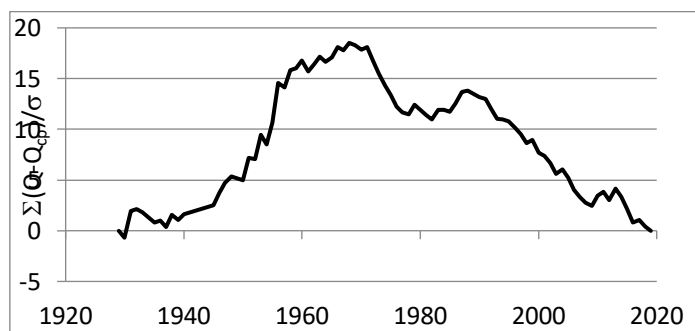
Большой Тудер – д. Бабахтино



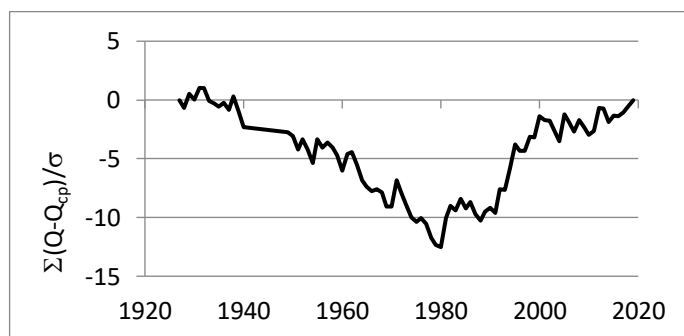
Великая – г. Опочка



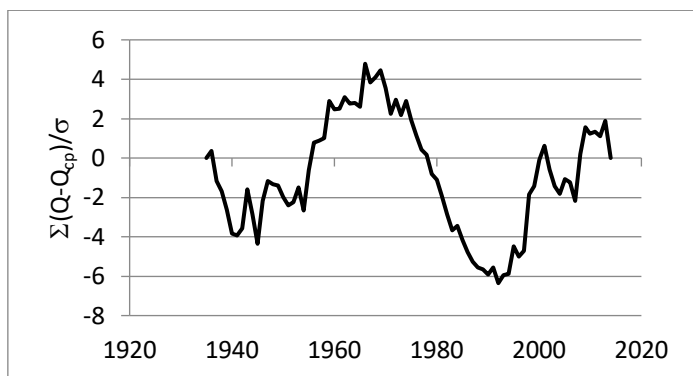
Великая – п. Гуйтово



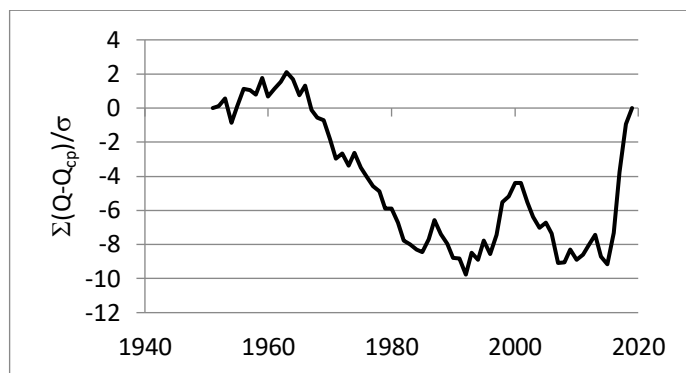
Великая – д. Пятаново



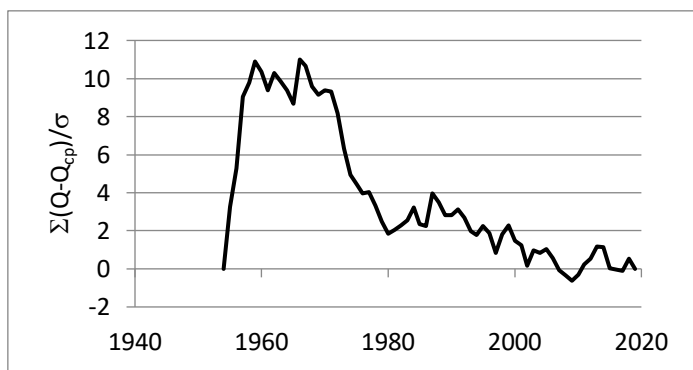
Видлица – с. Большие Горы



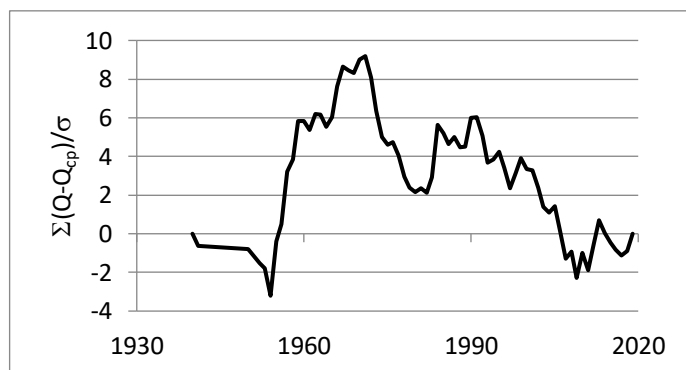
Воложба – д. Воложба



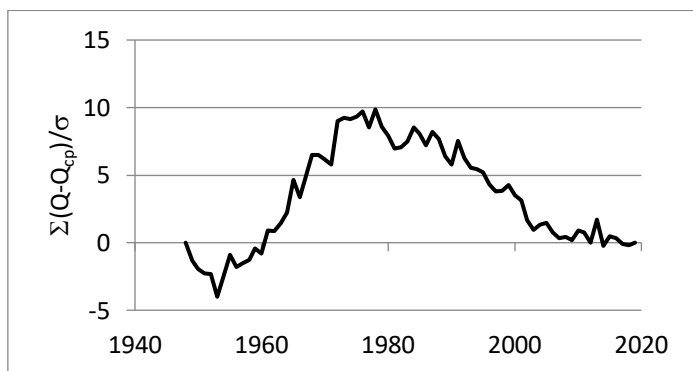
Воложба – д. Пареево



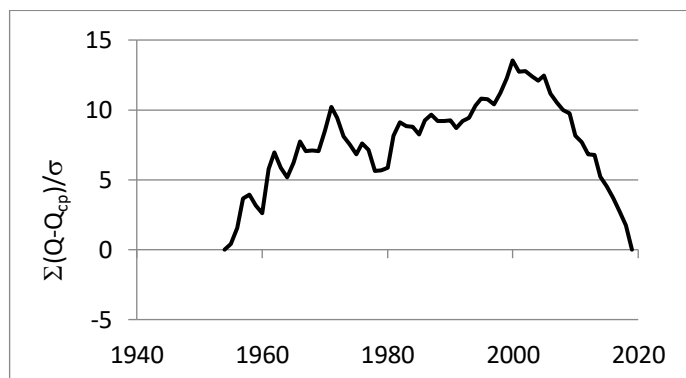
Вьюн – д. Запорожское



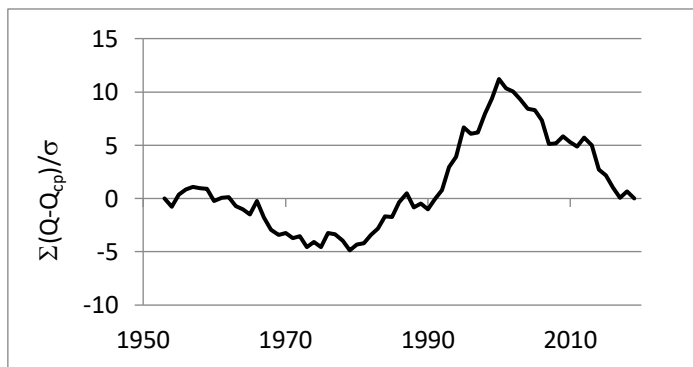
