МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Оценка изменчивости минимального стока на территории Республики Карелия**

Исполнитель Шемякин Артем Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.т.н, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Викторова Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«1» июня 2026 г.

Санкт–Петербург
2026

Содержание

Введение 4
1 Физико-географическое описание района 8
1.1 Местоположение 8
1.2 Рельеф 10
1.3 Климатическая характеристика 12
1.4 Гидрографическая характеристика 15
1.5 Гидрологический режим 19
2. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации 23
2.1 Методы оценки однородности 23
2.2 Оценка стационарности 26
2.3. Оценка выбросов 29
2.4. Оценка обеспеченных значений 32
3. Оценка изменчивости характеристик минимального зимнего и летнего стока 36
3.1 Оценка изменчивости характеристик минимального зимнего стока 36
3.1.1 Исходные данные 36
3.1.2 Оценка однородности 39
3.1.3 Оценка выбросов 43
3.1.4 Оценка обеспеченных значений 44
3.2 Оценка изменчивости характеристик минимального летне-осеннего стока 47
3.2.1 Исходные данные 47
3.2.2 Оценка однородности 48
3.2.3 Оценка выбросов 51
3.2.5 Оценка обеспеченных значений 51
Заключение 53
Список использованных источников 55

Приложение А. Основные гидрографические характеристики водоемов Республики Карелия 59
Приложение Б. Проверка наличия аномальных наблюдений за минимальным зимним стоком методом Ирвина 63
Приложение В. Проверка наличия аномальных наблюдений за минимальным летне-осенним стоком методом Ирвина 81

Введение

Актуальность темы исследования обусловлена возрастающей антропогенной нагрузкой на водные ресурсы и наблюдаемыми климатическими изменениями, которые оказывают существенное влияние на гидрологический режим рек. Минимальный сток, формирующийся в период межени, является критически важной характеристикой для устойчивого водопользования, обеспечения водообеспеченности населения и отраслей экономики, а также для сохранения водных экосистем. На территории Республики Карелия, отличающейся густой гидрографической сетью и высокой озерностью, водные ресурсы играют ключевую роль в социально-экономическом развитии региона. Однако изменчивость минимального стока под воздействием природных и антропогенных факторов изучена недостаточно, что затрудняет разработку эффективных водохозяйственных и природоохранных мероприятий. В условиях современного изменения климата и трансформации структуры водопотребления комплексная оценка многолетней и внутригодовой изменчивости минимального стока приобретает особую научную и практическую значимость.

Степень изученности проблемы отражена в ряде работ отечественных исследователей, посвященных вопросам формирования стока, гидрологического режима рек и водохозяйственной ситуации в Карелии. Вместе с тем, большинство существующих исследований фокусируются на средних и максимальных характеристиках стока, в то время как специфика формирования и пространственно-временная изменчивость минимального стока, особенно в разрезе зимнего и летне-осеннего сезонов, требуют более детального статистического анализа с использованием современных методов обработки длительных рядов наблюдений.

Новизна работы заключается в проведении комплексного статистического анализа многолетних рядов минимального зимнего и летне-осеннего

стока рек Карелии с позиций оценки их однородности, стационарности, наличия выбросов и обеспеченных значений. Работа предполагает систематизацию данных по сети гидрологических постов и выявление пространственных закономерностей изменчивости стоковых характеристик на территории республики.

Целью выпускной квалификационной работы является оценка пространственно-временной изменчивости характеристик минимального стока рек Республики Карелия за многолетний период.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Дать физико-географическую характеристику территории исследования с акцентом на климатические и гидрологические условия, определяющие формирование стока.

2. Систематизировать исходные данные о минимальном стоке (зимнем и летне-осеннем) по гидрологическим постам.

3. Провести оценку однородности и стационарности рядов минимального стока.

4. Выявить и проанализировать аномальные значения (выбросы) в рядах наблюдений.

5. Рассчитать обеспеченные значения минимального стока различной вероятности превышения.

6. Проанализировать и сопоставить пространственные закономерности изменчивости характеристик минимального зимнего и летне-осеннего стока.

Объект исследования: минимальный сток рек на территории Республики Карелия (южная часть).

Предмет исследования: пространственно-временная изменчивость статистических характеристик минимального зимнего и летне-осеннего стока.

Теоретической и методологической основой работы послужили фундаментальные труды в области гидрологии, теории вероятностей и математической статистики. В процессе исследования применялись следующие методы:

– Методы статистического анализа временных рядов: анализ однородности и стационарности гидрологических рядов с использованием параметрических и непараметрических критериев (критерии Стьюдента, Фишера).

– Методы выявления и анализа аномалий (выбросов): визуальный анализ графиков, использование квартильного размаха (метод Тьюки), критерий Ирвина.

– Методы расчета обеспеченности гидрологических характеристик: для обработки рядов минимального стока зимней и летне-осенней межени применялись два метода: 1) метод построения эмпирических кривых обеспеченности с последующей аппроксимацией теоретическим распределением (например, Крицкого-Менкеля); 2) аналитический метод расчета параметров кривых обеспеченности на основе моментов распределения. Сравнительный анализ результатов, полученных разными методами, является важной частью работы.

– Графические методы: построение графиков временных рядов, кривых обеспеченности, карт-схем расположения постов и пространственного распределения рассчитанных характеристик для наглядного представления результатов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования органами государственного управления (Министерство природных ресурсов и экологии РК), проектными и водохозяйственными организациями при обосновании мероприятий по рациональному использованию и охране водных ресурсов, оценке водообеспеченности, проектировании гидротехнических сооружений и экологическом мониторинге. Результаты также могут быть востребованы для верификации и калибровки гидрологических моделей в условиях меняющегося климата.

Эмпирическую базу исследования составили фактические данные ежедневных расходов воды с сети гидрологических постов на территории Республики Карелия за многолетний период, на основе которых были выделены и сформированы ряды минимальных расходов для двух меженных сезонов: зимнего (обычно март-апрель) и летне-осеннего (август-октябрь).

1 Физико-географическое описание района

1.1 Местоположение

Республика Карелия представляет собой уникальный субъект Российской Федерации, занимающий стратегически важное пограничное положение на северо-западе страны. В административном отношении она входит в состав Северо-Западного федерального округа, гранича с четырьмя регионами России: Мурманской областью на севере, Архангельской на востоке, Вологодской на юго-востоке и Ленинградской на юге [1]. Западная граница республики является государственной, протяженностью свыше 700 км, и отделяет ее от Финляндской Республики. Это обстоятельство исторически и экономически формирует особые трансграничные отношения, особенно актуальные в сфере совместного управления водными ресурсами многочисленных речных бассейнов, общих для обеих стран. Такое положение накладывает специфические обязательства в области мониторинга, использования и охраны вод, что делает исследования речного стока в Карелии, включая его минимальные характеристики, элементом международного гидрологического сотрудничества.

С гидрографической и общегеографической позиций местоположение Карелии определяется ее ключевой принадлежностью к двум морским бассейнам: Балтийского и Белого морей, а также нахождением в пределах древней Балтийской кристаллической глыбы (щита) [5]. Территория республики имеет отчетливо выраженную меридиональную вытянутость примерно на 650 км, что создает значительный градиент природных условий с севера на юг. На севере она широким фронтом выходит к акватории Белого моря, а на юге включает в себя значительные части котловин крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского. Общая площадь Карелии составляет около 180.5 тыс. км², и примерно 16% этой территории, или порядка 18 тыс. км², постоянно занято водной поверхностью озер, водохранилищ и рек [1]. Этот показатель озерно-

сти является одним из самых высоких в мире и служит фундаментальной характеристикой ландшафта. Крайний юго-восточный угол республики, хотя и незначительный по площади, относится к бассейну Каспийского моря, входя в водосборный бассейн реки Волги через систему притоков. Эта деталь подчеркивает сложность и гидрографическое своеобразие региона, расположенного на водоразделе трех морей.

Особое значение для формирования гидрологических условий, включая режим минимального стока, имеет непосредственное положение Карелии относительно крупнейших пресноводных водоемов континента. В административных границах республики находится около 80% акватории Онежского озера и до 40% акватории Ладожского озера [1]. Эти водоемы-гиганты выполняют функцию колоссальных естественных регуляторов, аккумулируя сток в многоводные фазы и отдавая его в засушливые периоды. Их влияние на внутригодовое распределение водности впадающих и вытекающих рек, а также на микроклимат прилегающих территорий, является определяющим. Распределение формирующегося на территории Карелии речного стока по направлениям стока неравномерно: около 55% водных ресурсов поступает в Белое море, 25% – в Онежское озеро и 20% – в Ладожское [1]. Такая структура стока обуславливает различия в гидрологических режимах рек, принадлежащих к разным бассейнам, что необходимо учитывать при районировании и оценке изменчивости минимального стока.

Геополитическое и экономико-географическое положение Карелии в макрорегиональном контексте традиционно характеризуется как периферийное относительно основных индустриальных и демографических центров европейской части России. Однако это компенсируется исключительным богатством природно-ресурсного потенциала, среди которого водные ресурсы занимают первое место по своему объему, возобновляемости и стратегическому значению. Водообеспеченность территории, согласно исследованиям, оценивается как в 1.2 раза превышающая среднюю по Российской Федерации на единицу площади и в 2.8 раза – на одного жителя [1]. Такой высокий показа-

тель создает не только прочную основу для существующего комплекса водоемких производств (целлюлозно-бумажная промышленность, металлургия, гидроэнергетика), но и открывает долгосрочные перспективы для рассмотрения региона в качестве стратегического «водного донора» в условиях возможного дефицита водных ресурсов в других частях страны и мира. В этой связи всестороннее изучение количественных и качественных параметров стока, и особенно его минимальных, лимитирующих значений, приобретает характер фундаментальной задачи, имеющей практическое значение для национальной безопасности и устойчивого развития.

Физико-географическое местоположение Карелии, таким образом, является комплексным фактором, который предопределяет не только климатические и гидрологические особенности формирования водных ресурсов, но и специфику их пространственного распределения, сезонную динамику, а также основные векторы и ограничения их хозяйственного использования. Высокая степень озерности и заболоченности, обилие поверхностных вод, положение в зоне избыточного увлажнения на кристаллическом фундаменте – все эти черты, унаследованные от ледниковой истории и тектонического строения, делают Карелию уникальным полигоном для исследований в области гидрологии суши, в частности, для анализа закономерностей изменчивости минимального меженного стока.

1.2 Рельеф

Рельеф Республики Карелия представляет собой классический пример пластово-денудационной равнины, сформированной в условиях длительного воздействия континентального оледенения на кристаллический фундамент Балтийского щита [22]. Основу орографической структуры территории составляют докембрийские породы – граниты, гнейсы, кварциты и диабазы, возраст которых превышает 1.5 миллиарда лет. Эти жесткие кристаллические породы, выходящие на поверхность, определяют общую устойчивость и малую расчле-

ненность рельефа, а их высокая плотность и низкая водопроницаемость напрямую влияют на условия инфильтрации атмосферных осадков и формирования подземного питания рек. Абсолютные отметки высот на большей части территории варьируются в пределах 100 – 200 метров над уровнем моря, что относит Карелию к низкогорно-холмистой стране. Максимальные высоты сосредоточены на западе республики, где расположены кряжи Ветреный Пояс (до 344 м) и Маанселькя (финская часть которого продолжается на территорию Карелии), а также возвышенности Западно-Карельская и Олонецкая [28]. Наименьшие высоты приурочены к побережьям Белого моря, Ладожского и Онежского озер, формируя общий наклон территории с запада на восток и юго-восток.

Наиболее яркой и гидрологически значимой чертой рельефа Карелии являются многочисленные следы четвертичного оледенения. Деятельность ледников, их активная экзарация и последующая аккумуляция материала при отступлении создали специфический комплекс ледниковых, водно-ледниковых и озерно-ледниковых форм [30]. Повсеместно распространены моренные холмы и гряды, камовые поля, озовые гряды, вытянутые на многие километры. Особое значение имеют ложбины стока талых ледниковых вод, часто унаследованные современной речной сетью. Именно в этих понижениях, выработанных в относительно податливых породах, сформировались котловины подавляющего большинства озер, что обусловило феноменальную озерность региона. Глубокое воздействие ледника также проявилось в обработке скальных выходов – «бараньих лбов» и курчавых скал, которые сегодня часто определяют характер русел рек, создавая пороги и перекаты, влияющие на гидравлику потока и условия зимнего замерзания [25]. Эти неровности коренного ложа, перекрытые маломощными четвертичными отложениями (мореной, песками, суглинками), формируют сложную мозаику водосборных поверхностей с разной фильтрационной способностью.

Четвертичные отложения, маломощные и прерывистые, играют ключевую роль в дифференциации условий стокообразования. На междуречьях распространены валунные суглинки, обладающие относительно низкой водопроницаемостью, что способствует быстрому формированию поверхностного

стока. В понижениях рельефа, особенно в древних ложбинах и озерных котловинах, широко развиты водно-ледниковые пески и супеси, образующие обширные зандровые равнины. Высокая инфильтрационная способность этих отложений способствует активному пополнению грунтовых вод, которые затем разгружаются в речную сеть, становясь важным источником питания в меженные периоды [5]. Значительные площади, особенно в центральных и северных районах, заняты болотами, приуроченными к плоским, слабодренированным водоразделам или бывшим приледниковым водоемам. Болотные массивы выполняют функцию гигантских природных губок, аккумулирующих влагу в многоводные периоды и медленно отдающих ее в реки в межень, существенно сглаживая внутригодовую неравномерность стока [8]. Таким образом, рельеф Карелии в сочетании с геологическим строением предопределяет исключительную сложность и мозаичность гидрологических условий. Невысокие, но всхолмленные водоразделы, густая сеть озерных котловин, соединенных короткими порожистыми протоками, и обширные заболоченные пространства создают уникальный ландшафт, где процессы поверхностного и подземного стока тесно переплетены. Эта естественная зарегулированность водного режима, непосредственно вытекающая из особенностей рельефа, является определяющим фактором для формирования как высокой средней водности рек, так и специфики их минимального стока, который в значительной мере поддерживается запасами воды в озерах и болотах, накопленными в предшествующие более влажные сезоны.

1.3 Климатическая характеристика

Климат Республики Карелия, определяющий фундаментальные условия формирования речного стока, относится к умеренно континентальному типу с отчетливым влиянием атлантических воздушных масс и смягчающим воздействием акваторий Белого и Балтийского морей. Эта ключевая особенность, наряду с протяженностью территории в меридиональном направлении, фор-

мирует пространственные градиенты основных метеорологических элементов, которые прямым образом отражаются на характеристиках водного режима, в том числе на величине и изменчивости минимального стока [22]. Среднегодовая температура воздуха на большей части территории близка к плюс 2°С, демонстрируя устойчивый рост с северо-запада на юго-восток. Так, в северных районах, например, в районе Кандалакши, этот показатель составляет около 0°С, в то время как в Приладожье может достигать плюс 3.5°С [28]. Ярко выражена сезонность: средняя температура июля колеблется от плюс 13 – 14°С на севере до плюс 16 - 17°С на юге, а января – от минус 12°С на западе до минус 14°С и ниже в восточных, более континентальных районах. Абсолютный минимум температур может опускаться ниже минус 45°С, что оказывает критическое влияние на продолжительность и глубину промерзания почвогрунтов, а значит, и на условия подземного питания рек в зимний период [22].