Гороховка – п. Токарево



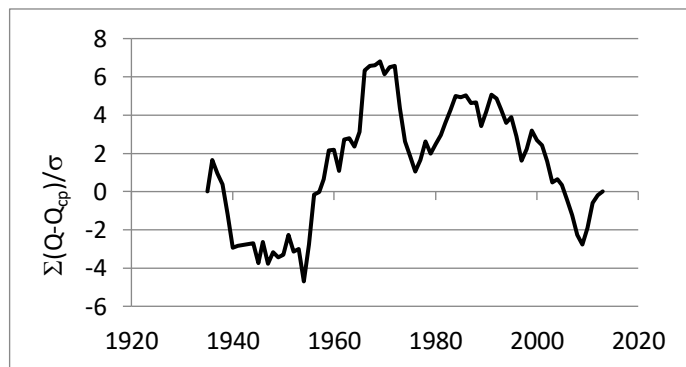
Дымка – д. Долмачево



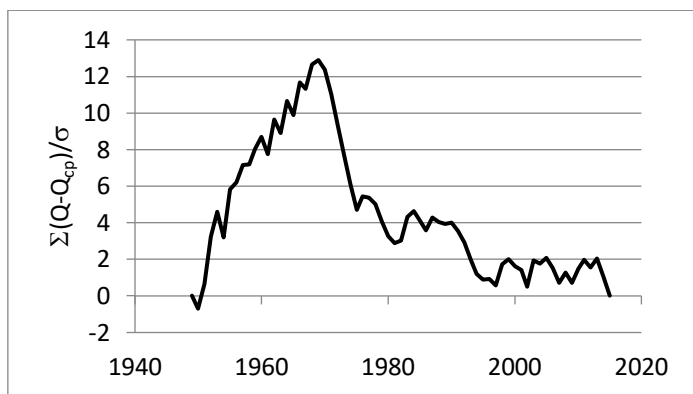
Ивина – пгт. Ладва



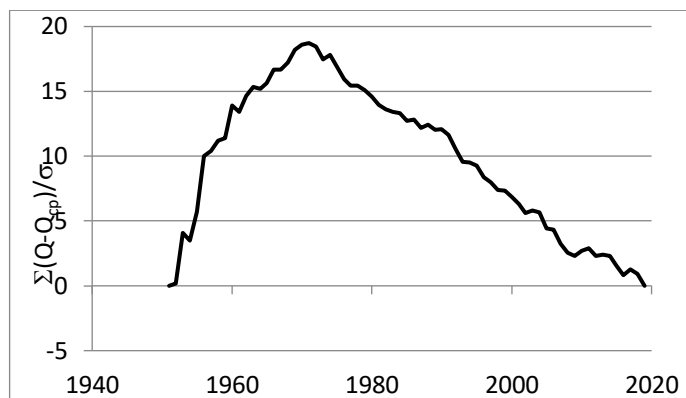
Капша – д. Еремина Гора



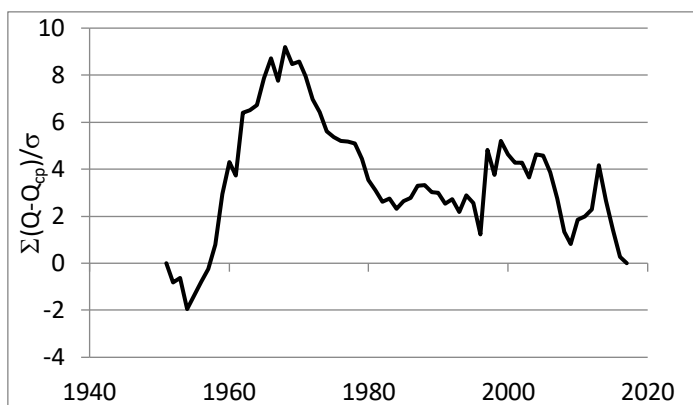
Кересть – д. Сяброницы



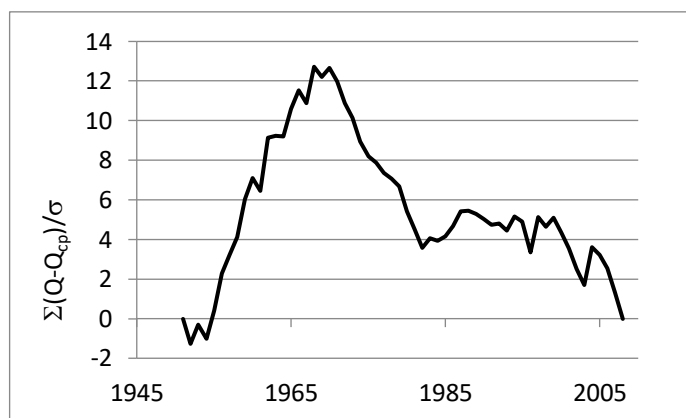
Коваши – д. Лендовщина



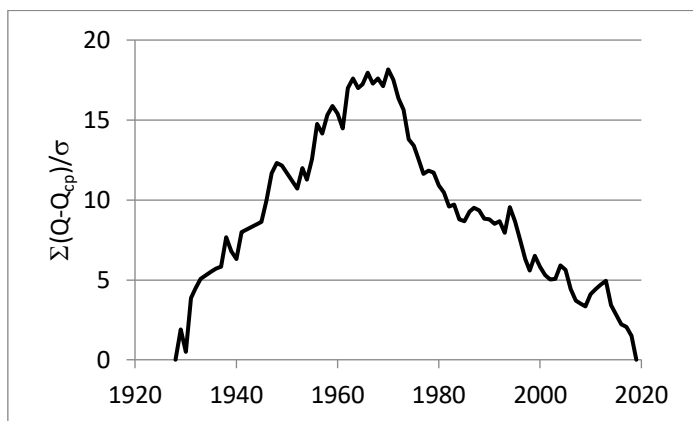
Кудеб – д. Севериково



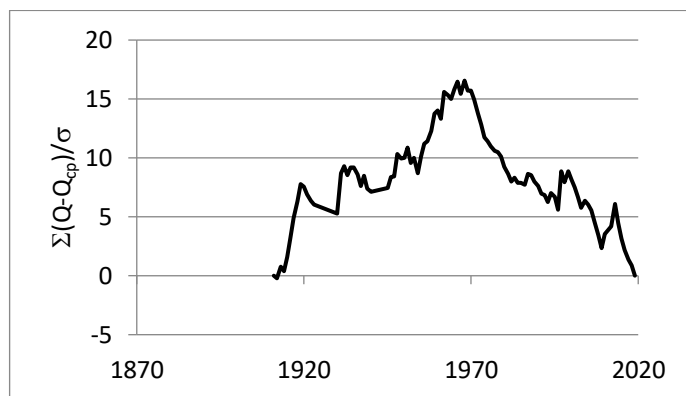
Кунья – г. Холм



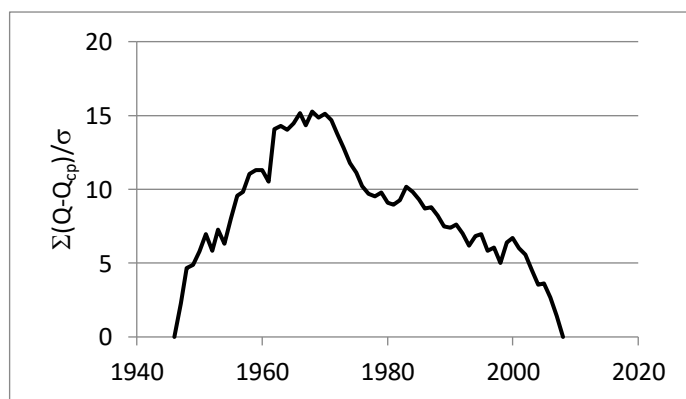
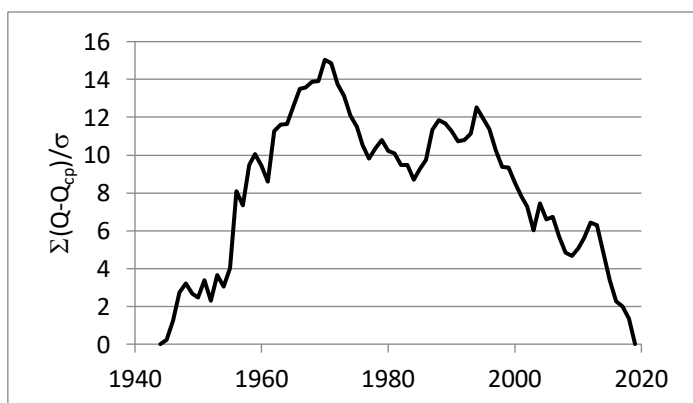
Кунья – д. Уварово



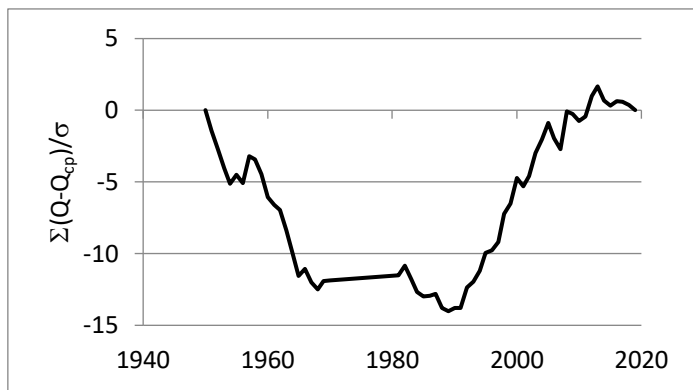
Ловать – г. Великие Луки



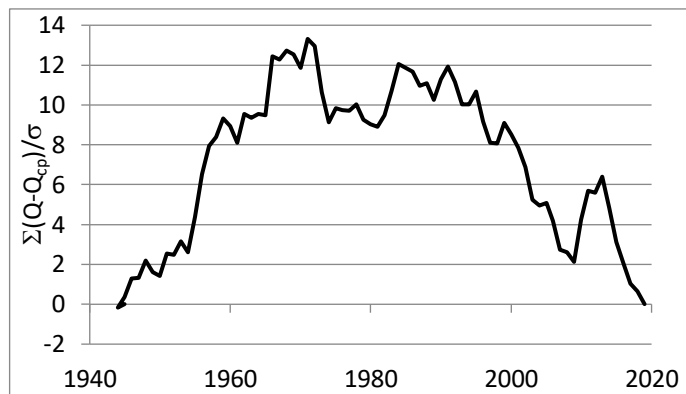
Ловать – г. Холм



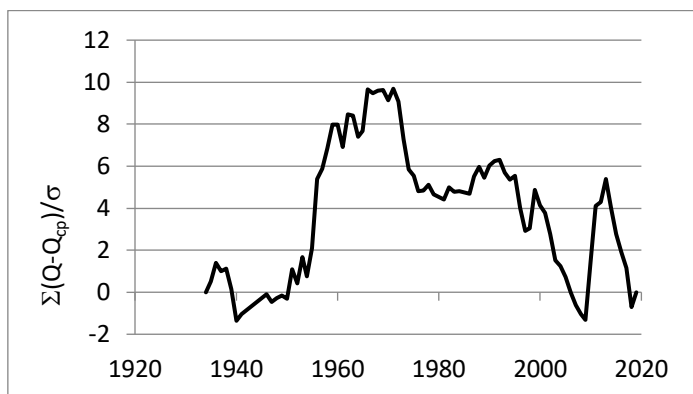
Ловать – д. Узкое



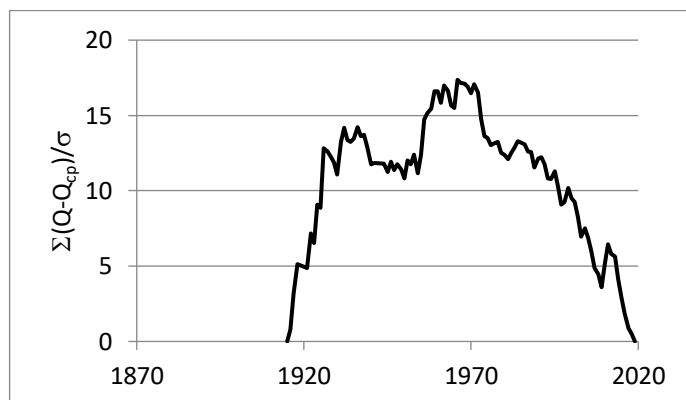
Локня – д. Бородино



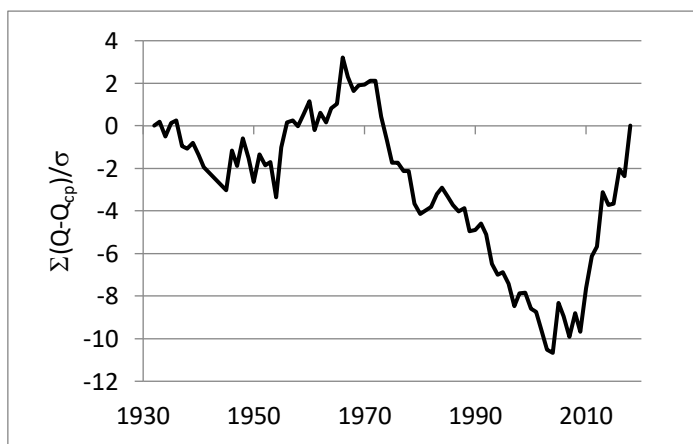
Лососинка – г. Петрозаводск



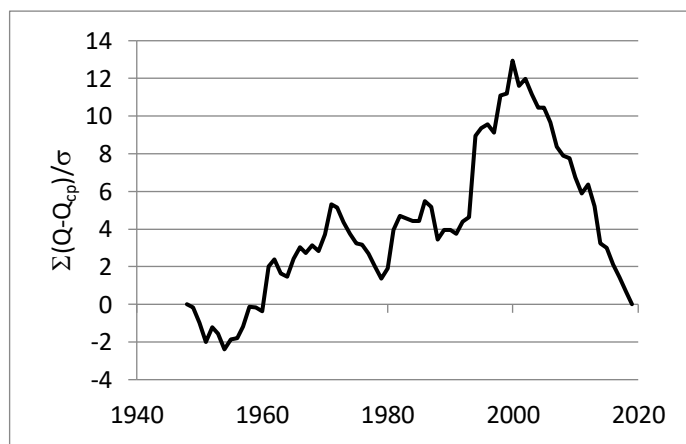
Луга – г. Кингисепп



Луга – г. Луга

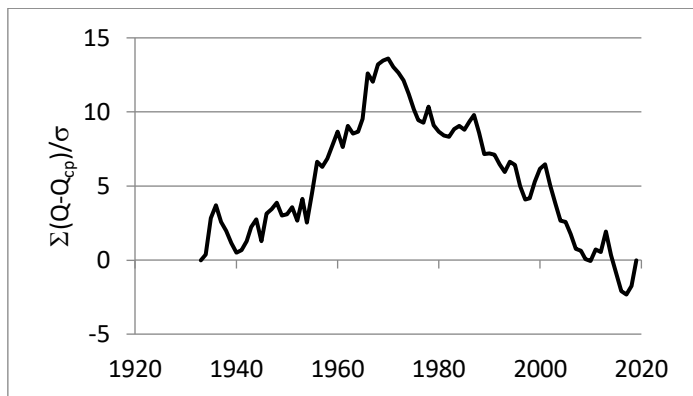


Луга – ст. Толмачево

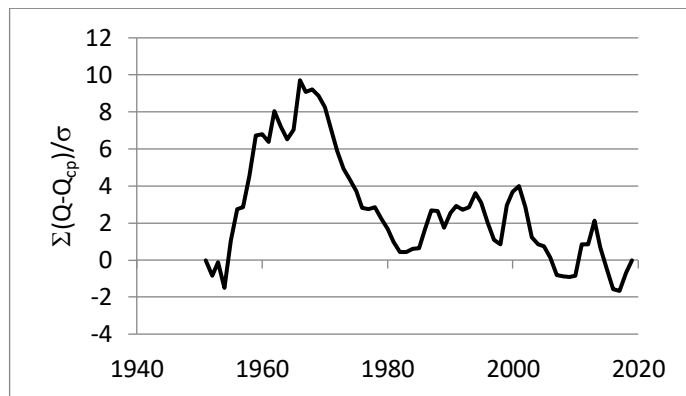


Мга – д. Горы

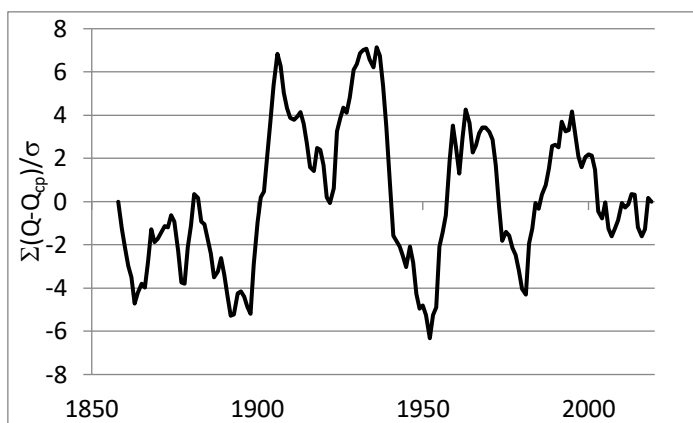
Мерега – д. Куйтежа



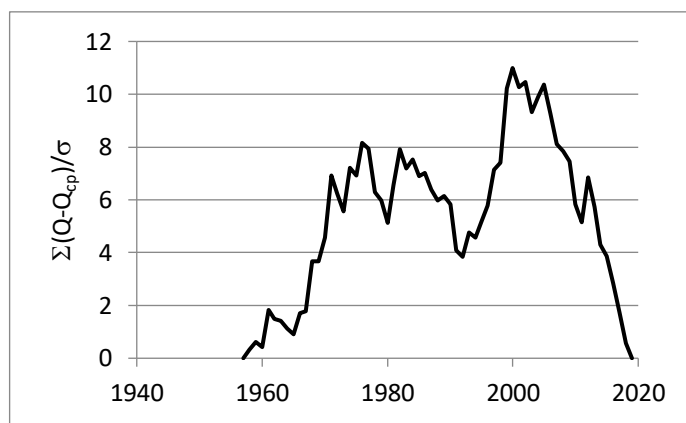
Мста – д. Девкино



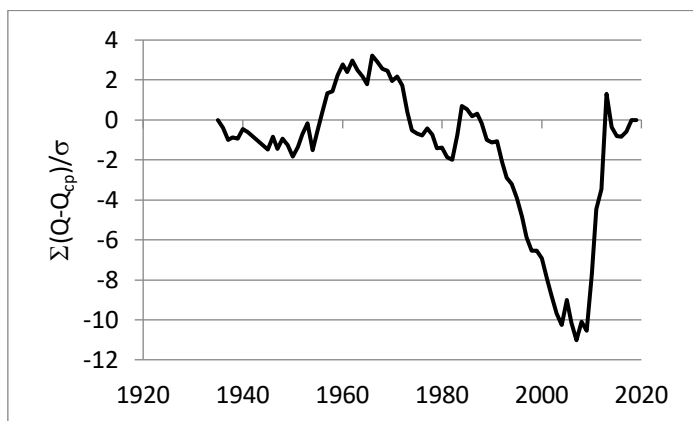