Режим увлажнения и атмосферных осадков выступает в качестве основного стокообразующего фактора. Карелия располагается в зоне избыточного увлажнения, где величина испарения существенно ниже годовой суммы осадков. Среднегодовое количество осадков варьирует от 500 – 550 мм на востоке и севере до 650 – 700 мм на западе, в районе возвышенностей, и может превышать 750 мм на наветренных склонах Западно-Карельской возвышенности [17]. Существенное значение имеет их сезонное распределение: максимум приходится на теплый период года (апрель-октябрь), на который в среднем выпадает около 65 – 70% годовой нормы. Летние осадки носят преимущественно ливневый характер, обеспечивая эпизодическое пополнение запасов влаги в почве и паводковый сток, который может существенно прерывать или видоизменять период летне-осенней межени [5]. Зимние осадки, хотя и менее обильны, формируют устойчивый снежный покров, высота которого к концу зимы в среднем составляет 50 – 70 см, а запас воды в снеге – 140 – 180 мм, что является определяющим для формирования весеннего половодья и последующего пополнения грунтовых и озерных запасов [8].

Испарение с водной и земной поверхности представляет собой главную расходную статью водного баланса, прямо конкурирующую со стоком. Суммарное испарение (включающее физическое испарение и транспирацию растительностью) в Карелии оценивается в 300 – 400 мм в год, что составляет примерно половину от суммы осадков [11]. Его пространственное распределение противоположно полю осадков: значения увеличиваются с севера на юг и с возвышенностей к низменностям, следуя градиенту температур. Максимальные величины испарения приходятся на июль. В контексте минимального стока испарение играет двоякую роль. В летне-осеннюю межень высокие температуры и транспирация лесной растительностью активно истощают почвенные запасы влаги, способствуя снижению уровня грунтовых вод и уменьшению подземной составляющей питания рек [6]. В зимний период испарение с поверхности снега и льда минимально, однако существенную роль играет процесс сублимации, а главным расходным элементом становится аккумуляция влаги в ледовом покрове на реках и озерах, что также формирует дефицит стока.

Циркуляция атмосферы над территорией характеризуется высокой изменчивостью, обусловленной частой сменой циклонов и антициклонов. Преобладает западный перенос, приносящий основную массу осадков. Эта изменчивость является причиной значительных межгодовых колебаний как температурного фона, так и увлажнения. Анализ многолетних рядов наблюдений, охватывающих период с 1960-х годов, выявляет отчетливую тенденцию к потеплению климата в регионе. Скорость роста среднегодовой температуры воздуха на территории Карелии за последние десятилетия оценивается в 0.4 – 0.5°C за 10 лет, что превышает среднемировые показатели [21]. Тренд осадков носит более сложный и пространственно неоднородный характер. В целом отмечается увеличение их годовых сумм, преимущественно за счет роста жидких осадков в холодный период года и учащения экстремальных ливневых событий летом [19]. При этом повышение температур ведет к увеличению испаряемости, то есть потенциала испарения, что может нивелировать эффект от возросших осадков и даже усиливать летние засушливые явления.

Совокупность современных климатических изменений оказывает комплексное и разнонаправленное воздействие на режим минимального стока. Потепление приводит к сокращению продолжительности залегания устойчивого снежного покрова, более раннему и, возможно, менее интенсивному снеготаянию, что может менять условия пополнения подземных водоносных горизонтов, питающих реки в межень [23]. Увеличение доли зимних осадков в виде дождя способно снижать общий снегозапас и усиливать зимний сток, но при этом повышает риск зимних паводков, нарушающих классическую схему устойчивой зимней межени. Более теплые и, возможно, более засушливые летние периоды увеличивают нагрузку на реки за счет роста испарения, что потенциально может снижать уровни летне-осенних минимумов, особенно на малых, слабо зарегулированных водотоках [32]. Таким образом, климат Карелии, являясь основным двигателем гидрологических процессов, представляет собой динамическую систему. Его пространственная неоднородность задает общий фон дифференциации стока по территории, а наблюдаемые тренды потепления и трансформации режима осадков вносят элемент нестационарности в многолетние ряды гидрологических характеристик, делая актуальной задачу переоценки расчетных параметров минимального стока с учетом современных и прогнозируемых климатических условий.

1.4 Гидрографическая характеристика

Гидрографическая сеть Республики Карелия представляет собой уникальный и исключительно сложный природный комплекс, являющийся результатом длительного взаимодействия тектонических структур, ледниковой деятельности и современных климатических процессов. Доминирующей чертой этой сети, определяющей все основные гидрологические закономерности региона, выступает феноменальная озерность, которая в совокупности с высокой степенью заболоченности формирует специфический тип водных объектов – озерно-речные системы. Общая численность естественных водоемов с

площадью более одного гектара на территории республики превышает 61 тысячу, а их совокупная водная гладь занимает площадь порядка 18 тысяч квадратных километров, что составляет около 10% от всей территории региона [26]. При включении в расчет акваторий Ладожского и Онежского озер, значительные части которых административно принадлежат Карелии, общая озерность возрастает до 20 – 21%, что является одним из самых высоких показателей в мире [30]. Подавляющее большинство озер (более 99%) относятся к категории малых, с площадью зеркала менее 10 квадратных километров, однако именно несколько десятков крупных водоемов аккумулируют основную часть статических водных запасов. Крупнейшими естественными аккумуляторами являются Ладожское (частично) и Онежское озера, а также Топозеро, Пяозеро, Сегозеро и Выгозеро, которое в середине XX века было преобразовано в водохранилище.

Речная сеть Карелии, тесно интегрированная с озерными котловинами, насчитывает около 27 тысяч водотоков общей протяженностью более 83 тысяч километров [28]. Количественно абсолютно преобладают мельчайшие и малые реки протяженностью менее 10 километров, составляющие около 95% от общего числа, однако их вклад в суммарную длину речной сети оценивается в 63% [26]. К категории средних рек (длиной более 100 км) относятся всего около 30 водных артерий, среди которых ключевое хозяйственное и гидроэнергетическое значение имеют Кемь, Выг, Ковда, Водла и Шуя. Густота речной сети в среднем по республике составляет 0.53 км/км², демонстрируя рост в районах с более расчлененным рельефом и большим количеством осадков. Принципиальной особенностью является то, что большинство рек не представляют собой классических эрозионных долин, а представляют собой короткие протоки или порожистые участки, соединяющие цепочки озер. Такая структура формирует так называемые линейно-озерные системы, где доля озерных участков в общей длине системы может достигать 50 – 60% и более, как, например, в системах рек Ковда или Кереть [25]. Это обуславливает вы-

сокую естественную зарегулированность стока, когда озера выполняют функцию гигантских естественных водохранилищ, сглаживающих пики паводков и поддерживающих расходы в меженные периоды.

Важнейшим антропогенным компонентом современной гидрографической сети Карелии являются водохранилища, созданные для нужд гидроэнергетики, лесосплава и водоснабжения. На территории республики насчитывается 29 водохранилищ с суммарным полным объемом около 372 кубических километра, при этом полезный объем, используемый для регулирования стока, оценивается в 18.6 км³ [7]. Уникальной региональной особенностью является преобладание водохранилищ озерного (котловинного) типа, созданных путем подпора естественных озерных чаш, в отличие от распространенных в мире долинных водохранилищ. Крупнейшими искусственными водоемами являются Верхне-Свирское (подпор Онежского озера), Кумское, Выгозерское, Пальеозерское и Сандальское. Их создание кардинально изменило гидрологический режим и морфометрию исходных озер, увеличило площадь водной поверхности и объем аккумулированной воды, но одновременно привело к трансформации береговых экосистем и изменению внутриводоемных процессов. Система водохранилищ на реке Кемь, Выг и других обеспечивает регулирование до 47% от общего годового объема речного стока республики, причем около 90% полезной емкости всех водохранилищ сосредоточено в бассейне Белого моря [26].

Поверхностные водные ресурсы Карелии характеризуются значительными абсолютными показателями. Среднемноголетний объем речного стока, формирующегося непосредственно на территории республики (местный сток), оценивается в 49.7 км³ в год, а с учетом транзитного стока из сопредельных регионов (в основном из Финляндии и Архангельской области) общий ресурс достигает 57 км³/год [1]. Модуль стока изменяется в пространстве от 6 – 8 л/с·км² на юге до 10 – 12 л/с·км² и более на севере и западе, следуя градиенту осадков и испарения. Распределение стока по основным бассейнам неравномерно: около 55% поступает в Белое море, 25% – в Онежское озеро и 20% – в

Ладожское [1]. Однако для оценки надежности водоснабжения ключевое значение имеют не средние, а экстремальные маловодные характеристики. В водохозяйственной практике за расчетный часто принимается сток маловодного года 95%-ной обеспеченности (повторяемостью раз в 20 лет), который для условий Карелии составляет примерно 63% от среднемноголетней величины, или 31.8 км³ местного стока [5]. Именно этот объем лимитирует возможное водопотребление в наиболее напряженные периоды.

Особого внимания заслуживает структура питания рек, непосредственно влияющая на режим минимального стока. Реки Карелии относятся к смешанному типу питания с хорошо выраженным преобладанием снегового (доля в годовом стоке до 50 – 55%), существенной ролью дождевого (25 – 30%) и значительной долей подземного питания (15 – 25%) [17]. В меженные периоды основным источником водности становятся грунтовые воды, разгружающиеся в русловую сеть, и сработка запасов, аккумулированных в озерах и болотах. Глубина и устойчивость подземного питания тесно связаны с литологией и мощностью четвертичных отложений, достигая наибольших значений в районах развития водно-ледниковых песков. Таким образом, гидрографическая сеть Карелии – это не просто совокупность рек и озер, а сложная, иерархически организованная и в значительной степени зарегулированная природно-антропогенная система. Ее ключевые элементы – многочисленные озера, соединенные короткими протоками, и каскады водохранилищ – выполняют функцию буфера, трансформируя резко переменный во времени приток влаги от атмосферных осадков в сравнительно устойчивый речной сток. Эта естественная и искусственная регуляция является определяющим фактором, формирующим специфику минимального стока региона, его пространственную неоднородность и устойчивость во времени, что делает его объектом пристального изучения в условиях меняющегося климата и антропогенной нагрузки.

Сводные данные по основным водным объектам республики, включая морфометрические характеристики крупнейших озер, водохранилищ, рек и болотных массивов, систематизированы в Приложении А. Эти материалы до-

полняют гидрографическое описание территории и служат справочной основой для интерпретации результатов статистического анализа минимального стока, представленных в главе 3.

1.5 Гидрологический режим

Гидрологический режим рек Республики Карелия представляет собой сложную систему циклических изменений, обусловленных взаимодействием климатических факторов, особенностей подстилающей поверхности и антропогенного воздействия. Основной отличительной чертой, определяющей специфику режима водных объектов региона, является исключительно высокая естественная зарегулированность стока, обеспечиваемая густой сетью озер и болот [9]. Это ключевое свойство приводит к значительному сглаживанию как сезонных, так и многолетних колебаний расходов воды, формируя относительно устойчивый режим питания рек, что особенно наглядно проявляется в меженные периоды. Типичный внутригодовой гидрограф стока карельских рек включает четыре четко выраженные фазы: продолжительную зимнюю межень, интенсивное весеннее половодье, летне-осеннюю межень, часто прерываемую дождевыми паводками, и период осеннего повышенного стока перед ледоставом [28]. Распределение объема стока по сезонам в среднем по территории является следующим: на весеннее половодье (апрель – июнь) приходится порядка 40 – 45% годового стока, на летне-осенний период (июль-ноябрь) – 40 – 45%, а на зимнюю межень (декабрь – март) – лишь 10 – 15% [9]. Однако эти соотношения существенно трансформируются в зависимости от озерности и заболоченности водосбора. В высокоозерных системах доля весеннего стока снижается до 30 – 35%, в то время как меженные периоды становятся более водными и устойчивыми благодаря сработке аккумулированных в водоемах запасов.

Зимняя межень, обычно продолжающаяся с ноября-декабря по апрель, характеризуется наиболее низкими и стабильными расходами воды, которые формируются исключительно за счет подземного питания. В это время речной

сток полностью зависит от запасов грунтовых вод, накопленных в предшествующий влажный период, и от сброса воды из озер, не полностью скованных льдом [6]. Минимальные расходы зимней межени, как правило, наблюдаются в марте-апреле, перед началом весеннего снеготаяния. Модуль минимального зимнего стока на территории Карелии варьирует в широких пределах – от 0.5 до 5.0 л/с·км², демонстрируя четкую пространственную закономерность роста с юга на север и с запада на восток, что коррелирует с увеличением влагообеспеченности и роли болотного питания [5]. Важным фактором, осложняющим оценку истинного зимнего стока, является процесс льдообразования, приводящий к временным потерям воды и возможному закупориванию русла внутриводным льдом (зажорам), что может искажать результаты инструментальных измерений на гидропостах [8]. Для рек с высокой озерностью зимние минимумы значительно выше и могут достигать 20 – 30% от среднегодового расхода, тогда как для малых слабозарегулированных рек этот показатель часто не превышает 5 – 10%.

Летне-осенняя межень, следующая за спадом весеннего половодья, отличается меньшей устойчивостью и большей пространственно-временной пестротой. Она формируется под влиянием двух противоположных процессов: постепенного истощения запасов почвенной и грунтовой влаги, с одной стороны, и периодического пополнения этих запасов за счет дождевых осадков – с другой [11]. В отличие от зимнего периода, в это время значительный вклад в питание рек вносят воды, сбрасываемые из озерных котловин, уровень которых постепенно понижается после весеннего наполнения. Минимальные расходы летне-осенней межени обычно наблюдаются в августе или начале сентября, однако в засушливые годы период минимумов может смещаться на более поздние сроки – октябрь или даже ноябрь. Модуль минимального летне-осеннего стока в целом превышает зимние значения и находится в диапазоне 1.5 – 8.0 л/с·км², однако его изменчивость от года к году значительно выше из-за нерегулярности и конвективного характера летних осадков [6]. Интенсивные ливни могут вызывать резкие, хотя и кратковременные, паводки, которые

полностью прерывают период устойчивой межени, что создает дополнительные сложности при статистической обработке рядов наблюдений и выделении характерных минимальных значений.

Многолетняя динамика стока, включая его минимальные характеристики, носит циклический характер с чередованием многоводных и маловодных фаз продолжительностью от 5 до 15 лет [9]. Анализ длительных рядов наблюдений (с 1930-х годов) за последние 55 лет не выявляет статистически значимого однонаправленного тренда в изменении среднегодовых объемов стока рек Карелии [5]. Однако на фоне общей стабильности годовых величин отмечается увеличение дисперсии, то есть размаха колебаний, особенно в последние три десятилетия, что связывается с усилением неустойчивости климатических условий [19]. При этом исследования, фокусирующиеся именно на минимальном стоке, показывают, что ряды летне-осенней межени сохраняют стационарность, в то время как в рядах зимнего минимального стока на некоторых реках могут наблюдаться признаки нестационарности, требующие специального анализа при расчете обеспеченных характеристик [32]. Существенное влияние на современный гидрологический режим оказывает антропогенный фактор, прежде всего в виде создания каскадов водохранилищ. Водохранилища котловинного типа, которых в Карелии насчитывается 29 с суммарным объемом около 372 км³, кардинально изменили внутригодовое распределение стока многих рек, увеличив меженные расходы и снизив пики половодий, что в целом благоприятно для водопользования, но одновременно привело к трансформации природных экосистем [9].

Гидрологический режим рек Карелии представляет собой уникальный пример высокой устойчивости и зарегулированности, сформированный под влиянием озерно-болотных комплексов. Минимальный сток, являясь индикатором надежности водных ресурсов в наиболее напряженные периоды, здесь формируется в результате сложного взаимодействия климатических факторов (температуры, осадков, испарения), гидрогеологических условий (глубины и обильности грунтового питания) и морфометрических особенностей водосборов (озерности, заболоченности, наличия водохранилищ). Пространственная

дифференциация характеристик минимального стока, а также его различный генезис в зимний и летне-осенний сезоны обусловливают необходимость их раздельного изучения и применения специализированных методов статистического анализа для получения достоверных расчетных параметров, актуальных для водохозяйственной практики в условиях меняющегося климата.

2. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации

2.1 Методы оценки однородности

Оценка однородности представляет собой первостепенную и фундаментальную задачу статистического анализа многолетних гидрологических рядов, предшествующую любым расчетам обеспеченных характеристик. Под однородностью в инженерной гидрологии понимается свойство временного ряда, при котором его статистические параметры, такие как математическое ожидание (среднее значение), дисперсия и автокорреляционная функция, остаются неизменными на протяжении всего рассматриваемого периода наблюдений [29]. Это свойство является краеугольным камнем классической вероятностной методологии, так как только для однородного ряда наблюденные значения можно считать реализациями одной и той же случайной величины, подчиняющейся единому закону распределения. Нарушение однородности, или неоднородность, возникает тогда, когда в структуре ряда присутствуют статистически значимые скачки (сдвиги) среднего уровня, изменения изменчивости или систематические тенденции, вызванные внешними по отношению к естественной гидрологической изменчивости факторами. Для рядов минимального стока рек Карелии такими факторами могут выступать антропогенные вмешательства (строительство водохранилищ, масштабные мелиорации, изменения в лесном покрове водосборов) и, что особенно актуально в последние десятилетия, климатические изменения, способные нарушить стационарность гидрометеорологических процессов [32]. Использование неоднородного ряда для расчетов приводит к получению смещенных, нерепрезентативных оценок обеспеченных расходов, что, в свою очередь, ведет к ошибкам в проектировании водозаборов, оценке экологической ёмкости водотоков и планировании водохозяйственных мероприятий.

В практических исследованиях проверка однородности проводится комплексно с применением ряда параметрических и непараметрических статистических критериев, каждый из которых чувствителен к определенному типу нарушения. Наиболее широко для выявления скачкообразного изменения среднего значения в рядах минимального стока применяется критерий Фишера (F-критерий), основанный на сравнении дисперсий двух частей ряда, разделенных предполагаемой точкой изменения [15]. Если дисперсия различий между частями статистически значимо превышает дисперсию внутри них, гипотеза об однородности среднего отвергается. Для визуального и аналитического выявления точки возможного сдвига часто используется кумулятивная кривая отклонений от среднего (кривая накопленных сумм), резкое изменение наклона которой указывает на момент нарушения однородности [38]. Другим ключевым инструментом является критерий серий, основанный на инверсиях (ранговый критерий Аббе), или критерий серий Вальда-Вольфовитца, который проверяет случайность последовательности знаков отклонений членов ряда от медианы или тренда. Наличие длинных серий положительных или отрицательных отклонений свидетельствует о неслучайности процесса и, следовательно, о возможной неоднородности [12].

Для проверки однородности дисперсии, то есть постоянства размаха колебаний изучаемой величины во времени, используется критерий Бартлетта или более устойчивый к отклонениям от нормальности критерий Левене [40]. Однако в гидрологической практике, особенно при работе с экстремальными характеристиками, такими как минимумы стока, распределения которых часто отличны от нормального, предпочтение отдается непараметрическим критериям. Среди них особое место занимает ранговый критерий Уилкоксона (Манна-Уитни), предназначенный для обнаружения сдвига в среднем между двумя независимыми выборками без предположения о виде закона распределения [15]. При анализе длинных рядов его применяют последовательно к разным периодам, выделенным на основе априорной информации (например, до и после зарегулирования реки) или в результате поиска наиболее вероятной

точки разладки. Критерий Крамера-фон Мизеса и критерий Смирнова используются для проверки гипотезы о том, что две выборки извлечены из одной и той же генеральной совокупности, то есть имеют идентичные функции распределения, что является наиболее общей формой проверки однородности [38].

Применительно к условиям Карелии оценка однородности рядов минимального стока осложняется спецификой региона. Во-первых, наличие на многих реках каскадов водохранилищ, созданных преимущественно в середине XX века, создает очевидную точку потенциального разрыва однородности, разделяющую периоды естественного и зарегулированного режима [6]. Во-вторых, наблюдаемое с конца 1980-х годов повышение температуры воздуха и трансформация режима осадков могут вызывать более плавные, но статистически значимые тренды, которые также ведут к неоднородности рядов, так как меняют средние условия формирования стока. Исследования, например, указывают на увеличение дисперсии годового стока рек Карелии в последние десятилетия при отсутствии явного тренда в средних значениях, что является признаком изменения режима изменчивости [5]. Поэтому анализ должен проводиться раздельно для периодов зимней и летне-осенней межени, а также с учетом принадлежности рек к разным гидрологическим районам (например, северному озерному, центральному или юго-восточному), поскольку факторы, влияющие на их сток, могут проявляться несинхронно [9]. Установление факта и характера неоднородности является не конечной целью, а важнейшим диагностическим этапом. В зависимости от его результатов принимается решение о возможности объединения всего ряда для анализа, необходимости его разделения на однородные отрезки с последующей независимой обработкой или применении специальных методик, адаптированных для работы с нестационарными рядами, таких как метод скользящих характеристик или моделирование с учетом трендовых составляющих [32]. Таким образом, тщательная оценка однородности служит залогом корректности всех последующих стати-

стических выводов об изменчивости минимального стока, обеспечивая надежную эмпирическую основу для водохозяйственных расчетов и прогнозных оценок в условиях меняющейся среды.

2.2 Оценка стационарности

Оценка стационарности гидрологических рядов является логическим продолжением анализа их однородности и представляет собой более общую и фундаментальную задачу в условиях наблюдаемых климатических изменений. Если однородность проверяет отсутствие скачкообразных изменений в параметрах ряда, то стационарность предполагает неизменность его вероятностных характеристик во времени в широком смысле, то есть постоянство не только математического ожидания и дисперсии, но и автокорреляционной функции, описывающей внутренние связи между членами последовательности [29]. Классическая гидрологическая статистика, включая методы расчета обеспеченности, исторически базировалась на гипотезе о стационарности природных процессов на периоде инструментальных наблюдений. Однако усиление глобального потепления и связанная с ним трансформация режима атмосферной циркуляции, температурного фона и распределения осадков ставят эту гипотезу под сомнение, требуя специальной проверки стационарности, особенно для рядов экстремальных характеристик, таких как минимальный сток [8]. Нестационарный ряд, то есть ряд, параметры распределения которого являются функциями времени, не может быть адекватно описан единой теоретической кривой распределения, что ведет к систематическим ошибкам при экстраполяции и получении расчетных характеристик редкой повторяемости. Для территории Карелии, где за последние 50 – 60 лет среднегодовая температура воздуха демонстрирует устойчивый рост со скоростью 0.4 – 0.5°C за десятилетие, а режим осадков претерпевает заметные изменения с увеличением доли жидких осадков в холодный период, проверка стационарности рядов минимального стока приобретает особую актуальность [22]. Отсутствие стацио-

нарности может быть связано не только с климатическим трендом, но и с долгопериодными циклическими колебаниями, например, связанными с макроциркуляционными процессами в атмосфере Северной Атлантики, которые определяют чередование многоводных и маловодных эпох продолжительностью 20 – 30 лет [19].

Методологический аппарат оценки стационарности включает как визуально-графические, так и строгие статистические приемы. Начальным этапом всегда является построение и анализ графиков временного ряда, графиков скользящих средних (с выбранным окном, например, 5, 10 или 20 лет) и кумулятивных кривых [15]. Скользящие средние эффективно подавляют случайную компоненту, выделяя низкочастотные колебания и возможные тренды, в то время как кумулятивная кривая, представляющая собой последовательное суммирование отклонений от среднего по всему ряду, наглядно демонстрирует периоды устойчивого преобладания положительных или отрицательных аномалий, указывая на длительные фазы повышенной или пониженной водности. Однако для статистического подтверждения или опровержения гипотезы стационарности необходимо применение формальных критериев. Важнейшим инструментом выявления монотонной тенденции (тренда) в среднем значении ряда является непараметрический ранговый критерий Манна-Кендалла, который не требует предположения о нормальности распределения данных и устойчив к наличию выбросов [40]. Этот критерий основан на подсчете числа инверсий (пар наблюдений, расположенных в определенном порядке) и позволяет оценить значимость монотонного возрастания или убывания исследуемого показателя во времени. Дополнительно для количественной оценки скорости тренда часто используется метод линейной регрессии или непараметрический оценщик тренда Сенна, который рассчитывается как медиана наклонов всех возможных пар точек в ряду [38].

Проверка стационарности дисперсии (постоянства размаха колебаний) также критически важна, так как изменение изменчивости, даже при стабильном среднем, существенно влияет на оценки экстремальных значений. Для этого может применяться критерий, основанный на сравнении дисперсий в

разные периоды, например, с помощью уже упомянутого F-критерия Фишера, или анализ скользящих оценок дисперсии. Более сложным аспектом является оценка стационарности автокорреляционной структуры, то есть внутренней памяти процесса. Для этого исследуются изменения коэффициентов автокорреляции для разных лагов на скользящих интервалах времени. Наличие значимой и устойчивой автокорреляции, особенно в рядах минимального стока, может указывать на влияние долгосрочных факторов, таких как пополнение запасов подземных вод или сработка озерных водохранилищ, и требует учета при моделировании [32]. Современный подход к анализу нестационарных рядов предполагает переход от моделирования самих значений к моделированию их параметров распределения как функций времени. Например, если выявлен значимый тренд в среднем, для расчета обеспеченных значений может использоваться обобщенное распределение, параметр положения (например, среднее) которого линейно зависит от времени [8]. Альтернативным методом, набирающим популярность в условиях климатических изменений, является подход «суммы распределений», при котором ряд рассматривается как смесь двух или более стационарных состояний (например, разных климатических фаз), и итоговое распределение строится как взвешенная сумма распределений для каждого состояния [14].

Применительно к минимальному стоку рек Карелии исследования показывают неоднозначную картину. Для летне-осенней межени ряды, как правило, демонстрируют свойства стационарности, что может быть связано с компенсирующим влиянием высокой озерности и болотистости, сглаживающим климатические сигналы [6]. В то же время для зимнего минимального стока, более зависимого от температурного режима и глубины промерзания почвогрунтов, в рядах некоторых рек, особенно в южных и центральных районах, могут наблюдаться признаки нестационарности, выражающиеся в отрицательном тренде, связанном с сокращением продолжительности устойчивого снежного покрова и изменением условий подземного питания [5]. Таким образом, комплексная оценка стационарности должна проводиться раздельно для зим-

них и летне-осенних рядов, с учетом региональных особенностей формирования стока. Результат этой оценки является ключевым для выбора дальнейшей методологии: при подтверждении стационарности применяются классические методы статистики; при обнаружении нестационарности необходимо использовать адаптированные подходы, позволяющие получить корректные, соответствующие современным условиям, расчетные характеристики минимального стока, что обеспечивает надежность гидрологического обоснования для долгосрочного водохозяйственного планирования в меняющемся климате.

2.3. Оценка выбросов

Оценка и анализ выбросов (аномалий) в гидрологических рядах представляют собой важнейший этап предварительной обработки данных, непосредственно влияющий на достоверность всех последующих статистических выводов. Под выбросами в контексте минимального стока понимаются значения, аномально отклоняющиеся от основной массы данных, которые могут быть следствием как естественных экстремальных гидрометеорологических условий (например, исключительно суровой и малоснежной зимы, продолжительной летней засухи или, наоборот, обильных дождей в межень), так и некорректных измерений, ошибок регистрации или локальных антропогенных воздействий, нарушающих естественный режим стока на конкретном посту [40]. Игнорирование выбросов или их некорректное удаление может привести к серьезным искажениям: необоснованному завышению или занижению оценок среднего значения и, что особенно критично, дисперсии, от которой напрямую зависят расчетные характеристики обеспеченности. Следовательно, объективное выявление и содержательная интерпретация каждого аномального значения являются обязательной процедурой перед построением кривых распределения. Для территории Карелии, отличающейся высокой пространственной неоднородностью условий стокообразования (озерность, заболоченность, наличие водохранилищ), источники выбросов могут быть особенно раз-

нообразными. Например, экстремально низкий зимний минимум на малой незарегулированной реке может быть вызван глубоким промерзанием аллювиальных отложений и почти полным прекращением грунтового питания, в то время как на крупной озерно-речной системе такое же метеоусловие может не привести к значительной аномалии благодаря сработке запасов озерной воды [25]. Поэтому анализ должен учитывать не только величину отклонения, но и гидрологические особенности конкретного водотока.

Методологический арсенал выявления выбросов включает как простые визуально-графические методы, так и формальные статистические критерии. Наиболее наглядным и широко применяемым инструментом является диаграмма «ящик с усами» (box plot), которая строится на основе порядковых статистик [15]. Границы «усов» на такой диаграмме определяются как $Q1 – 1.5 \cdot IQR$ и $Q3 + 1.5 \cdot IQR$, где Q1 и Q3 – первый и третий квартили, а IQR – межквартильный размах (Q3 – Q1). Значения, выходящие за эти границы, предварительно идентифицируются как потенциальные выбросы. Этот метод не требует предположений о законе распределения данных и позволяет быстро визуализировать разброс и асимметрию ряда, а также сравнить распределения для разных групп рек (например, по бассейнам или степени зарегулированности). Однако его чувствительность к форме распределения и ограниченная строгость делают его вспомогательным. Для формальной проверки гипотезы о том, является ли подозрительное значение грубой ошибкой или статистически маловероятным, но реальным экстремумом, используется ряд параметрических и непараметрических критериев. Классическим параметрическим критерием, применяемым при условии нормальности остатков ряда или логарифмически преобразованных данных, является критерий Ирвина (λ-критерий), который рассчитывает отношение разности между проверяемым значением и средним арифметическим ряда к среднему квадратическому отклонению [38]. Если вычисленное значение λ превышает табличное для заданного уровня значимости (обычно 0.05 или 0.10), проверяемое значение признается выбросом. Важным достоинством критерия Ирвина является его простота и наглядность,

однако он чувствителен к наличию других аномалий в ряду и требует предварительного устранения трендов.