Мста – п. Потерпелицы



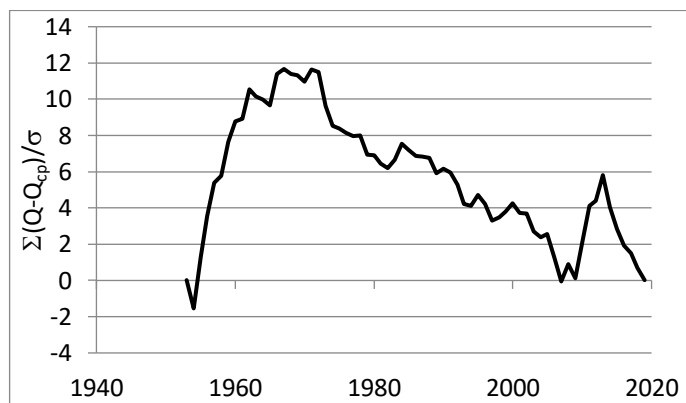
Нева – д. Новосаратовка



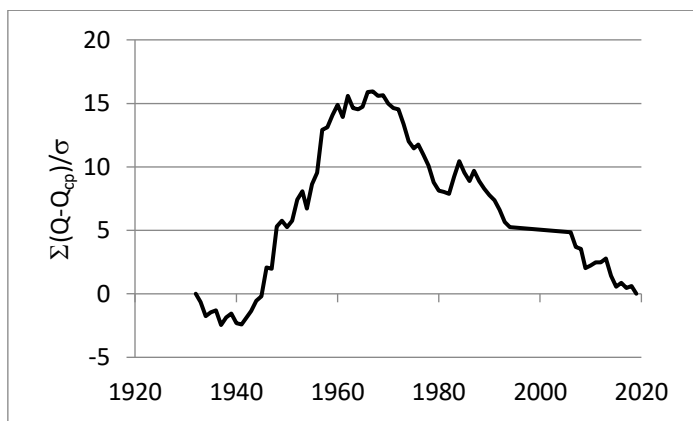
Немина – п. Немино



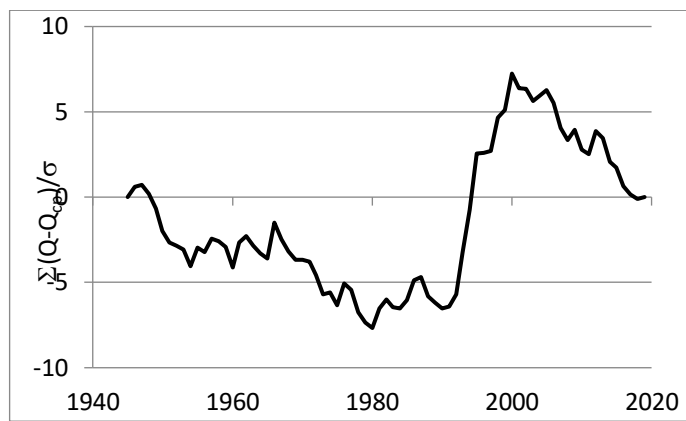
Оредеж – пгт. Вырица



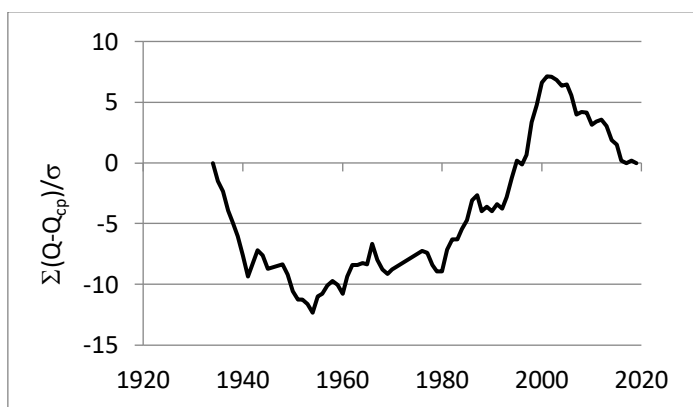
Орлинка – уроч. Орлинка



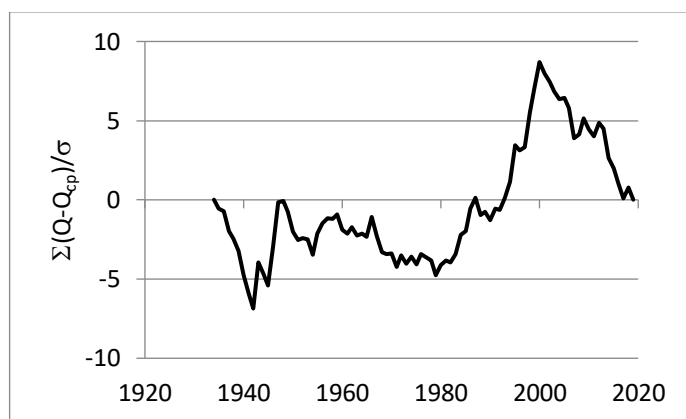
Охта – ж. Новое Девяткино



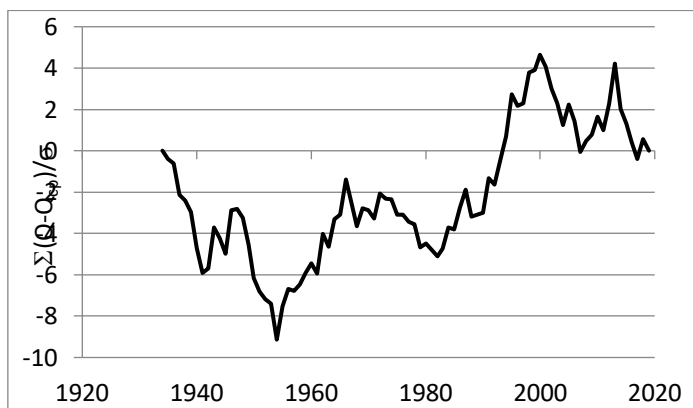
Оять – д. Мининская



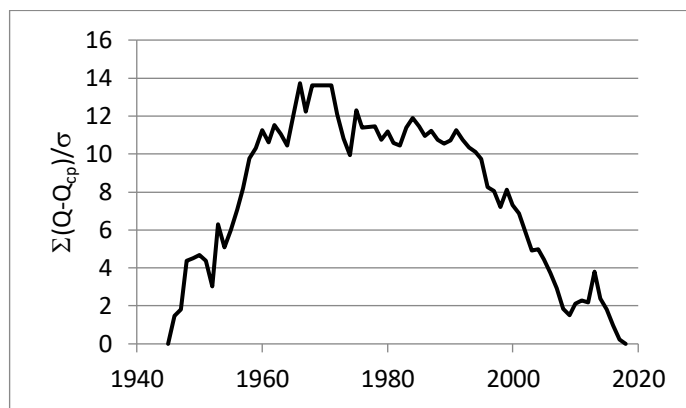
Оять – д. Акулова Гора



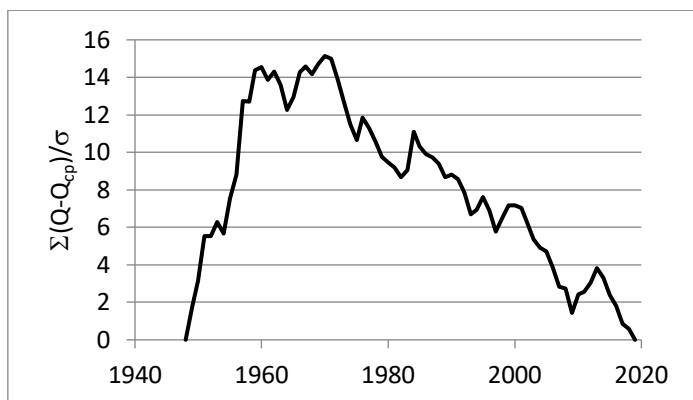
Паша – д. Дуброво



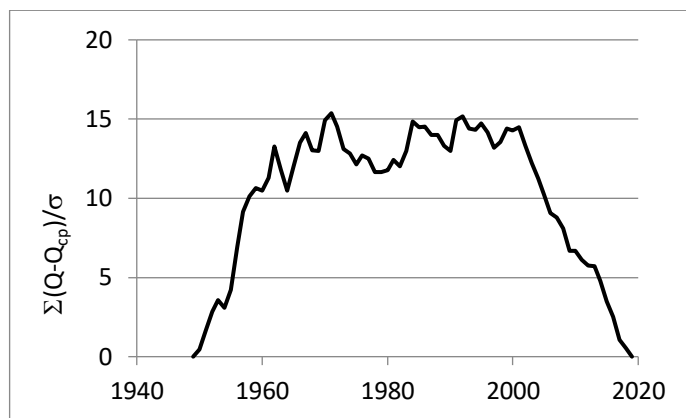
Паша – с. Часовенское



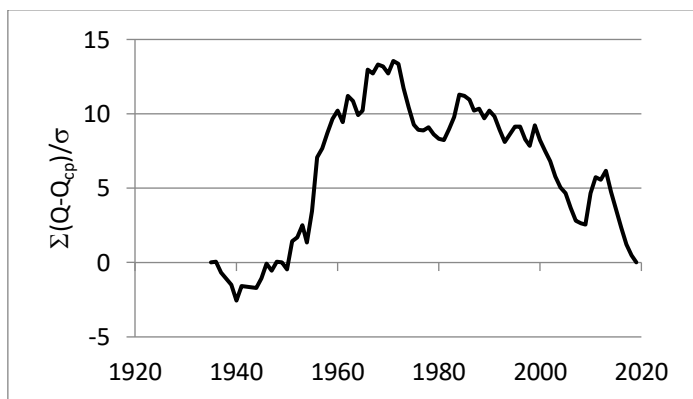
Перехода – д. Подсосонье