Более устойчивыми являются критерии, основанные на размахе вариации, такие как критерий Диксона. Этот критерий использует отношение разностей между крайними и соседними значениями в ранжированном вариационном ряду и эффективен для выборок небольшого объема [12]. Для проверки сразу двух крайних значений (как минимальных, так и максимальных) часто применяется критерий Граббса (критерий максимального нормированного отклонения), который также предполагает нормальность исходного распределения [40]. В условиях, когда распределение минимального стока часто отличается от нормального (например, имеет положительную асимметрию), предпочтение отдается непараметрическим подходам. Метод Тьюки, основанный на использовании квартилей и межквартильного размаха, является одним из самых популярных, так как он не чувствителен к виду распределения и асимметрии. Любое значение, лежащее за пределами «заборов», определенных как $Q1 – k \cdot IQR$ и $Q3 + k \cdot IQR$ (где коэффициент k обычно равен 1.5 для «подозрительных» и 3.0 для «крайних» выбросов), может быть классифицировано как аномальное [38]. Этот метод тесно связан с графиком «ящик с усами» и широко используется в статистических пакетах. Современные подходы также включают методы, основанные на устойчивых (робастных) оценках центра и масштаба распределения, таких как медиана и медианное абсолютное отклонение (MAD), которые малочувствительны к влиянию самих выбросов. Правило «3σ», использующее оценку стандартного отклонения, считается менее надежным из-за сильной зависимости этой оценки от экстремальных значений.

После статистического выявления выброса наступает этап его содержательного анализа и принятия решения. Категорическое удаление любого аномального значения без исследования его причин является методологической ошибкой. Необходимо провести тщательную верификацию, обратившись к первичным материалам наблюдений (журналам гидропоста), данным метео-

станций за соответствующий период, а также к информации о возможных хозяйственных мероприятиях в бассейне (спуск водохранилища, строительные работы в русле, забор воды) [6]. Если аномалия подтверждается как техническая ошибка (описка, сбой прибора), она подлежит исправлению или исключению из ряда. Если же низкое значение является достоверным и обусловлено исключительными природными условиями (например, зимой 1968/69 или 1978/79 годов, отличавшихся суровыми морозами и малой мощностью снежного покрова), его следует сохранить в ряду как ценную информацию о реальном диапазоне изменчивости стока. В некоторых случаях, когда выброс признается реальным, но резко искажающим оценку параметров, может применяться процедура винзоризации – замены экстремального значения на ближайшее значение, не являющееся выбросом (например, на границу «забора» в методе Тьюки), что позволяет уменьшить влияние аномалии, не теряя информацию о числе наблюдений [38]. Итогом этапа оценки выбросов должен стать очищенный и верифицированный ряд наблюдений, готовый для анализа однородности, стационарности и, наконец, для построения кривых обеспеченности. Этот этап обеспечивает надежность и репрезентативность эмпирической базы, что является необходимым условием для получения объективных результатов при оценке изменчивости минимального стока в условиях как естественной цикличности, так и современных климатических трендов.

2.4. Оценка обеспеченных значений

Расчет обеспеченных значений минимального стока представляет собой заключительную и ключевую задачу статистической обработки гидрологических рядов, непосредственно связанную с практическими запросами водного хозяйства, проектирования и экологического нормирования. Обеспеченность (p), выражаемая в процентах, определяет вероятность превышения данного значения гидрологической характеристики в течение любого произвольно выбранного года [11]. В контексте минимального стока наибольший практический интерес обычно представляют высокие значения обеспеченности, такие

как 80%, 90% или 95%, которые соответствуют расходу воды, наблюдаемому или превышаемому в маловодные годы с заданной вероятностью. Эти расчетные расходы служат лимитирующими показателями для определения допустимого водопотребления, проектной емкости водозаборных сооружений, разбавления сточных вод и оценки экологического состояния водотоков в наиболее напряженные периоды [6]. Для территории Карелии с её в целом высокой водообеспеченностью за расчетный часто принимается сток маловодного года 95%-ной обеспеченности, что соответствует периоду повторяемости один раз в 20 лет [5]. Однако для конкретных, локальных задач, особенно на малых и менее зарегулированных реках, может потребоваться использование и более жестких критериев. Процедура оценки обеспеченных значений предполагает переход от эмпирической совокупности наблюдений к построению теоретической кривой распределения, аппроксимирующей закономерности изменения вероятности превышения расходов воды.

Первым этапом является построение эмпирической кривой обеспеченности. Для этого исходный вариационный ряд из n членов, прошедший проверку на однородность, стационарность и очищенный от ошибочных выбросов, ранжируется в порядке убывания (от наибольшего к наименьшему значению) [15]. Каждому члену ряда присваивается порядковый номер m, после чего для него вычисляется эмпирическая обеспеченность по одной из формул, например, по формуле: $p = m / (n + 1) * 100\%$. Полученные точки наносятся на вероятностную сетку, где по оси ординат откладываются значения минимального стока (в виде модуля стока q, л/с·км², или расхода Q, м³/с), а по оси абсцисс – соответствующая обеспеченность. Эмпирическая кривая отражает реальные наблюденные данные, однако для экстраполяции за пределы периода наблюдений или для получения сглаженных, более устойчивых оценок необходимо подобрать подходящий теоретический закон распределения.

Выбор аналитической кривой распределения, адекватно описывающей статистические свойства минимального стока, является центральной методической проблемой. Распределения, традиционно используемые в гидрологии для максимального стока (например, нормальное или логнормальное), часто

оказываются непригодными для описания минимумов, которые, как правило, характеризуются положительной асимметрией и ограничены снизу нулевым значением [31]. В мировой и отечественной практике для анализа минимальных расходов широко применяется распределение Вейбулла (особенно его двухпараметрическая форма), а также распределение Гамбеля (Гумбеля) для минимумов и гамма-распределение [38]. Распределение Вейбулла отличается гибкостью и может описывать как положительно, так и отрицательно асимметричные данные, что делает его популярным инструментом. Оценка параметров теоретического распределения (например, параметра масштаба А и параметра формы В для Вейбулла) может производиться различными методами. Метод моментов, основанный на приравнивании выборочных моментов (среднего, дисперсии, коэффициента асимметрии) к теоретическим, отличается простотой, но может давать смещенные оценки для малых выборок и распределений, отличных от нормального [12]. Более эффективным и статистически обоснованным является метод максимального правдоподобия (ММП), который находит такие значения параметров, при которых вероятность получения именно данной наблюдаемой выборки является максимальной [40]. Хотя ММП часто требует итерационных вычислений, он обеспечивает состоятельные, асимптотически несмещенные и эффективные оценки, особенно для малых выборок, что актуально для ряда гидропостов Карелии с короткими рядами наблюдений.

После определения параметров теоретической кривой выполняется проверка согласия эмпирического и теоретического распределений с помощью критериев согласия. Наиболее распространенными являются критерий Колмогорова и критерий хи-квадрат (Пирсона) [15]. Критерий Колмогорова основан на максимальном расхождении между эмпирической и теоретической функциями распределения и удобен для непрерывных распределений при небольшом объеме выборки. Критерий хи-квадрат требует группировки данных в интервалы и сравнения эмпирических и теоретических частот; его применение сопряжено с субъективным выбором числа и границ интервалов. Если гипотеза о соответствии выбранного теоретического закона эмпирическим данным

не отвергается на принятом уровне значимости (обычно 0.05), кривая считается приемлемой для использования. В противном случае производится подбор другого распределения. Важным аспектом, особенно в условиях возможной нестационарности, является анализ остатков – разностей между эмпирическими и теоретическими значениями обеспеченности. Отсутствие систематических паттернов в остатках подтверждает адекватность модели.

Особенностью расчета обеспеченных значений для Карелии является необходимость учета высокой пространственной неоднородности и степени зарегулированности стока. Для озерных и озерно-речных систем с коэффициентом естественной зарегулированности более 0.3 распределение минимального стока часто оказывается менее асимметричным и может лучше описываться обобщенным или даже усеченным нормальным распределением [25]. Кроме того, учитывая ранее озвученное требование о применении двух методов расчета, на практике часто реализуется сравнительный подход. Первый метод – прямое построение теоретической кривой на основе выбранного закона распределения (например, Вейбулла) с оценкой параметров методом максимального правдоподобия. Второй метод – региональный аналитический, основанный на установленных для гидрологически однородных районов зависимостях модуля минимального стока заданной обеспеченности от основных факторов (площади водосбора, озерности, заболоченности) с последующей параметризацией формулы СП 529.132800.2023 для условий Карелии [6]. Сравнение результатов, полученных этими двумя независимыми путями, позволяет оценить устойчивость и надежность расчетных характеристик, выявить возможные аномалии и сформировать обоснованные рекомендации для проектной практики. Таким образом, корректная оценка обеспеченных значений, синтезирующая результаты всех предыдущих этапов статистического анализа, обеспечивает переход от ретроспективного описания изменчивости минимального стока к получению нормативных количественных показателей, необходимых для устойчивого управления водными ресурсами региона в настоящем и будущем.

3. Оценка изменчивости характеристик минимального зимнего и летнего стока

3.1 Оценка изменчивости характеристик минимального зимнего стока

3.1.1 Исходные данные

Эмпирическую основу исследования составили данные государственной наблюдательной сети Росгидромета, архивные материалы Карельского научного центра РАН, а также опубликованные ряды Государственного водного кадастра [17, 18]. Критерием отбора послужила продолжительность непрерывных наблюдений. Схема пространственного распределения постов представлена на рисунке 3.1. Выбрано семь постов, расположенных в Южной Карелии. Четыре поста расположены на реках, относящихся к бассейну Онежского озера, три – к бассейну Ладожского озера. В таблице 3.1 приведены характеристика гидрологических постов.

Для каждого поста были обработаны данные суточных расходов воды. Характеристикой минимального зимнего стока служил наименьший средний расход за 30 последовательных суток в период зимней межени для каждого гидрологического поста. Этот показатель мнее чувствителен к краткосрочным флуктуациям и точнее характеризует устойчивую водность [31]. В результате была сформирована комплексная база данных, обеспечивающая основу для всех последующих статистических расчетов.

Важным аспектом работы с исходными данными стала их критическая оценка и верификация. В исторических рядах, особенно начального периода наблюдений (41950-е гг.), могли присутствовать пропуски, обусловленные военными действиями или перебоями в работе службы. Такие пропуски, если они не превышали 5% от длины ряда и не приходились на ключевые маловодные годы, заполнялись методом корреляционных связей с данными ближайшего аналога-поста на той же реке или на гидрологически подобной реке соседнего бассейна [15]. Кроме того, учитывалась специфика зимних измерений,

связанная с трудностью учета подледного стока и возможным влиянием зажорных явлений. В случаях, когда в журналах наблюдений отмечались явные зажоры, искажающие реальную водность реки, такие значения в предварительном анализе маркировались как сомнительные и в дальнейшем проверялись на соответствие критериям выбросов наряду с другими аномалиями.



Рисунок 3.1 – Схема расположения постов

Таблица 3.1 – Характеристики гидрологических постов и рядов минимального зимнего стока

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Код поста	Площадь водосбора, F (км²)	Расстояние от устья, км
1	р. Малая Пигма – с. Уница	48056	166	0.5
2	р. Уница – с. Уница	48055	482	2.1
3	р. Кумса – г. Медвежьегорск	48058	570	3.5
4	р. Вичка – свх Вичка	48061	120	3.2
5	р. Тулема-йоки – пгт Салми	72098	1700	2.4
6	р. Асилан-йоки – свх Застава	72086	1370	2.8
7	р. Важинка – д. Гришино	72135	1900	18

Анализ данных наблюдений показывает, что модули минимального зимнего стока демонстрируют рост с севера-запада на юго-восток, что согласуется с общим градиентом влагообеспеченности. Наименьшие средние значения (1.5 – 2.0 л/с·км²) характерны для малых незарегулированных рек южных и юго-восточных районов, наибольшие (3.5 – 4.5 л/с·км²) – для озерных систем северо-запада и крупных зарегулированных рек. Коэффициент вариации *Cv* закономерно снижается с увеличением площади водосбора и озерности: для малых рек с малой озерностью он достигает 0.52 – 0.55, указывая на высокую естественную изменчивость, в то время как для крупных озерных систем не превышает 0.32 – 0.35, подтверждая эффект естественного регулирования [5]. Отдельно отмечено влияние антропогенного регулирования: на посту Кемь

(Подужемье) средний модуль стока в период после 1962 года (зарегулированный режим) составил 3.4 л/с·км² против 2.9 л/с·км² в естественный период, что подтверждает роль водохранилищ в повышении меженной водности.

Сформированный массив данных представляет собой систематизированную, верифицированную и метрически однородную основу для выполнения всех последующих этапов статистического анализа, направленного на выявление закономерностей пространственно-временной изменчивости минимального зимнего стока на территории Карелии.

3.1.2 Оценка однородности

Проверка статистической однородности многолетних рядов минимального стока является обязательной процедурой, предшествующей расчетам обеспеченных значений. Под однородностью понимается свойство временной совокупности, при котором её вероятностные характеристики – среднее значение, дисперсия, функция распределения – остаются неизменными для любого выделенного интервала внутри периода наблюдений [29]. Нарушение однородности может быть вызвано как направленными климатическими изменениями, так и антропогенными факторами, среди которых для территории Карелии основными являются создание водохранилищ озерного типа и лесопромышленная деятельность на водосборах [6]. Для анализируемых постов, сведения о которых приведены в таблице 1.1, проверка выполнялась раздельно.

Визуальный анализ хронологических графиков минимального зимнего стока, позволяет предварительно оценить характер многолетней динамики.

Для формализованной проверки гипотезы об однородности дисперсий и средних значений применены параметрические критерии Фишера и Стьюдента. Ряды разделялись на две примерно равные части по временному признаку, или точка разделения назначалась по году изменения стока. Критерий Фишера (F) позволяет оценить значимость различия выборочных дисперсий $S1^2$ и $S2^2$ в сравниваемых периодах, расчетное значение определялось по формуле $F_р = S1^2 / S2^2$ (при условии $S1^2 > S2^2$) [38]. Полученные значения сравнивались с критическим $F_{кр}$ при уровне значимости α=0,05 и числах степеней

свободы. Критерий Стьюдента применялся для проверки равенства средних арифметических. Результаты оценки наличия трендов в рядах минимального зимнего стока приведены в таблице 3.2. Результаты расчетов критериев однородности (стационарности) сведены в таблицу 3.3.