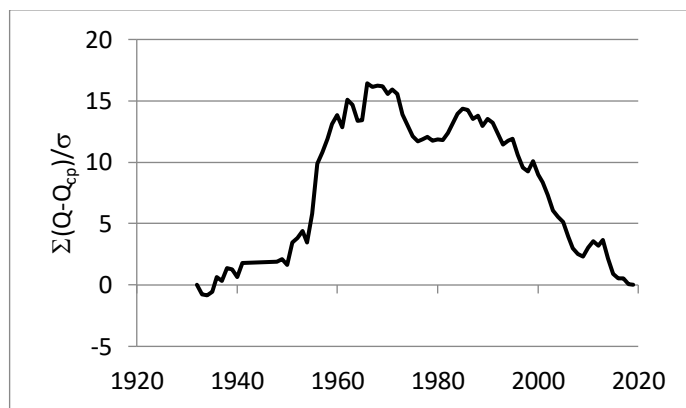
Петровка – п. Гончарово



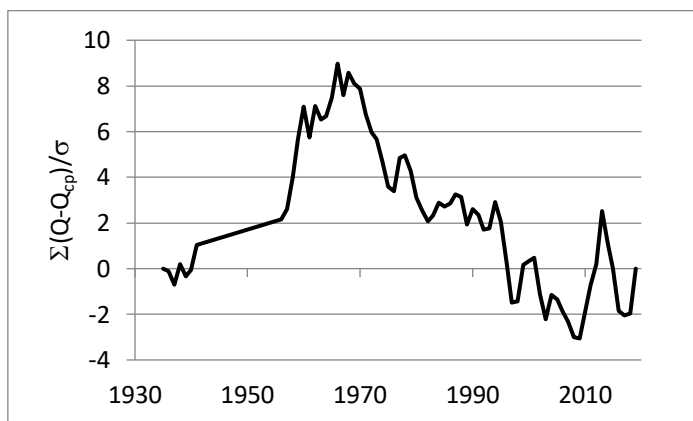
Петровка – п. Дружноселье



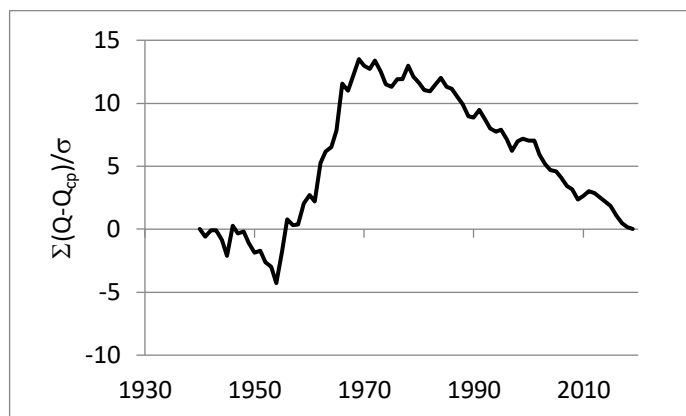
Плюсса – д. Брод



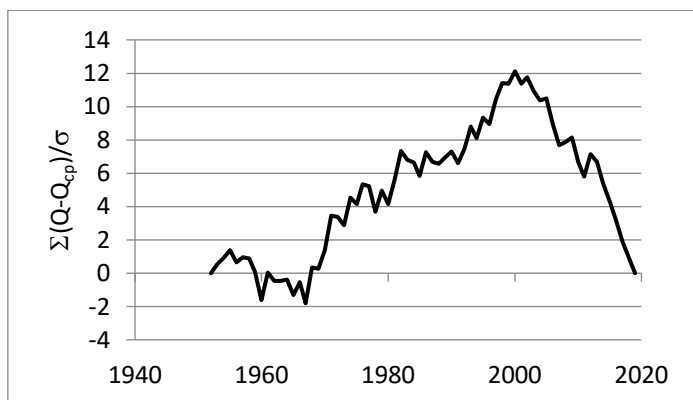
Плюсса – с. Плюсса



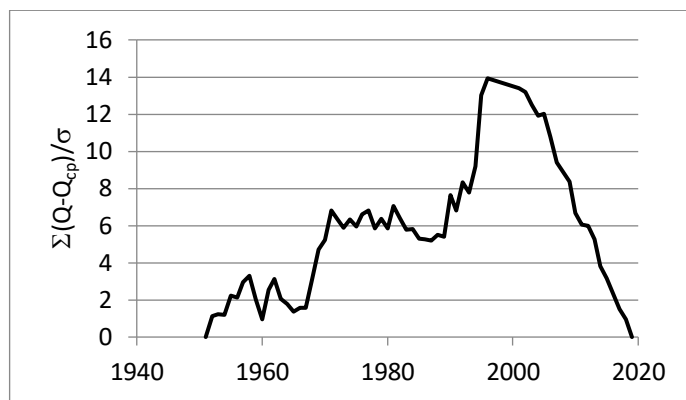
Пола – д. Налючи



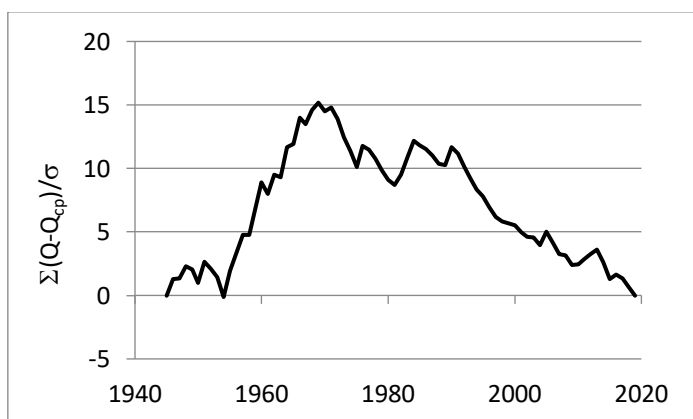
Пчевжа – д. Белая



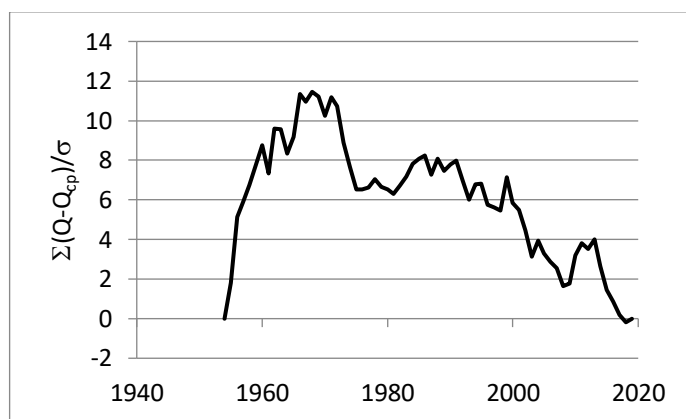
Пяльма – д. Пяльма



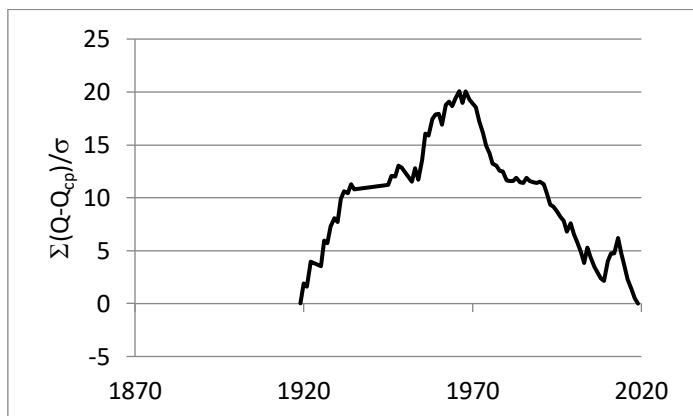
Рагнукса – д. Харловская



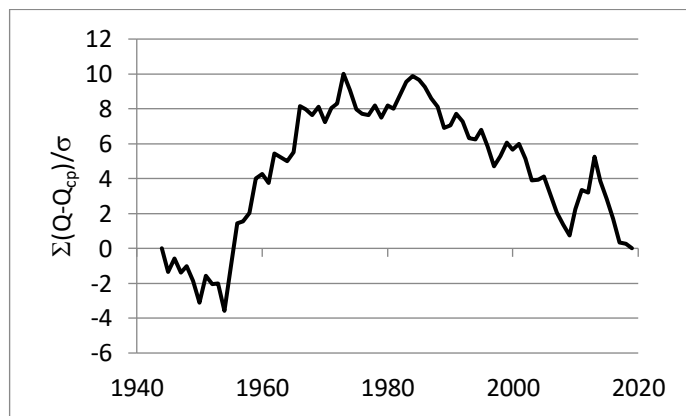
Систа – д. Среднее райково



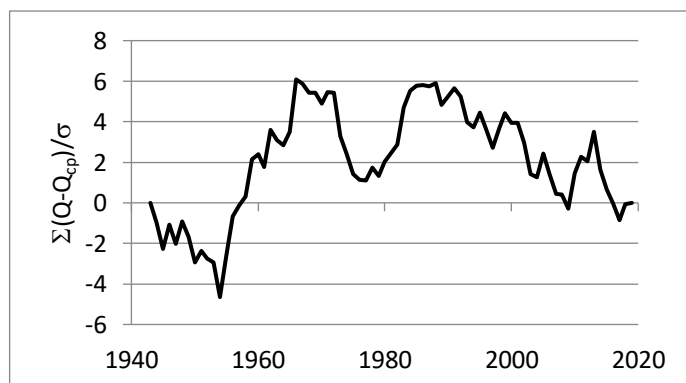
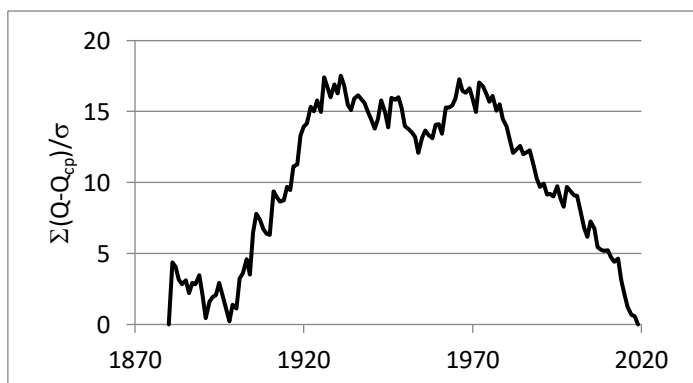
Ситня – д. Пески