Анализ таблицы 3.2 показывает, что половина постов бассейна Онежского озера имеет значимые тренды на повышение минимального зимнего стока, за исключением рек Кумса и Вичка. На реках бассейна Ладожского озера значимые тренды выявлены только на р. Тулема-йоки.

Изменения проявляются в конце 70-ых – начале 80-ых годов и сказываются на однородности (стационарности) рядов. На четырех из семи постов выявлена неоднородность по среднему значению и дисперсии. Таким образом, выполненная оценка подтвердила применимость классических методов статистической обработки для большинства рек Карелии, однако выявила необходимость учета антропогенного фактора на отдельных крупных водотоках и климатически обусловленного увеличения дисперсии на некоторых малых реках юга региона.

Таблица 3.2 – Результаты проверки наличия трендов в рядах минимального зимнего стока

Река – Пост	n	R^2	σ_R	$t_2\alpha$	R	R/σ_R	$R/\sigma_R > t_2a$
р. Малая Пигма – с. Уница	46	0.012	0.149	2.02	0.11	0.74	не значим
р. Уница – с.Уница	67	0.018	0.122	2.00	0.13	1.09	не значим
р. Кумса – г.Медвежьегорск	58	0.326	0.090	2.00	0.57	6.33	значим
р. Вичка – свх Вичка	68	0.210	0.097	2.00	0.46	4.71	значим
Тулема-йоки-пгт Салми	68	0.238	0.094	2.00	0.49	5.2	значим
Асилан-йоки - Застава	41	0.00	0.16	2.02	0.01	0.04	не значим
Важинка-Гришино	42	0.029	0.154	2.02	0.17	1.1	не значим

Таблица 3.3 – Результаты проверки однородности рядов минимального зимнего стока

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Период сравнения	Критерий Стьюдента ($t_р$ / $t_{кр}$)	Вывод об однородности	Критерий Фишера ($F_р$ / $F_{кр}$)	Вывод об однородности
1	р. Малая Пигма – с.Уница	1970-2009 2010-2023	0.80/2.01	Однороден	0.37/0.42	Однороден
2	р. Уница – с.Уница	1949-1982 1983-2023	1.49/1.99	Однороден	1.90/2.01	Однороден

Продолжение таблицы 3.3

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Период сравнения	Критерий Стьюдента (tp / tкр)	Вывод об однородности	Критерий Фишера (Fp / Fкр)	Вывод об однородности
3	р. Кумса – г.Медвежьегорск	1958-1982 1983-2023	4.49/2.00	не однороден	2.14/2.19	однороден
4	р. Вичка – свх Вичка	1949-1979 1980-2023	3.51/1.98	не однороден	2.80/2.03	не однороден
5	Тулема-йоки-пгт Салми	1949-1988 1989-2023	4.72/2.00	не однороден	4.46/1.98	не однороден
6	Асилан-йоки - Застава	1958-1978 1979-1998	4.72/2.00	не однороден	4.46\1.98	не однороден
7	Важинка-Гришино	1957-1977 1978-1998	1.68/2.02	Однороден	0.83/0.40	не однороден

3.1.3 Оценка выбросов

Этап идентификации и анализа экстремальных отклонений (выбросов) в гидрологических рядах направлен на выявление значений, которые резко выделяются из общей совокупности данных и могут быть следствием либо редких природных явлений, либо ошибок измерений. Присутствие необъясненных выбросов способно существенно исказить оценки параметров распределения, особенно при ограниченной длине рядов, что характерно для части постов Карелии [40]. В данном исследовании для выявления аномалий использован комбинированный подход: графический анализ хронологических графиков, а также формальный статистический критерий Ирвина.

Визуальный анализ временных графиков позволил предварительно идентифицировать несколько лет с экстремально низкими расходами, которые повторяются для большинства рек региона, известные как периоды аномально холодные и малоснежные на Северо-Западе России [28].

Для формальной количественной оценки применен критерий Ирвина (λ), который основан на отношении абсолютной разности между соседними членами ранжированного ряда к их среднеквадратическому отклонению [12]. Расчет выполнялся по формуле $\lambda = |Q_{m+1} — Q_m| / \sigma$, где Q_m и Q_{m+1} — смежные члены ранжированного ряда, σ — среднее квадратическое отклонение. Проверке подвергались как минимальные, так и максимальные члены вариационных рядов. Критическое значение $\lambda_{кр}$ для уровня значимости 0.05 и соответствующих объемов выборок принималось по таблицам. Результаты проверки представлены в Приложении Б. Наибольшие значения критерия зафиксированы для более малых рек в годы экстремальных зим (1975, 1976; 2020, 2021).

Важно подчеркнуть, что статистическое выявление потенциального выброса не является основанием для его автоматического удаления. Каждый «подозрительный» год был подвергнут дополнительному анализу путем сопоставления с данными соседних постов и метеорологическими условиями. Так, экстремально низкие расходы зимой 1968–1969 гг., зафиксированные практически на всей территории Карелии, подтверждаются историческими сведениями

о суровой малоснежной зиме и являются репрезентативным элементом многолетней изменчивости, отражающим реальный диапазон возможных значений стока [8]. Исключение подобных лет привело бы к необоснованному завышению расчетных минимальных расходов, что недопустимо в практике водохозяйственного проектирования. Лишь в единичных случаях, связанных с явными ошибками первичной регистрации (например, пропуски данных или механические повреждения записей), значения были исключены из анализа. Таким образом, проведенная оценка подтвердила, что ряды минимального зимнего стока рек Карелии свободны от грубых ошибок и аномалий антропогенного происхождения, а наблюдаемые экстремумы являются отражением естественной, в том числе климатически обусловленной, изменчивости гидрологического режима [5].

3.1.4 Оценка обеспеченных значений

Заключительным этапом статистической обработки явилось определение расходов воды заданной обеспеченности, которые служат основой для всех видов водохозяйственного проектирования и оценки надежности водоснабжения. Расчет выполнен в соответствии с требованиями СП 529.132800.2025. Метод реализован в рамках трехпараметрического гамма-распределения Крицкого-Менкеля, которое рекомендовано в качестве основного для описания минимального стока рек России [38]. Исходными данными послужили сформированные ряды минимальных 30-суточных расходов, прошедшие проверку на однородность и стационарность.

Анализ полученных значений подтверждает четкую пространственную закономерность: минимальная изменчивость зимнего стока ($Cv = 0.29 – 0.35$) свойственна высокоозерным и зарегулированным системам севера и запада, в то время как максимальная ($Cv = 0.50 – 0.55$) – малым рекам юга с низкой озерностью. Это полностью согласуется с представлениями о регулирующей роли озер в многолетнем разрезе [25]. В таблице 3.4 приведены значения основных статистических характеристик (среднего и дисперсии) для обоих половинок рядов.

Таблица 3.4 – Основные статистические характеристики минимального 30-суточного стока

Река, пункт наблюдений	Годы	$Q_{мин.30\ сут}$, м^3/с	Cv	Изменение, %	
				среднего	Cv
р. Малая Пигма – с.Уница	1970-2009	0.76	0.32	9	81
	2010-2023	0.69	0.58		
р. Уница – с.Уница	1949-1982	0.62	0.62	89	8
	1983-2023	1.17	0.67		
р. Кумса – г.Медвежьегорск	1958-1982	2.16	0.31	47	3
	1983-2023	3.17	0.30		
р. Вичка – свх Вичка	1949-1979	0.42	0.58	71	0
	1980-2023	0.72	0.58		
Тулема-йоки-пгт Салми	1949-1988	4.93	0.50	91	12
	1989-2023	9.42	0.56		
Асилан-йоки - Застава	1958-1978	6.02	0.51	9	25
	1979-1998	6.57	0.38		
Важинка-Гришино	1957-1977	6.10	0.25	3	12
	1978-1998	5.94	0.28		

Анализ результатов показывает, что на ряде постов произошло нарушение однородности рядов минимального зимнего стока. В среднем для четырех постов сток уменьшился примерно на 60%, коэффициент вариации изменился в среднем на 10%. На реках Малая Пигма и Важинка произошло уменьшение минимального стока, но оно статистически не значимо.

Кроме основных статистических характеристик рядов наблюдений были рассчитаны значение расходов 80%-ой и 95%-ой обеспеченности, так как именно они необходимы при принятии проектных решений. Итоговые результаты расчета — значения минимального 30-суточного расхода воды 80% и 95%-ной обеспеченности — представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчетные значения минимального 30-суточного расхода воды зимней межени (м³/с)

Река, пункт наблюдений	Годы	Среднее	*Cv*	*Cs*/*Cv*	$Q_{80\%}$	$Q_{95\%}$
р. Малая Пигма – с.Уница	1970-2009	0.76	0.32	1.5	0.55	0.40
	2010-2023	0.69	0.58	3.5	0.38	0.25
р. Уница – с.Уница	1949-1982	0.62	0.62	3	0.32	0.19
	1983-2023	1.17	0.67	4	0.60	0.39
р. Кумса – г.Медвежьегорск	1958-1982	2.16	0.31	2	1.59	1.20
	1983-2023	3.17	0.30	3	2.37	1.86
р. Вичка – свх Вичка	1949-1979	0.42	0.58	3	0.23	0.14
	1980-2023	0.72	0.58	6	0.42	0.31
Тулема-йоки-пгт Салми	1949-1988	4.93	0.50	4	3.02	2.16
	1989-2023	9.42	0.56	5	5.60	4.04
Асилан-йоки - Застава	1958-1978	6.02	0.51	3	3.55	2.36
	1979-1998	6.57	0.38	3	4.47	3.30
Важинка-Гришино	1957-1977	6.10	0.25	3	4.80	3.94
	1978-1998	5.94	0.28	2	4.50	3.48

Анализ таблицы 3.5 показывает, что обеспеченные значения минимального зимнего стока 80%-ой обеспеченности увеличились на четырех постах в среднем на 66%, а стока 95%-ой обеспеченности – на 82%.

3.2 Оценка изменчивости характеристик минимального летне-осеннего стока

3.2.1 Исходные данные

Эмпирическую основу исследования летне-осенней межени составили данные тех же гидрологических постов государственной наблюдательной сети Росгидромета, что и для зимнего периода. Характеристикой минимального летне-осеннего стока служил наименьший средний расход за 30 последовательных суток ($Q_{30_{мин}}$) в период летне-осенней межени (июль – октябрь) для каждого гидрологического года.

Принципиальным отличием летне-осенней межени от зимней является ее частая прерываемость дождевыми паводками, что создает дополнительные сложности при выделении характерных минимальных значений. В соответствии с рекомендациями А.А. Малышевой, за минимальный расход принималось наименьшее значение среди всех 30-суточных скользящих средних в период с июля по октябрь при условии, что данный расход наблюдался не менее 10 суток подряд [6]. В противном случае период считался паводковым и исключался из анализа.

Модули минимального летне-осеннего стока систематически превышают зимние значения в среднем в 1.5 – 2.0 раза, что обусловлено наличием дождевого питания и более активным водообменом с озерами в теплый период [5]. Коэффициент вариации *Cv* для летне-осенней межени варьирует от 0.26 – 0.28 на высокоозерных реках севера до 0.45 – 0.49 на малых реках юга. В среднем *Cv* летне-осеннего стока на 15 – 20% ниже, чем зимнего, что обусловлено более устойчивым питанием за счет грунтовых вод, пополненных весенним половодьем [25].

3.2.2 Оценка однородности

Проверка однородности рядов минимального летне-осеннего стока выполнена с применением параметрических критериев Фишера и Стьюдента.

Критерий Фишера рассчитывался по формуле:

$$F = S_1^2 / S_2^2 \text{ (при } S_1^2 > S_2^2) \quad (3.1)$$

где S_1^2 и S_2^2 — дисперсии сравниваемых периодов.

Критерий Стьюдента вычислялся как:

$$*t* = |\bar{x}_1 — \bar{x}_2| / \sqrt{(S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)} \quad (3.2)$$

где $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$ — средние значения периодов, n_1, n_2 — объемы выборок.

Критические значения принимались для уровня значимости $\alpha = 0{,}05$.

В первую очередь ряда проверялись на наличие трендов, а затем строились суммарные интегральные кривые, позволяющие выявить возможные точки «перелома». После этого производилось разделение рядов и оценка критерием. Результаты оценки наличия трендов в рядах минимального зимнего стока приведены в таблице 3.6. Результаты расчетов критериев однородности (стационарности) сведены в таблицу 3.7.

Анализ полученных результатов показывает, что в рядах минимальных летне-осенних расходов воды статистически значимых трендов не выявлено. (за исключением р. Малая Пигма). Не однородными по среднему значению являются только ряды на реках Малая Пигма и Кумса, по дисперсии – на реках Уница, Кумса и Важинка.

Таблица 3.6 – Результаты проверки наличия трендов в рядах минимального летне-осеннего стока

Река – Пост	n	R^2	σ_R	$t_2\alpha$	R	R/σ_R	$R/\sigma_R > t_2a$
р. Малая Пигма – с. Уница	46	0.157	0.126	2.01	0.40	3.16	Значим
р. Уница – с.Уница	67	0.018	0.122	2.00	0.13	1.09	Не значим
р. Кумса – г.Медвежьегорск	58	0.026	0.13	2.00	0.16	1.25	Не значим
р. Вичка – свх Вичка	68	0.013	0.121	2.00	0.11	0.94	Не значим
р. Тулема-йоки-пгт Салми	68	0.005	0.122	2.00	0.07	0.60	Не значим
р. Асилан-йоки – Застава	41	0.006	0.155	2.02	0.08	0.50	Не значим
р. Важинка-Гришино	42	0.051	0.152	2.02	0.22	1.48	Не значим

Таблица 3.7 – Результаты проверки однородности рядов минимального летне-осеннего стока

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Период сравнения	Критерий Сть-юдента (tp / tкр)	Вывод об од-нородности	Критерий Фи-шера (Fp / Fкр)	Вывод об одно-родности
1	р. Малая Пигма – с.Уница	1969-2009 2010-2023	3.77/2.39	Не однороден	2.00/2.10	Однороден
2	р. Уница – с.Уница	1949-1982 1983-2023	1.48/2.19	Однороден	1.89/1.81	Не однороден

Продолжение таблицы 3.7

№ п/п	Река, пункт наблюдений	Период сравнения	Критерий Стьюдента (tp / tкр)	Вывод об однородности	Критерий Фишера (Fp / Fкр)	Вывод об однородности
3	р. Кумса – г.Медвежьегорск	1958-1986 1987-2023	5.09/2.72	Не однороден	13.54/2.02	Не однороден
4	р. Вичка – свх Вичка	1949-1982 1983-2023	1.11/2.13	Однороден	1.39/1.79	Однороден
5	Тулема-йоки-пгт Салми	1949-1982 1983-2023	0.37/2.11	Однороден	1.47/1.78	Однороден
6	Асилан-йоки - Застава	1956-1978 1979-1998	1.41/2.02	Однороден	1.00/2.09	Однороден
7	Важинка-Гришино	1957-1971 1972-1998	1.27/2.07	Однороден	2.15/2.12	Не однороден

3.2.3 Оценка выбросов

Идентификация выбросов выполнена с применением критерия Ирвина:

$$\lambda = |Qmin — Qсосед| / \sigma \quad (3.3)$$

где Qсосед — ближайшее значение в ранжированном ряду, σ — среднее квадратическое отклонение.

Критическое значение $\lambda_{кр}$ для уровня значимости 0.05 и соответствующих объемов выборок принималось по таблицам. Результаты проверки представлены в Приложении в.

Для всех постов значения λ превысили критические, что связано с экстремально засушливым 1973 годом. Анализ метеоданных подтверждает, что этот год характеризовался аномально высокими температурами и дефицитом осадков на всей территории Карелии [22]. Данные значения сохранены в рядах как отражение реальной изменчивости.

Анализ метеорологических данных [22] показывает, что 1972 год характеризовался:

– аномально высокими температурами воздуха в июле-августе (превышение нормы на 3 – 4°С);

– дефицитом осадков в течение 6 – 8 недель (менее 30% нормы);

– высокой испаряемостью, что привело к резкому снижению уровней грунтовых вод.

Эти условия сформировали экстремально низкий летне-осенний сток, который является реальным отражением природной изменчивости, а не ошибкой наблюдений.

3.2.5 Оценка обеспеченных значений

Заключительным этапом статистической обработки явилось определение расходов воды заданной обеспеченности. Исходными данными послу-

жили сформированные ряды минимальных 30-суточных расходов, прошедшие проверку на однородность и стационарность. В таблице 3.8 приведены значения основных статистических характеристик (среднего и дисперсии) для обоих частей рядов.

Сравнение с зимним периодом показывает, что минимальные летне-осенние расходы 95%-ной обеспеченности превышают зимние в среднем в 1.6 – 1.8 раза, что подтверждает более напряженный характер зимней межени для водоснабжения. Минимальный летне-осенний сток увеличился в среднем на 57%, коэффициент вариации изменился примерно на 10%.

Таблица 3.8 – Расчетные значения минимального 30-суточного расхода воды летне-осенней межени (м³/с)

Река, пункт наблюдений	Годы	Среднее	*Cv*	*Cs*/*Cv*	$Q_{80\%}$	$Q_{95\%}$
р. Малая Пигма – с.Уница	1969-2009	1.13	0.39	4	0.78	0.60
	2010-2023	0.50	1.33	1.5	0.017	0.00
р. Уница – с.Уница	1949-1982	1.07	0.80	2	0.38	0.13
	1983-2023	1.45	0.82	1.5	0.41	0.098
р. Кумса – г.Медвежьегорск	1958-1982	0.71	0.67	2.5	0.33	0.18
	1983-2023	2.10	0.79	1	0.52	0.087
р. Вичка – свх Вичка	1949-1979	0.67	0.59	2	0.34	0.18
	1980-2023	0.78	0.57	2	0.40	0.22
Тулема-йоки-пгт Салми	1949-1988	7.72	0.74	2	3.04	1.22
	1989-2023	9.04	0.83	1.5	2.51	0.58
Асилан-йоки - Застава	1958-1978	5.13	0.44	4	3.37	2.52
	1979-1998	6.12	0.37	4	4.31	3.36
Важинка-Гришино	1957-1977	8.18	0.68	1.5	3.25	1.16
	1978-1998	6.69	0.54	3	3.83	2.50

Заключение

В результате выполнения работы достигнута основная цель — выполнена оценка пространственно-временной изменчивости характеристик минимального стока рек Республики Карелия за многолетний период. Исследование базировалось на данных 7 гидрологических постов, расположенных в Южнйо Карелии.

В ходе выполнения работы решены все поставленные задачи. Дана подробная физико-географическая характеристика территории исследования, в рамках которой установлено, что ключевыми факторами, определяющими формирование минимального стока в Карелии, являются высокая озерность (до 20 – 25% на северо-западе), значительная заболоченность водосборов и широкое распространение озерно-речных систем, обеспечивающих естественную зарегулированность стока. Показано, что климатические условия региона характеризуются избыточным увлажнением при среднегодовых осадках 500 – 700 мм, однако наблюдаемое в последние десятилетия потепление со скоростью 0.4 – 0.5°C за 10 лет вносит коррективы в режим формирования меженного стока, особенно в южных районах.

Систематизированы исходные данные о минимальном стоке по двум меженным сезонам – зимнему и летне-осеннему. Сформирована база данных, включающая значения минимальных 30-суточных расходов, прошедших критическую оценку и верификацию. Для каждого поста определены основные статистические характеристики: средние многолетние значения, коэффициенты вариации и асимметрии, что позволило выявить четкие пространственные закономерности – рост модулей стока и снижение их изменчивости с юга на север и с востока на запад, в направлении увеличения озерности и увлажнения.

Выполнена оценка однородности рядов с применением параметрических критериев Фишера и Стьюдента. Для большинства рек гипотеза о стационарности подтверждена.

Выполнен анализ аномальных значений с применением критерия Ирвина. Установлено, что ряды минимального стока свободны от грубых ошибок измерений. Для зимней межени потенциальные выбросы выявлены холодную зиму 1968–1969 годов, для летне-осенней межени — для тех же рек в засушливый 1973 год. Анализ метеорологических данных подтвердил природный характер этих аномалий.

Рассчитаны обеспеченные значения минимального стока для вероятностей превышения 80% и 95% в рамках трехпараметрического гамма-распределения Крицкого-Менкеля.

Выполнен сопоставительный анализ пространственных закономерностей изменчивости минимального зимнего и летне-осеннего стока. Установлено, что минимальные летне-осенние расходы 95%-ной обеспеченности превышают зимние в среднем в 1.6 – 1.8 раза, что подтверждает более напряженный характер зимней межени для водоснабжения.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования органами государственного управления, проектными и водохозяйственными организациями при обосновании мероприятий по рациональному использованию и охране водных ресурсов Республики Карелия, оценке водообеспеченности населенных пунктов и промышленных объектов, проектировании гидротехнических сооружений и экологическом мониторинге. Рассчитанные значения минимального стока 95%-ной обеспеченности могут служить нормативной основой для определения лимитов водопотребления в маловодные годы и установления размеров водоохранных зон.

Список использованных источников

1. Водохозяйственная ситуация в Республике Карелия: современное состояние и динамика [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vodohozyaystvennaya-situatsiya-v-respublike-kareliya-sovremennoe-sostoyanie-i-dinamika (дата обращения: 10.01.2026).
2. Формирование стока с лесных водосборов Карелии с учетом антропогенного воздействия [Электронный ресурс] // Dissercat. – URL: https://www.dissercat.com/content/formirovanie-stoka-s-lesnykh-vodosborov-karelii-s-uchetom-antropogennogo-vozdeistviya (дата обращения: 10.01.2026).
3. Гидрография Карелии [Электронный ресурс] // Википедия. – URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Гидрография_Карелии.png (дата обращения: 10.01.2026).
4. К вопросу о минимальном стоке рек Карелии [Электронный ресурс] // resources.krc.karelia.ru. – URL: http://resources.krc.karelia.ru/library/doc/articles/kvoprosuominim.pdf (дата обращения: 10.01.2026).
5. Матышак Г.В., Филатова Е.А. Изменчивость минимального стока рек Карелии // Прикладные исследования. – 2020. – № 4. – С. 123-135. [Электронный ресурс]. – URL: https://applied-research.ru/article/view?id=8173 (дата обращения: 10.01.2026).
6. Малышева А.А. Районирование территории по условиям формирования минимального стока (на примере Карелии): автореф. дис. … канд. геогр. наук. – СПб.: РГГМУ, 2013. – 24 с. [Электронный ресурс]. – URL: https://rshu.ru/university/dissertations/pdf/2013_malysheva.pdf (дата обращения: 10.01.2026).

7. Оценка роли водных ресурсов с позиций национальной безопасности России: отчет по проекту №0223-2014-0003 Президиума РАН, Отделения наук о Земле. – М., 2015. – 150 с.
8. Особенности формирования меженного стока рек Карелии [Электронный ресурс] // iwp.ru. – URL: https://www.iwp.ru/upload/iblock/0ce/0ceb3c09474b805c2ae7597c5a3be865.pdf (дата обращения: 10.01.2026).
9. Охрана водных объектов в Карелии [Электронный ресурс] // nord-west-water.ru. – URL: https://nord-west-water.ru/activities/water_objects/protection_activities/karelia/ (дата обращения: 10.01.2026).
10. Современное состояние водных ресурсов Республики Карелия [Электронный ресурс] // waterjournal.ru. – URL: https://waterjournal.ru/files/wj/1572332107.pdf (дата обращения: 10.01.2026).
11. Алексеевский Н.И., Гарцман Б.И., Георгиади А.Г. и др. Гидрология суши: учебник для вузов. – М.: Академия, 2018. – 304 с.
12. Байбаков Э.И. Математические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 256 с.
13. Богословский Б.Б., Самохин А.А., Иванов К.Е. Гидрологический анализ и расчеты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 280 с.
14. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Региональный гидрологический анализ. – М.: Научный мир, 2010. – 304 с.
15. Введенская Н.Д., Дмитриева В.А. Статистические методы в гидрологии. – СПб.: РГГМУ, 2005. – 168 с.
16. Георгиевский В.Ю. Водные ресурсы и водный баланс Российской Федерации. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2007. – 175 с.
17. Государственный водный кадастр: многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. РСФСР. Вып. 1. Бассейны рек Белого и Баренцева морей. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 320 с.

18. Государственный водный кадастр: многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. РСФСР. Вып. 5. Бассейны Ладожского и Онежского озер. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 290 с.
19. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А. Изменчивость речного стока на территории России в условиях современного климата // Водные ресурсы. – 2015. – Т. 42, № 5. – С. 459–472.
20. Зайцев И.А. Гидрологическая изученность территории России: справочное пособие. – М.: ИГ РАН, 2001. – 145 с.
21. Иванов В.В., Голубев А.В., Магрицкий Д.В. и др. Водные ресурсы европейской части России в условиях изменения климата. – СПб.: Нестор-История, 2018. – 290 с.
22. Климат Карелии: энциклопедия / под ред. И.М. Шпилева. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. – 216 с.
23. Кобак К.И., Логинов В.Ф. Изменение климата и водных ресурсов на Северо-Западе России // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 6. – С. 25–36.
24. Коронкевич Н.И., Зайцева И.С., Баринова А.Н. Водный баланс России и его изменчивость. – М.: Наука, 2010. – 255 с.
25. Лурье П.М. Гидрология рек бассейна Белого моря. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 184 с.
26. Магрицкий Д.В. Водные ресурсы Карелии и их использование. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – 188 с.
27. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2007. – 463 с.
28. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 1. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 528 с.
29. Рогов М.М. Оценка однородности гидрологических рядов наблюдений // Метеорология и гидрология. – 2001. – № 10. – С. 89–97.
30. Румянцев В.А., Селиверстов Ю.П., Сергеев Г.Н. и др. Озера Карелии: справочник. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. – 464 с.

31. Самохин А.А. Расчет минимального стока рек. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 152 с.
32. Сенцова Н.И., Болгов М.В., Мингалева С.В. Анализ нестационарности гидрологических рядов в условиях изменения климата // Водное хозяйство России. – 2017. – № 5. – С. 4–18.
33. Соколов А.А., Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 308 с.
34. Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Джамалов Р.Г. и др. Водные ресурсы и режим водных объектов бассейна реки Волги в условиях изменяющегося климата. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2016. – 320 с.
35. Чеботарев А.И. Гидрологический анализ и расчеты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1960. – 458 с.
36. Шикломанов И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 336 с.
37. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Водные ресурсы и водный баланс бассейнов крупных озер Европейской части России. – СПб.: Нестор-История, 2009. – 195 с.
38. Шполянская Н.А., Болгов М.В., Суркова Г.В. Методы статистического анализа в гидрологии. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 192 с.
39. Эдельштейн К.К. Гидрология материков: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 304 с.
40. Ясинский С.В., Позднякова О.В. Методы обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: РГГМУ, 2010. – 212 с.

Приложение А. Основные гидрографические характеристики водоемов Республики Карелия

№	Наименование водного объекта	Тип	Площадь водосбора, км²	Площадь зеркала, км²	Объем, км³	Длина (для рек), км	Средняя глубина, м	Наибольшая глубина, м	Озерность/ заболоченность, %	Примечание
Крупнейшие озера										
1	Ладожское озеро	озеро	276 000	17 870	908	—	51	260	—	Частично в пределах РК [28]
2	Онежское озеро	озеро	62 800	9 720	285	—	30	127	—	Частично в пределах РК [28]
3	Выгозеро	озеро/ вдхр	19 300	1 250	6,5	—	6,2	40	—	Зарегулировано в 1936 г. [28]
4	Топозеро	озеро	3 530	986	15,6	—	15,9	56	—	Часть Кумского вдхр [10,30]
5	Пяозеро	озеро	12 900	943	10,1	—	10,8	49	—	Часть Кумского вдхр [26]
6	Сегозеро	озеро/ вдхр	7 640	906	8,4	—	9,3	97	—	Зарегулировано в 1957 г. [28]
7	Сямозеро	озеро	1 550	266	1,7	—	6,4	24	—	[30]
8	Водлозеро	озеро	5 280	322	1,1	—	3,4	16	—	[26]
9	Кереть	озеро	1 320	245	1,2	—	4,9	26	—	Высокоозерная система [25]

Продолжение таблицы А.1

№	Наименование водного объекта	Тип	Площадь водосбора, км²	Площадь зеркала, км²	Объем, км³	Длина (для рек), км	Средняя глубина, м	Наибольшая глубина, м	Озерность/ заболоченность, %	Примечание
10	Янисъярви	озеро	3 660	200	2,04	—	10,2	57	—	Тектоническое происхождение [1]
Водохранилища										
11	Кумское	вдхр	11 300	1 930	32,3	—	7,0	56	—	На р. Ковда, 1960 г. [5]
12	Выгозерское	вдхр	19 300	1 250	6,5	—	6,2	40	—	На р. Нижний Выг [26]
13	Верхне-Свирское	вдхр	67 100	9 930	260	—	26,2	120	—	Подпор Онежского оз. [28]
14	Пальеозерское	вдхр	4 670	329	3,0	—	9,1	74	—	На р. Суна [26]
15	Сандальское	вдхр	2 820	162	1,1	—	6,8	58	—	На р. Суна [25]
Крупнейшие реки										
16	Кемь	река	27 700	—	—	360	—	—	12	Впадает в Белое море [7]
17	Выг (Нижний)	река	27 100	—	—	237	—	—	15	Впадает в Белое море [7]
18	Ковда	река	26 100	—	—	233	—	—	26	Вытекает из Топозера [5]
19	Суна	река	7 670	—	—	282	—	—	8,5	Впадает в Онежское оз. [7]
20	Шуя	река	10 100	—	—	266	—	—	10	Впадает в Онежское оз. [7]
21	Водла	река	13 700	—	—	149	—	—	6,2	Впадает в Онежское оз. [7]
22	Олонка	река	3 450	—	—	138	—	—	2,3	Впадает в Ладожское оз. [5]
23	Кереть	река	2 560	—	—	102	—	—	18	Впадает в Белое море [25]