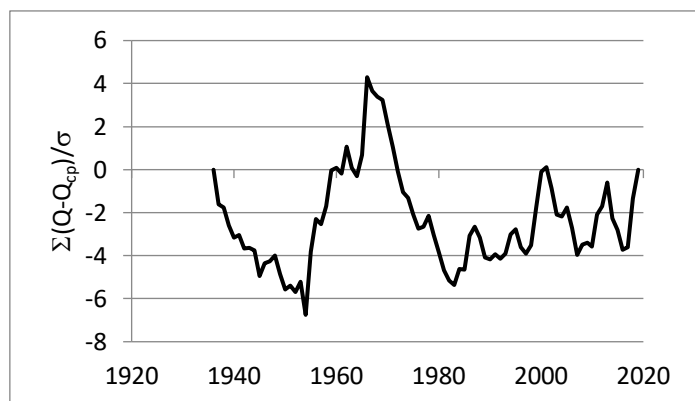
Сороть – д. Осинкино



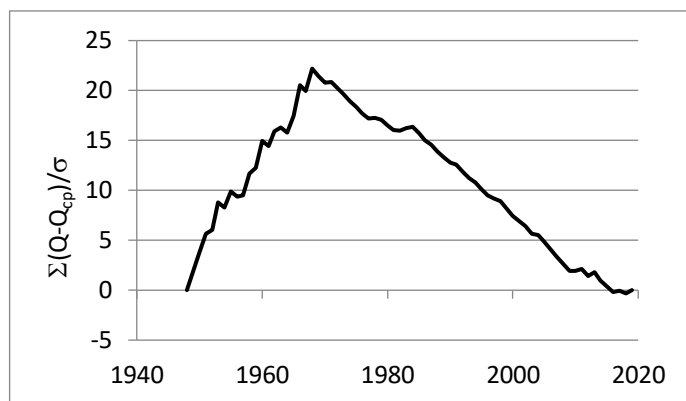
Тигода – ст. Любань



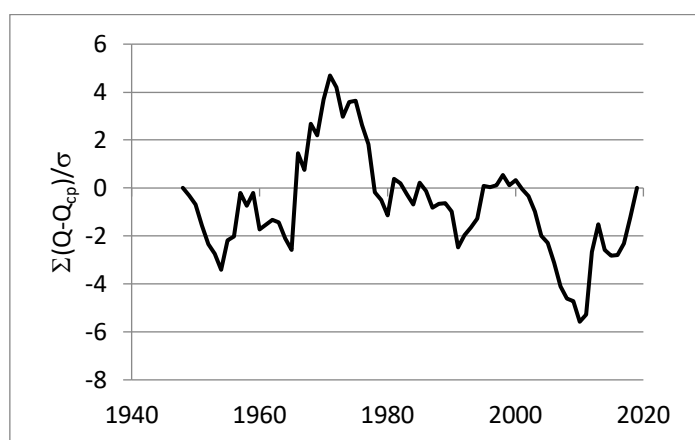
Тихвинка – д. Горелуха



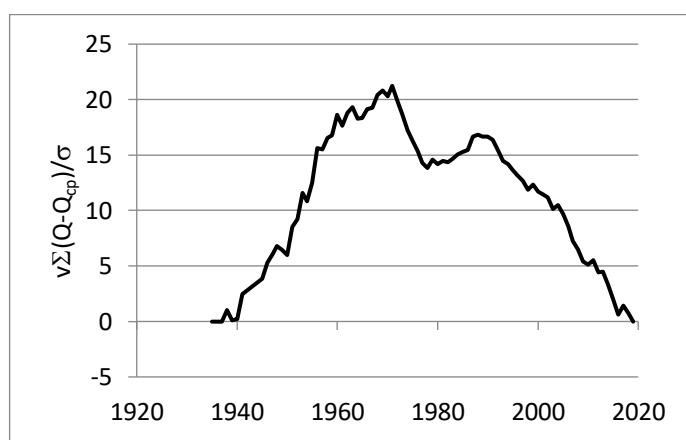
Тосна – ст. Тосно



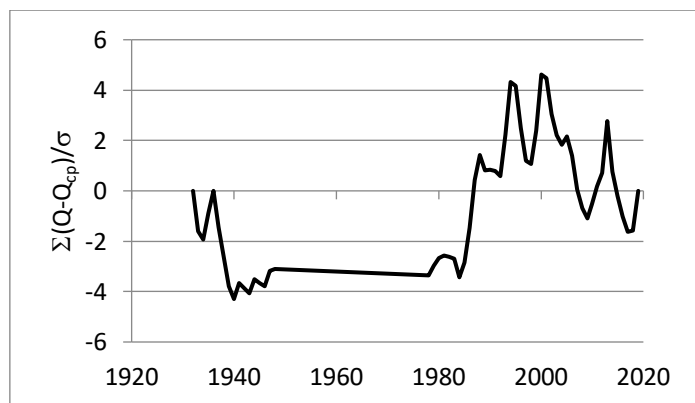
Уверь – д. Меглецы



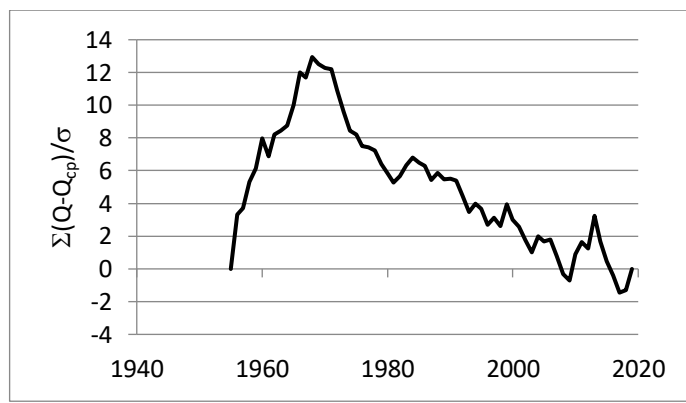
Уза – д. Дубская



Уница – с. Уница

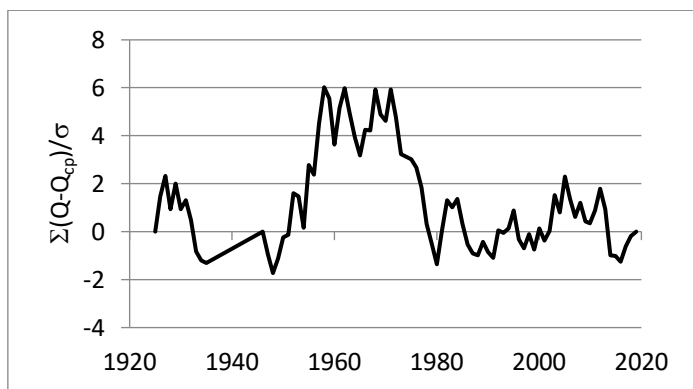


Утроя – д. Большая Губа

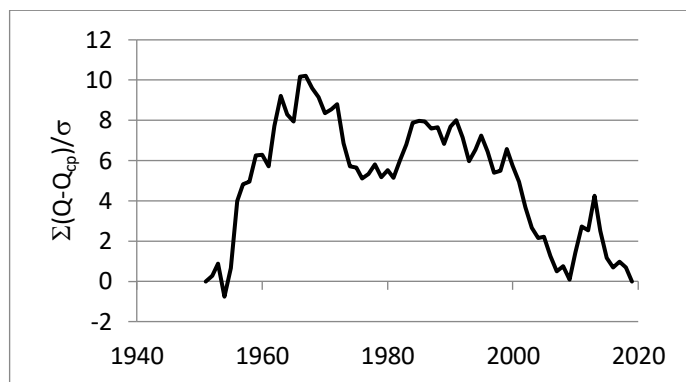


Цна – с. Жилотково

Шелонь – г. Порхов

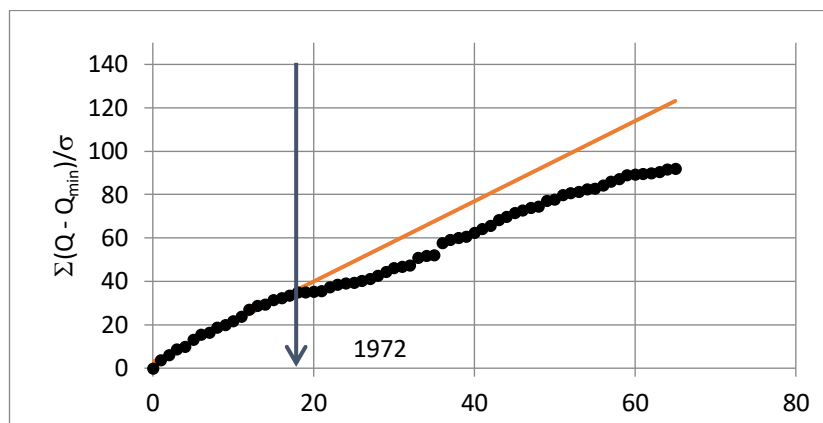


Шуя – д. Бесовец

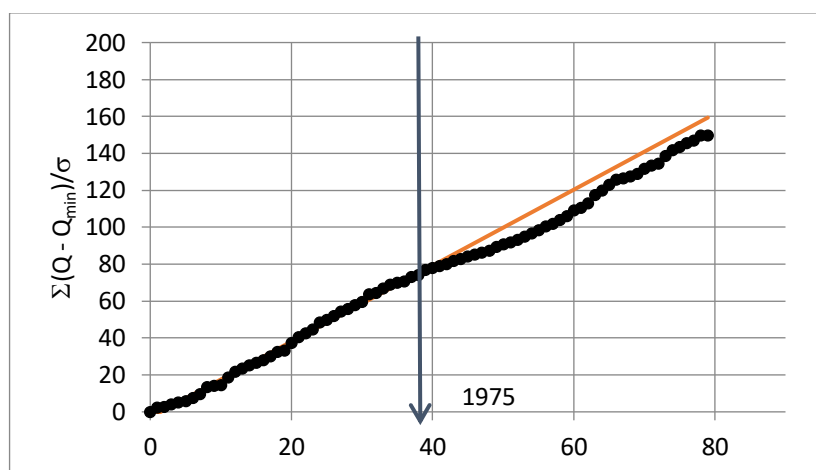


Ящера – д. Долговка

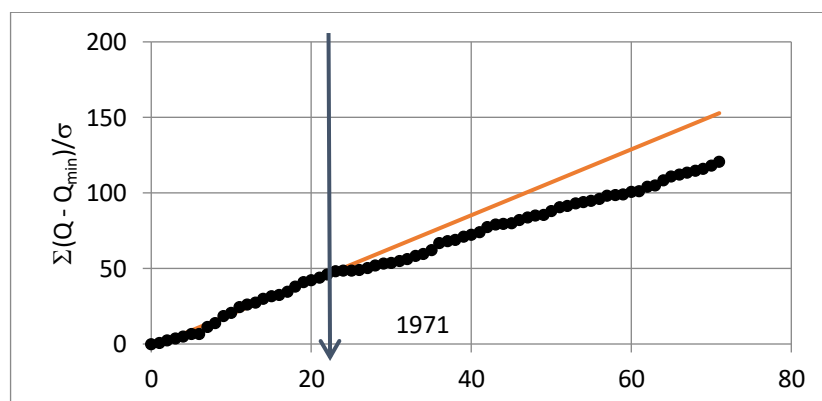
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Суммарные кривые максимальных расходов воды
весеннего половодья.



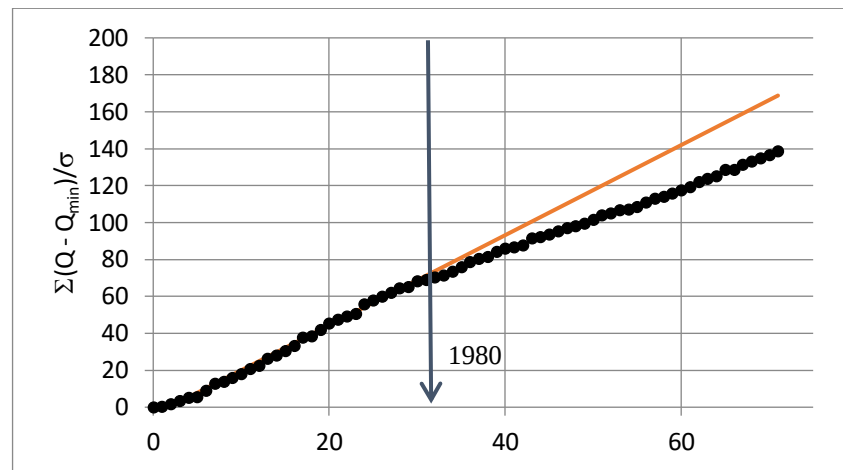
Авлога – д. Матокса



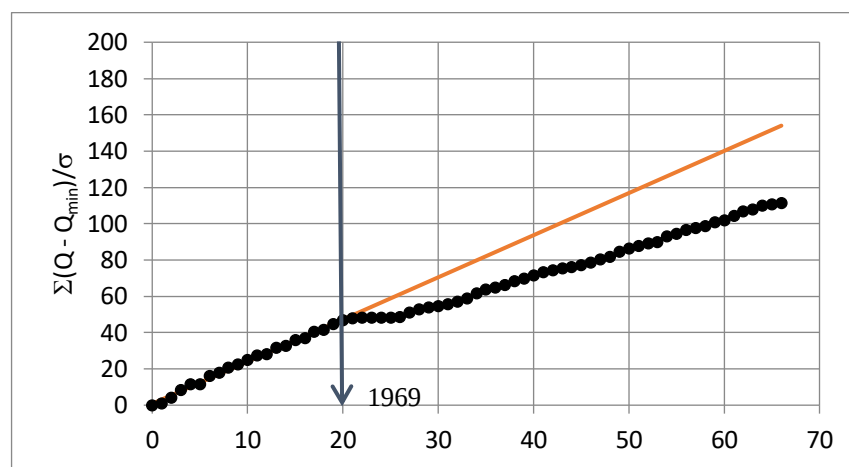
Воложба – д. Воложба



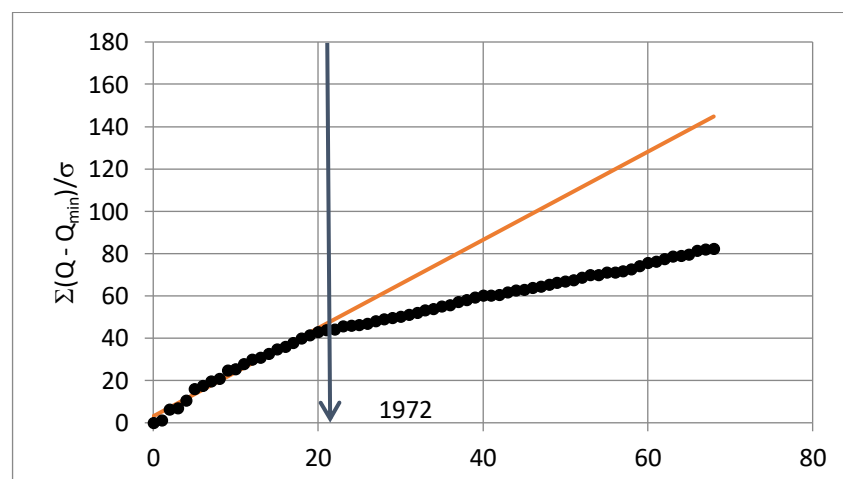
Гороховка – п. Токарево



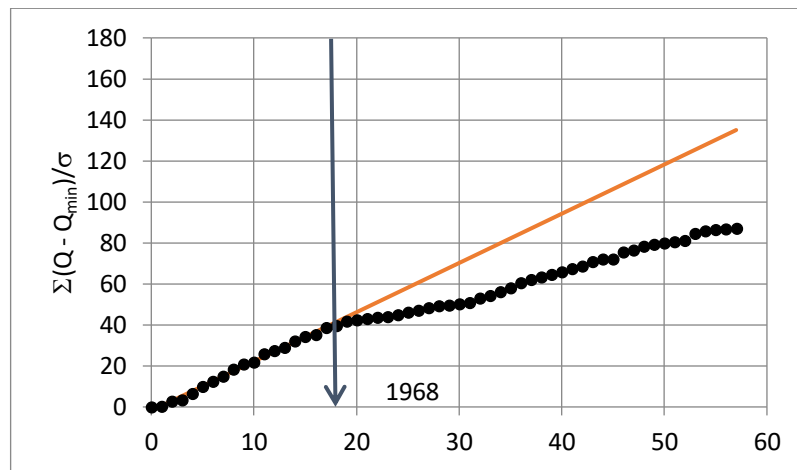
Дымка – д. Долмачево



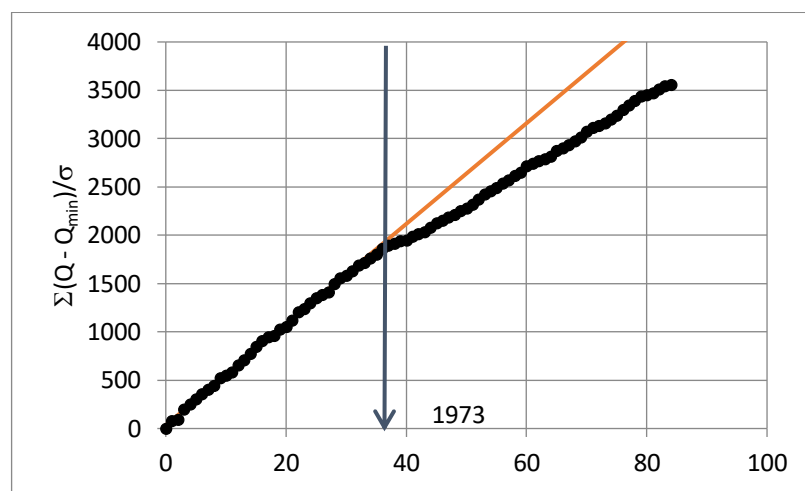
Коваши – д. Лендовщина



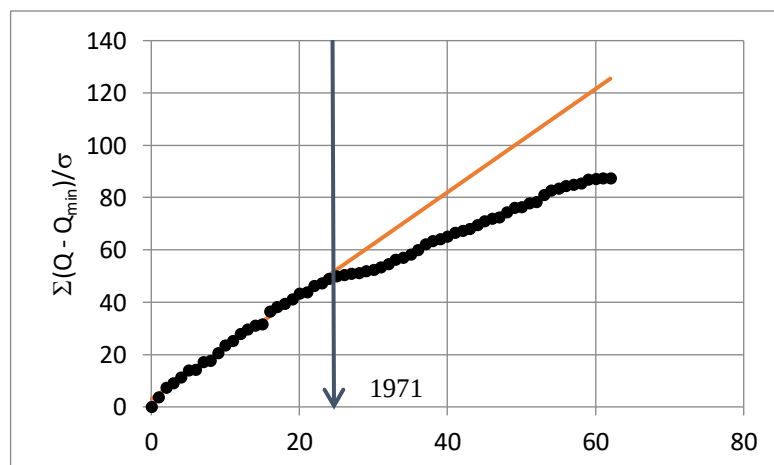
Кудеб – д.Севериково



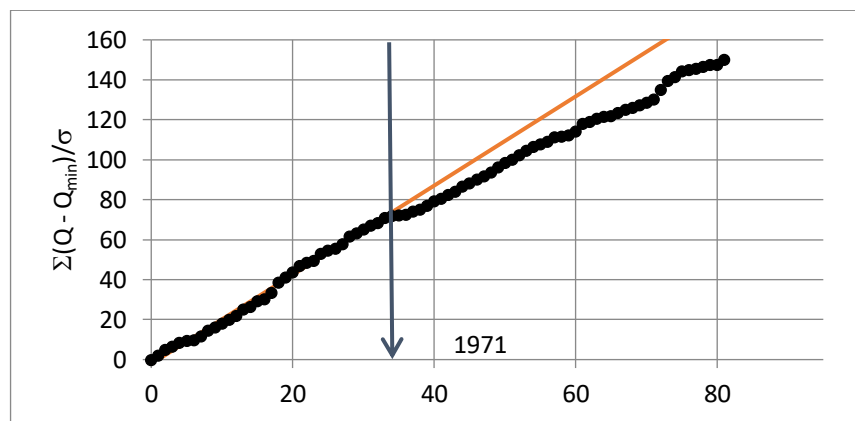
Кунья – д. Уварово



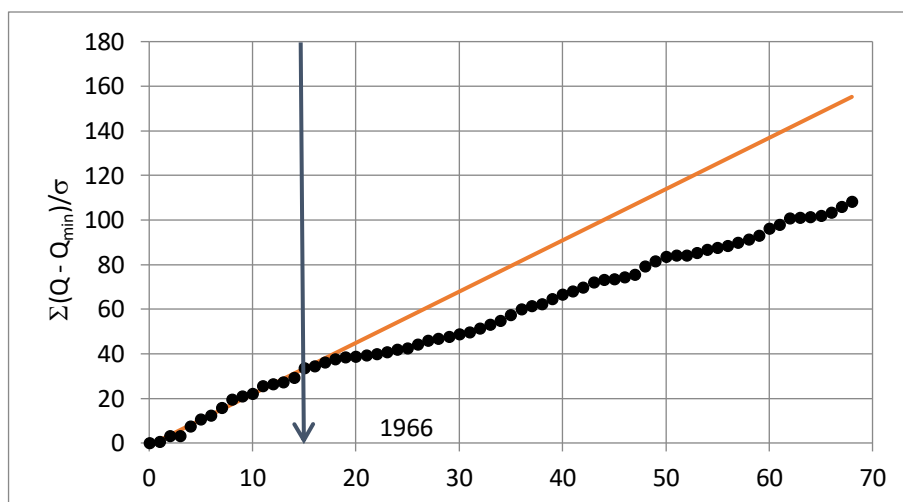