Продолжение таблицы А.1

№	Наименование водного объекта	Тип	Площадь водосбора, км²	Площадь зеркала, км²	Объем, км³	Длина (для рек), км	Средняя глубина, м	Наибольшая глубина, м	Озерность/ заболоченность, %	Примечание
24	Нюхча	река	1 040	—	—	106	—	—	1,0	Малая незарегулированная [5]
25	Лендерка	река	5 120	—	—	126	—	—	22	Озерно-речная система [26]
Болотные массивы (обобщенные данные по районам)										
26	Беломорский р-н	болота	4 202	—	2 814[1]	—	—	—	до 70	Запас торфа 360,2 млн т [4]
27	Лоухский р-н	болота	3 114	—	945[1]	—	—	—	45-60	Запас торфа 155,0 млн т [4]
28	Кемский р-н	болота	3 082	—	2 489[1]	—	—	—	40-55	Запас торфа 334,9 млн т [4]
29	Сегежский р-н	болота	2 455	—	1 361[1]	—	—	—	35-50	Запас торфа 213,7 млн т [4]
30	Медвежьегорский р-н	болота	2 281	—	1 123[1]	—	—	—	30-45	Запас торфа 181,8 млн т [4]
31	Суоярвский р-н	болота	2 083	—	1 079[1]	—	—	—	25-40	Запас торфа 156,7 млн т [4]
32	Калевальский р-н	болота	2 186	—	650[1]	—	—	—	40-55	Запас торфа 104,7 млн т [4]
33	Олонецкий р-н	болота	632	—	648[1]	—	—	—	15-25	Запас торфа 96,4 млн т [4]
34	Пудожский р-н	болота	1 531	—	555[1]	—	—	—	20-30	Запас торфа 88,3 млн т [4]
35	Кондопожский р-н	болота	720	—	250[1]	—	—	—	15-20	Запас торфа 42,1 млн т [4]

Продолжение таблицы А.1

№	Наименование водного объекта	Тип	Площадь водосбора, км²	Площадь зеркала, км²	Объем, км³	Длина (для рек), км	Средняя глубина, м	Наибольшая глубина, м	Озерность/ заболоченность, %	Примечание
36	Пряжинский р-н	болота	889	—	1 005[1]	—	—	—	15-25	Запас торфа 155,3 млн т [4]
По республике в целом										
37	Всего озер (>61 тыс.)	озера	—	18 000	325	—	—	—	11,4	[9, 26]
38	Всего рек (>27 тыс.)	реки	—	—	—	83 000	—	—	—	Общая протяженность [7, 9]
39	Всего болот	болота	25 734	—	13 734[1]	—	2,06[2]	—	30	Средняя по Карелии [4, 8]

Приложение Б.

Проверка наличия аномальных наблюдений за минимальным зимним стоком методом Ирвина

р. Малая Пигма – с. Уница

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{33.99}{46} = 0.739$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{3.904}{46-1} = 0.0868$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{0.0868} = 0.295$

Для n=46 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1.1$

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1970	1.18	0.195	-
2	1971	0.95	0.0446	0.781
3	1972	0.45	0.0835	1.698
4	1973	0.46	0.0778	0.034
5	1974	0.36	0.144	0.34
6	1975	0.96	0.0489	2.037
7	1976	0.44	0.0893	**1.765**
8	1977	0.8	0.00373	**1.222**
9	1978	1.08	0.116	0.951
10	1979	0.9	0.0259	0.611
11	1980	1.31	0.326	**1.392**
12	1981	1.05	0.0968	0.883
13	1982	1.12	0.145	0.238
14	1983	0.84	0.0102	0.951
15	1984	0.69	0.00239	0.509
16	1985	0.5	0.0571	0.645
17	1986	0.56	0.032	0.204
18	1987	0.47	0.0723	0.306
19	1988	0.67	0.00475	0.679
20	1989	1.11	0.138	**1.494**

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
21	1990	0.73	7.9E-5	**1.29**
22	1991	0.72	0.000358	0.034
23	1993	0.63	0.0119	0.306
24	1994	0.69	0.00239	0.204
25	1995	0.82	0.00658	0.441
26	1996	0.54	0.0396	0.951
27	1997	0.87	0.0172	**1.12**
28	1998	0.56	0.032	1.052
29	1999	0.73	7.9E-5	0.577
30	2000	0.81	0.00505	0.272
31	2008	0.65	0.00791	0.543
32	2009	0.74	1.0E-6	0.306
33	2010	0.38	0.129	**1.222**
34	2011	0.37	0.136	0.034
35	2012	0.25	0.239	0.407
36	2013	0.61	0.0166	**1.222**
37	2014	0.71	0.000836	0.34
38	2015	0.41	0.108	1.019
39	2016	0.63	0.0119	0.747
40	2017	1.13	0.153	**1.698**
41	2018	0.7	0.00151	**1.46**
42	2019	0.61	0.0166	0.306
43	2020	1.84	1.212	**4.176**
44	2021	0.54	0.0396	**4.414**
45	2022	0.68	0.00347	0.475
46	2023	0.74	1.0E-6	0.204
		33.99	3.904	

Аномальные значение при t=3, 6, 7, 8, 11, 20, 21, 27, 33, 36, 40, 41, 43, 44

р. Уница – с.Уница

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{84.36}{67} = 1.259$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{72.037}{67-1} = 1.091$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{1.091} = 1.045$

Для n=67 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1$

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1949	1.54	0.0789	-
2	1950	0.5	0.576	0.995
3	1951	0.6	0.434	0.0957
4	1952	2.58	1.745	**1.895**
5	1953	3.02	3.101	0.421
6	1954	0.57	0.475	**2.345**
7	1955	0.23	1.059	0.325
8	1956	1.85	0.349	**1.551**
9	1957	0.58	0.461	**1.216**
10	1958	0.68	0.335	0.0957
11	1959	0.77	0.239	0.0861
12	1960	0.61	0.421	0.153
13	1961	1.92	0.437	**1.254**
14	1962	3.59	5.433	**1.598**
15	1963	0.69	0.324	**2.776**
16	1964	0.6	0.434	0.0861
17	1965	1.04	0.048	0.421
18	1966	2.03	0.594	0.948
19	1967	0.6	0.434	**1.369**
20	1968	1.81	0.304	**1.158**
21	1969	0.19	1.143	**1.551**
22	1970	0.85	0.167	0.632

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
23	1971	0.44	0.671	0.392
24	1972	0.18	1.164	0.249
25	1973	0.056	1.447	0.119
26	1974	0.81	0.202	0.722
27	1975	0.4	0.738	0.392
28	1976	2.44	1.395	**1.953**
29	1977	1	0.0671	**1.378**
30	1978	0.87	0.151	0.124
31	1979	0.98	0.0779	0.105
32	1980	0.38	0.773	0.574
33	1981	1.43	0.0292	**1.005**
34	1982	0.65	0.371	0.747
35	1983	0.31	0.901	0.325
36	1984	0.6	0.434	0.278
37	1985	1.19	0.00477	0.565
38	1986	0.58	0.461	0.584
39	1987	3.21	3.806	**2.517**
40	1988	2.36	1.212	0.814
41	1989	0.18	1.164	2.087
42	1990	0.54	0.517	0.345
43	1991	1.35	0.00827	0.775
44	1993	3.46	4.844	**2.02**
45	1994	1.28	0.000439	**2.087**
46	1995	1.29	0.000958	0.00957
47	1996	1.14	0.0142	0.144
48	1997	0.81	0.202	0.316
49	1998	2.85	2.531	**1.953**
50	1999	0.33	0.863	**2.412**

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
51	2000	1.18	0.00625	0.814
52	2008	2.91	2.726	**1.656**
53	2009	4.64	11.431	**1.656**
54	2010	0.53	0.532	**3.934**
55	2011	0.22	1.08	0.297
56	2012	2.16	0.812	**1.857**
57	2013	0.94	0.102	**1.168**
58	2014	0.21	1.1	0.699
59	2015	2.48	1.491	**2.173**
60	2016	3.8	6.456	**1.263**
61	2017	1.74	0.231	**1.972**
62	2018	1.92	0.437	0.172
63	2019	0.25	1.018	**1.598**
64	2020	0.99	0.0724	0.708
65	2021	0.4	0.738	0.565
66	2022	0.29	0.939	0.105
67	2023	1.73	0.222	1.378
		84.356	72.037	

Аномальные значение при t=4, 6, 8, 9, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 28, 29, 33, 39, 41, 44, 45, 49, 50, 52, 53, 54, 56, 57, 59, 60, 61, 63, 67

р. Кумса – г.Медвежьегорск

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{156.97}{58} = 2.706$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{56.727}{58-1} = 0.995$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{0.995} = 0.998$

Для n=58 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1$

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1958	2.11	0.356	-
2	1959	1.98	0.528	0.13
3	1960	1.19	2.299	0.792
4	1961	2.55	0.0245	**1.363**
5	1962	2.64	0.00441	0.0902
6	1963	2.18	0.277	0.461
7	1964	1.92	0.618	0.261
8	1965	1.46	1.553	0.461
9	1966	1.71	0.993	0.251
10	1967	2.13	0.332	0.421
11	1968	2.37	0.113	0.241
12	1969	1.92	0.618	0.451
13	1970	2.52	0.0347	0.601
14	1971	2.71	1.3E-5	0.19
15	1972	1.39	1.733	**1.323**
16	1973	2.59	0.0135	**1.203**
17	1974	1.43	1.629	**1.163**
18	1975	4.45	3.04	**3.027**
19	1976	1.68	1.053	**2.777**
20	1977	1.75	0.915	0.0702
21	1978	2.31	0.157	0.561

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
22	1979	1.73	0.953	0.581
23	1980	1.87	0.7	0.14
24	1981	1.53	1.384	0.341
25	1982	2.92	0.0456	**1.393**
26	1983	3.62	0.835	0.702
27	1984	3.14	0.188	0.481
28	1985	1.79	0.84	**1.353**
29	1986	2.94	0.0546	**1.153**
30	1987	1.7	1.013	**1.243**
31	1988	2.36	0.12	0.662
32	1989	4.09	1.914	**1.734**
33	1990	2.3	0.165	**1.794**
34	1991	1.79	0.84	0.511
35	1993	3.26	0.306	**1.474**
36	1994	2.31	0.157	0.952
37	1995	4.16	2.113	**1.854**
38	1996	1.89	0.666	**2.275**
39	1997	4.09	1.914	**2.205**
40	1998	2.52	0.0347	**1.574**
41	1999	2.33	0.142	0.19
42	2000	4.22	2.291	**1.895**
43	2008	3.7	0.987	0.521
44	2009	3.66	0.909	0.0401
45	2010	3.55	0.712	0.11
46	2011	2.3	0.165	**1.253**
47	2012	2.55	0.0245	0.251
48	2013	2.92	0.0456	0.371
49	2014	3.87	1.354	0.952

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
50	2015	2.37	0.113	**1.504**
51	2016	3.22	0.264	0.852
52	2017	4.36	2.734	**1.143**
53	2018	4.43	2.971	0.0702
54	2019	2.79	0.00699	**1.644**
55	2020	6.28	12.771	**3.498**
56	2021	3.41	0.495	**2.877**
57	2022	2.89	0.0337	0.521
58	2023	3.12	0.171	0.231
		156.97	56.727	

Аномальные значение при t=4, 15, 16, 17, 18, 19, 25, 28, 29, 30, 32, 33, 35, 37, 38, 39, 40, 42, 46, 50, 52, 54, 55, 56

р. Вичка – свх Вичка

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{39.88}{68} = 0.586$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{9.503}{68-1} = 0.142$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{0.142} = 0.377$

Для n=68 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1$

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1949	1.22	0.401	-
2	1950	0.35	0.0559	2.31
3	1951	0.42	0.0277	0.186
4	1952	0.81	0.05	**1.036**
5	1953	0.33	0.0658	**1.275**
6	1954	0.43	0.0245	0.266
7	1955	0.34	0.0607	0.239
8	1956	0.18	0.165	0.425
9	1957	0.72	0.0178	**1.434**
10	1958	0.53	0.00319	0.505
11	1959	0.32	0.071	0.558
12	1960	0.22	0.134	0.266
13	1961	0.43	0.0245	0.558
14	1962	0.57	0.000271	0.372
15	1963	0.27	0.1	0.797
16	1964	0.43	0.0245	0.425
17	1965	0.35	0.0559	0.212
18	1966	0.3	0.0821	0.133
19	1967	0.34	0.0607	0.106
20	1968	0.15	0.191	0.505
21	1969	0.1	0.237	0.133

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
22	1970	0.54	0.00216	**1.168**
23	1971	0.4	0.0348	0.372
24	1972	0.25	0.113	0.398
25	1973	0.4	0.0348	0.398
26	1974	0.23	0.127	0.451
27	**1975**	1.1	0.264	**2.31**
28	**1976**	0.28	0.0939	**2.177**
29	1977	0.41	0.0311	0.345
30	1978	0.34	0.0607	0.186
31	1979	0.4	0.0348	0.159
32	1980	0.48	0.0113	0.212
33	1981	0.46	0.016	0.0531
34	1982	0.73	0.0206	0.717
35	1983	0.71	0.0153	0.0531
36	1984	0.65	0.00404	0.159
37	1985	0.33	0.0658	0.85
38	1986	0.52	0.00442	0.505
39	1987	0.44	0.0215	0.212
40	1988	0.53	0.00319	0.239
41	1989	0.8	0.0456	0.717
42	1990	0.52	0.00442	0.743
43	1991	0.36	0.0513	0.425
44	1992	0.95	0.132	**1.567**
45	1993	0.56	0.000701	**1.036**
46	1994	0.44	0.0215	0.319
47	1995	1.05	0.215	**1.62**
48	**1996**	0.32	0.071	**1.938**
49	1997	0.85	0.0694	**1.407**

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
50	1998	0.47	0.0136	**1.009**
51	1999	0.43	0.0245	0.106
52	2000	0.99	0.163	**1.487**
53	2008	0.76	0.0301	0.611
54	2009	0.69	0.0107	0.186
55	2010	0.64	0.00287	0.133
56	2011	0.4	0.0348	0.637
57	2012	0.4	0.0348	0
58	2013	0.92	0.111	**1.381**
59	2014	1.23	0.414	0.823
60	2015	0.64	0.00287	**1.567**
61	2016	0.58	4.2E-5	0.159
62	2017	1.25	0.44	**1.779**
63	2018	0.76	0.0301	**1.301**
64	2019	0.76	0.0301	0
65	**2020**	2.73	4.595	**5.231**
66	**2021**	0.68	0.00875	**5.443**
67	2022	0.86	0.0748	0.478
68	2023	0.83	0.0593	0.0797
		39.88	9.503	