Ловать – г. Великие Луки



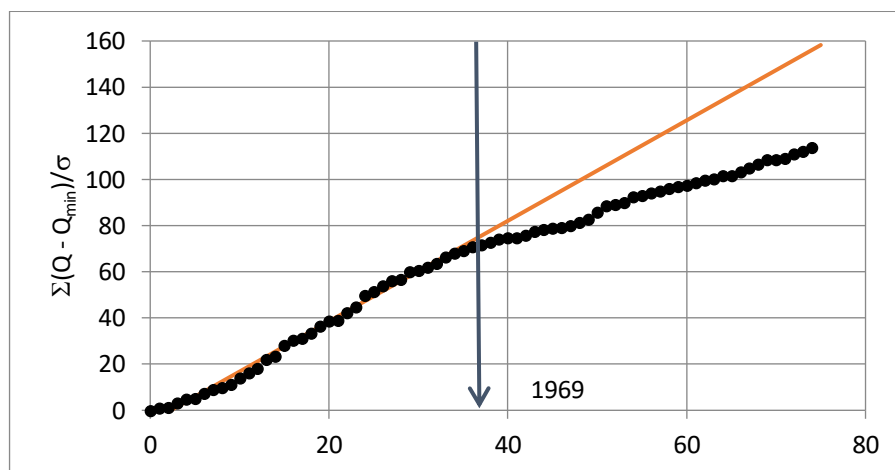
Локня – д. Бородино



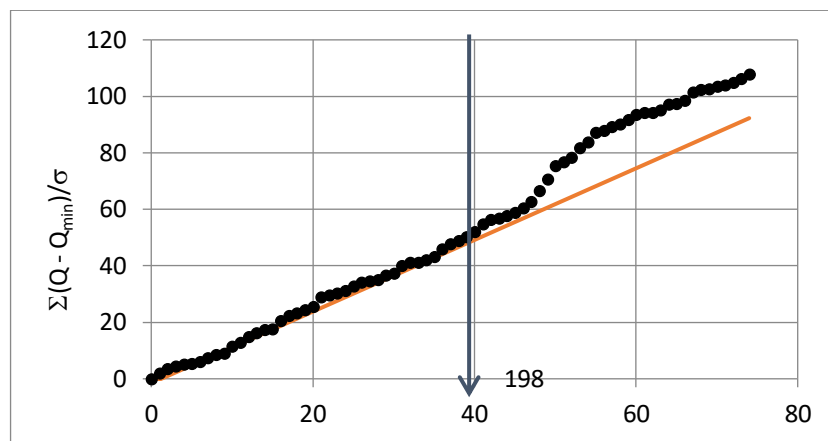
Луга – д. Луга



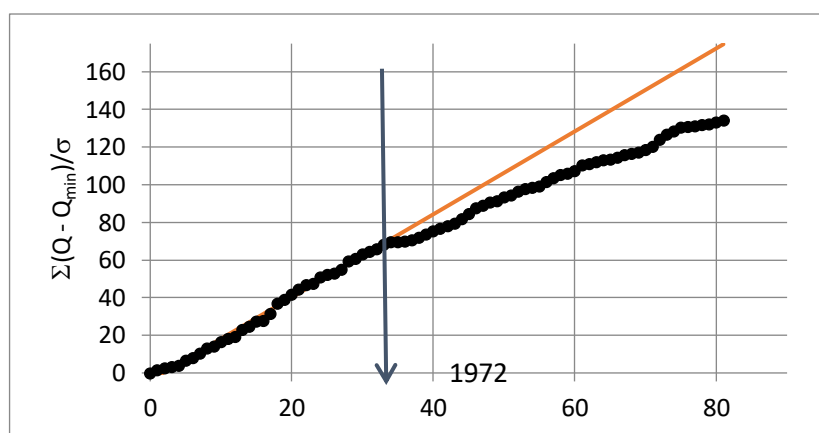
Мста – п. Потерпелицы



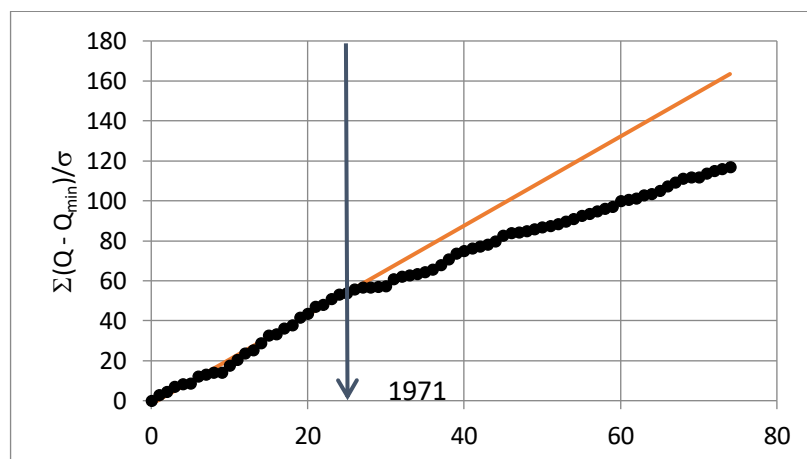
Охта – ж.Новое Девяткино



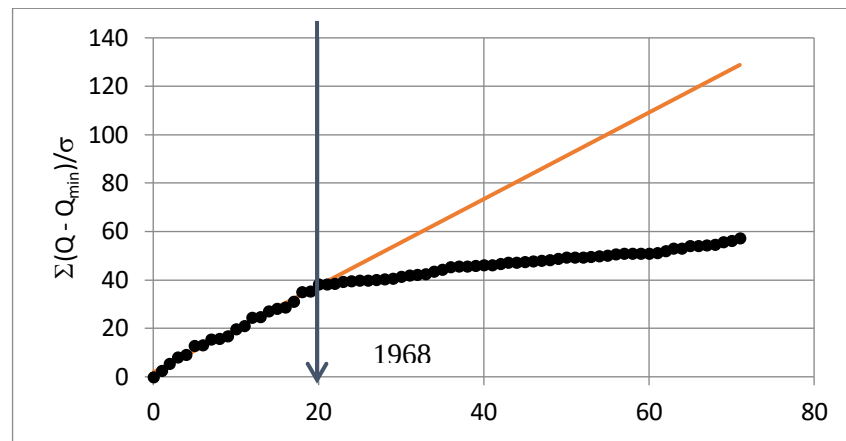
Оять – д. Мининская



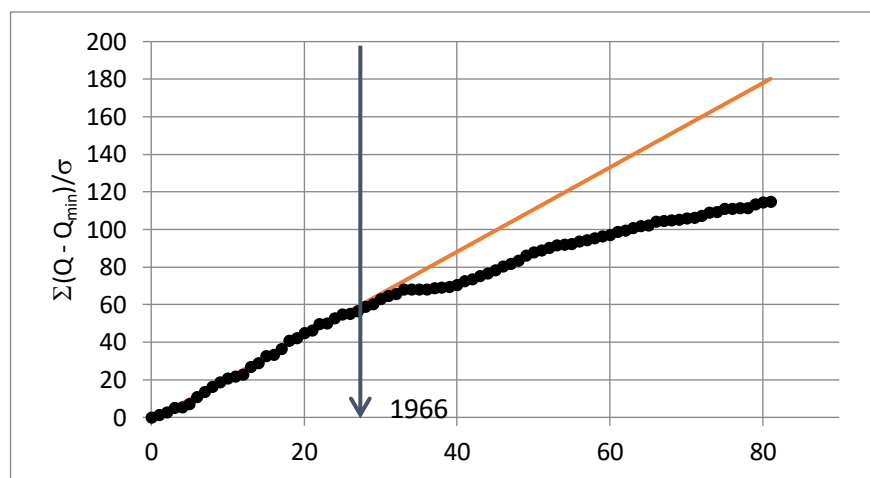
Плюсса – д. Брод



Систа – д. Среднее Райково



Уза – д. Дубская



Утроя – д. Большая Губа