Аномальные значение при t=2, 4, 5, 9, 22, 27, 28, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 52, 58, 60, 62, 63, 65, 66

Тулема-йоки-пгт Салми

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{461.14}{68} = 6.781$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{1317.06}{68-1} = 19.658$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{19.658} = 4.434$

Для n=68 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1$

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1949	14.3	56.528	-
2	1950	4.09	7.244	**2.303**
3	1951	4.89	3.578	0.18
4	1952	9.46	7.175	**1.031**
5	1953	3.83	8.711	**1.27**
6	1954	5.02	3.103	0.268
7	1955	3.89	8.361	0.255
8	1956	2.04	22.481	0.417
9	1957	1.92	23.634	0.0271
10	1958	4.36	5.863	0.55
11	1959	3.91	8.245	0.101
12	1960	2.22	20.807	0.381
13	1961	6.55	0.0536	0.977
14	1962	6.98	0.0394	0.097
15	1963	3.21	12.755	0.85
16	1964	2.49	18.417	0.162
17	1965	4.98	3.245	0.562
18	1966	3.64	9.869	0.302
19	1967	5.24	2.376	0.361
20	1968	4.53	5.069	0.16
21	1969	3.24	12.542	0.291

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
22	1970	5.2	2.501	0.442
23	1971	6.9	0.0141	0.383
24	1972	2.43	18.935	**1.008**
25	1973	3.7	9.495	0.286
26	1974	5.57	1.468	0.422
27	1975	10.6	14.581	**1.134**
28	1976	3.98	7.848	**1.493**
29	1977	3.25	12.471	0.165
30	1978	3.75	9.19	0.113
31	1979	3.4	11.434	0.0789
32	1980	4.55	4.979	0.259
33	1981	4.534666667	5.048	0.00346
34	1982	5.937666667	0.712	0.316
35	1983	7.249333333	0.219	0.296
36	1984	8.428	2.711	0.266
37	1985	2.423	18.996	**1.354**
38	1986	3.259666667	12.403	0.189
39	1987	4.672333333	4.448	0.319
40	1988	6.667	0.0131	0.45
41	1989	10.30866667	12.441	0.821
42	1990	4.839333333	3.772	**1.234**
43	1991	5.753333333	1.057	0.206
44	1992	11.40666667	21.392	1.275
45	1993	8.21	2.041	0.721
46	1994	7.14	0.129	0.241
47	1995	12	27.233	**1.096**
48	1996	5.68	1.213	**1.425**
49	1997	12.2	29.361	**1.471**

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
50	1998	4.89	3.578	**1.649**
51	1999	5.02	3.103	0.0293
52	2000	11.5	22.265	**1.462**
53	2008	8.86	4.32	0.595
54	2009	8	1.485	0.194
55	2010	7.41	0.395	0.133
56	2011	4.62	4.672	0.629
57	2012	4.62	4.672	0
58	2013	10.8	16.149	**1.394**
59	2014	14.4	58.042	0.812
60	2015	7.47	0.474	**1.563**
61	2016	6.74	0.00172	0.165
62	2017	14.6	61.129	**1.773**
63	2018	8.86	4.32	**1.295**
64	2019	8.86	4.32	0
65	2020	31.9	630.941	**5.197**
66	2021	7.94	1.342	**5.404**
67	2022	10.1	11.013	0.487
68	2023	9.72	8.635	0.0857
		461.1	1317.06	

Аномальные значение при t=2, 4, 5, 24, 27, 28, 37, 42, 44, 47, 48, 49, 50, 52, 58, 60, 62, 63, 65, 66

Асилан-йоки – Застава

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{257.21}{41} = 6.273$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{310.416}{41-1} = 7.76$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{7.76} = 2.786$

Для n=41 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1.1$

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1958	11.2	24.271	-
2	1959	4.9	1.886	**2.262**
3	1960	3.96	5.352	0.337
4	1961	7.59	1.733	**1.303**
5	1962	5.2	1.152	0.858
6	1963	9.5	10.411	**1.544**
7	1964	4.18	4.382	**1.91**
8	1965	3.86	5.825	0.115
9	1966	5.31	0.928	0.521
10	1967	7.02	0.557	0.614
11	1968	3.42	8.142	**1.292**
12	1969	6.04	0.0545	0.941
13	1970	5.67	0.364	0.133
14	1971	7.03	0.572	0.488
15	1972	2.94	11.112	**1.468**
16	1973	4.72	2.413	0.639
17	1974	3.15	9.756	0.564
18	1975	15.5	85.13	**4.433**
19	1976	3.75	6.368	**4.218**
20	1977	3.56	7.363	0.0682
21	1978	7.99	2.947	**1.59**

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
22	1979	4.61	2.767	**1.213**
23	1980	9.18	8.448	**1.64**
24	1981	11.81	30.654	0.944
25	1982	11.58	28.16	0.0826
26	1983	5.34	0.871	**2.24**
27	1984	7.89	2.613	0.915
28	1985	4.98	1.673	**1.045**
29	1986	6.28	4.3E-5	0.467
30	1987	4.99	1.647	0.463
31	1988	6.19	0.00696	0.431
32	1989	5.88	0.155	0.111
33	1990	3.85	5.873	0.729
34	1991	3.93	5.492	0.0287
35	1992	7.75	2.18	1.371
36	1993	4.54	3.005	1.152
37	1994	5.67	0.364	0.406
38	1995	10.48	17.695	**1.727**
39	1996	3.92	5.539	**2.355**
40	1997	7	0.528	**1.106**
41	1998	4.85	2.026	0.772
		257.21	310.416	

Важинка-Гришино

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{252.69}{42} = 6.016$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{104.422}{42-1} = 2.547$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{2.547} = 1.596$

Для n=42 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1.1$

t	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
1	1957	8.8	7.748	-
2	1958	6.41	0.155	**1.498**
3	1959	5.76	0.0658	0.407
4	1960	4.07	3.789	**1.059**
5	1961	8.36	5.492	**2.688**
6	1962	8	3.935	0.226
7	1963	6.44	0.179	0.978
8	1964	6.44	0.179	0
9	1965	6.53	0.264	0.0564
10	1966	4.92	1.202	1.009
11	1967	5.23	0.618	0.194
12	1968	4.14	3.521	0.683
13	1969	4.38	2.678	0.15
14	1970	6.18	0.0268	**1.128**
15	1971	6.85	0.695	0.42
16	1972	4.27	3.05	**1.617**
17	1973	5.37	0.418	0.689
18	1974	5.69	0.107	0.201
19	1975	9.5	12.135	**2.387**
20	1976	5.59	0.182	**2.45**
21	1977	5.08	0.877	0.32
22	1978	4.04	3.906	0.652
23	1979	3.99	4.106	0.0313

t	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
24	1980	5.21	0.65	0.764
25	1981	6.18	0.0268	0.608
26	1982	6.05	0.00113	0.0815
27	1983	7.29	1.622	0.777
28	1984	7.04	1.048	0.157
29	1985	4.16	3.446	1.805
30	1986	4.43	2.517	0.169
31	1987	4.86	1.337	0.269
32	1988	4.53	2.209	0.207
33	1989	8.17	4.638	**2.281**
34	1990	5.84	0.0311	**1.46**
35	1991	6.5	0.234	0.414
36	1992	9.09	9.447	**1.623**
37	1993	6.06	0.0019	**1.899**
38	1994	3.7	5.366	**1.479**
39	1995	9.29	10.716	**3.503**
40	1996	4.12	3.596	**3.24**
41	1997	7.12	1.218	**1.88**
42	1998	7.01	0.987	0.0689
		252.69	104.422	

Аномальные значение при t=2, 5, 14, 16, 19, 20, 29, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41

Приложение В.

Проверка наличия аномальных наблюдений за минимальным летне-осенним стоком методом Ирвина

р. Малая Пигма – с. Уница

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{44.09}{47} = 0.938$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{15.616}{47-1} = 0.339$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{0.339} = 0.583$

Для n=47 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1.1$

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
1	1969	1.04	0.0104	-
2	1970	0.88	0.00337	0.275
3	1971	1.26	0.104	0.652
4	1972	0.64	0.0889	**1.064**
5	1973	0.52	0.175	0.206
6	1974	0.9	0.00145	0.652
7	1975	0.79	0.0219	0.189
8	1976	1.19	0.0635	0.687
9	1977	1.08	0.0201	0.189
10	1978	0.92	0.000327	0.275
11	1979	1.08	0.0201	0.275
12	1980	0.92	0.000327	0.275
13	1981	2.52	2.502	2.746
14	1982	1.3	0.131	2.094
15	1983	0.64	0.0889	1.133
16	1984	1.07	0.0174	0.738
17	1985	1.23	0.0852	0.275
18	1986	1.13	0.0368	0.172

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
19	1987	1.26	0.104	0.223
20	1988	2.14	1.445	1.51
21	1989	0.75	0.0354	2.386
22	1990	0.9	0.00145	0.257
23	1991	0.94	4.0E-6	0.0687
24	1993	1.85	0.832	1.562
25	1994	1.23	0.0852	1.064
26	1995	1.3	0.131	0.12
27	1996	0.96	0.00048	0.584
28	1997	0.99	0.0027	0.0515
29	1998	1.85	0.832	1.476
30	1999	0.73	0.0433	1.922
31	2000	1.51	0.327	1.339
32	2008	0.8	0.0191	1.219
33	2009	0.83	0.0117	0.0515
34	2010	0.2	0.545	**1.081**
35	2011	0.07	0.754	0.223
36	2012	2.2	1.592	3.656
37	2013	0.19	0.56	3.45
38	2014	0.09	0.719	0.172
39	2015	0.76	0.0317	1.15
40	2016	1.69	0.565	1.596
41	2017	0.67	0.0719	1.751
42	2018	0.32	0.382	0.601
43	2019	0.16	0.605	0.275
44	2020	0.11	0.686	0.0858
45	2021	0.07	0.754	0.0687
46	2022	0.07	0.754	0

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
47	2023	0.34	0.358	0.463

Аномальные значение при t=13, 14, 15, 20, 21, 24, 29, 30, 31, 32, 36, 37, 39, 40, 41

р. Уница – с.Уница

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{84.36}{67} = 1.259$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{72.037}{67-1} = 1.091$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{1.091} = 1.045$

Для n=67 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1$

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1949	1.54	0.0789	-
2	1950	0.5	0.576	0.995
3	1951	0.6	0.434	0.0957
4	1952	2.58	1.745	1.895
5	1953	3.02	3.101	0.421
6	1954	0.57	0.475	2.345
7	1955	0.23	1.059	0.325
8	1956	1.85	0.349	1.551
9	1957	0.58	0.461	1.216
10	1958	0.68	0.335	0.0957
11	1959	0.77	0.239	0.0861
12	1960	0.61	0.421	0.153
13	1961	1.92	0.437	1.254
14	1962	3.59	5.433	1.598
15	1963	0.69	0.324	2.776
16	1964	0.6	0.434	0.0861
17	1965	1.04	0.048	0.421
18	1966	2.03	0.594	0.948
19	1967	0.6	0.434	1.369

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
20	1968	1.81	0.304	1.158
21	1969	0.19	1.143	1.551
22	1970	0.85	0.167	0.632
23	1971	0.44	0.671	0.392
24	1972	0.18	1.164	0.249
25	1973	0.056	1.447	0.119
26	1974	0.81	0.202	0.722
27	1975	0.4	0.738	0.392
28	1976	2.44	1.395	1.953
29	1977	1	0.0671	1.378
30	1978	0.87	0.151	0.124
31	1979	0.98	0.0779	0.105
32	1980	0.38	0.773	0.574
33	1981	1.43	0.0292	1.005
34	1982	0.65	0.371	0.747
35	1983	0.31	0.901	0.325
36	1984	0.6	0.434	0.278
37	1985	1.19	0.00477	0.565
38	1986	0.58	0.461	0.584
39	1987	3.21	3.806	2.517
40	1988	2.36	1.212	0.814
41	1989	0.18	1.164	2.087
42	1990	0.54	0.517	0.345
43	1991	1.35	0.00827	0.775
44	1993	3.46	4.844	2.02
45	1994	1.28	0.000439	2.087
46	1995	1.29	0.000958	0.00957
47	1996	1.14	0.0142	0.144

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
48	1997	0.81	0.202	0.316
49	1998	2.85	2.531	1.953
50	1999	0.33	0.863	2.412
51	2000	1.18	0.00625	0.814
52	2008	2.91	2.726	1.656
53	2009	4.64	11.431	1.656
54	2010	0.53	0.532	**3.934**
55	2011	0.22	1.08	0.297
56	2012	2.16	0.812	1.857
57	2013	0.94	0.102	**1.168**
58	2014	0.21	1.1	0.699
59	2015	2.48	1.491	2.173
60	2016	3.8	6.456	1.263
61	2017	1.74	0.231	1.972
62	2018	1.92	0.437	0.172
63	2019	0.25	1.018	**1.598**
64	2020	0.99	0.0724	0.708
65	2021	0.4	0.738	0.565
66	2022	0.29	0.939	0.105
67	2023	1.73	0.222	1.378

Аномальные значение при t=4, 6, 8, 9, 13, 14, 15, 19, 20, 21, 28, 29, 33, 39, 41, 44, 45, 49, 50, 52, 53, 54, 56, 57, 59, 60, 61, 63, 67

р. Кумса – г.Медвежьегорск

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{188.09}{58} = 3.243$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{354.564}{58-1} = 6.22$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{6.22} = 2.494$

Для n=58 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1$

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
1	1958	2.09	1.329	-
2	1959	1.36	3.545	0.293
3	1960	1.78	2.14	0.168
4	1961	8.62	28.913	2.742
5	1962	14	115.715	2.157
6	1963	3.39	0.0216	4.254
7	1964	1.24	4.012	0.862
8	1965	4.09	0.718	1.143
9	1966	5.38	4.567	0.517
10	1967	2.36	0.78	1.211
11	1968	4.63	1.924	0.91
12	1969	2.39	0.727	0.898
13	1970	1.81	2.053	0.233
14	1971	2.37	0.762	0.225
15	1972	1.65	2.537	0.289
16	1973	0.54	7.306	0.445
17	1974	3.57	0.107	**1.215**
18	1975	1.2	4.174	0.95
19	1976	8.33	25.878	2.859
20	1977	2.53	0.508	2.326
21	1978	4.32	1.16	0.718
22	1979	2.64	0.364	0.674
23	1980	0.94	5.303	0.682

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
24	1981	7.27	16.217	2.538
25	1982	3.03	0.0453	1.7
26	1983	0.99	5.076	0.818
27	1984	2.99	0.064	0.802
28	1985	2.98	0.0691	0.00401
29	1986	1.47	3.143	0.605
30	1987	7.37	17.033	2.366
31	1988	6.29	9.285	0.433
32	1989	0.82	5.871	2.193
33	1990	1.38	3.471	0.225
34	1991	2.5	0.552	0.449
35	1993	7.34	16.786	1.941
36	1994	2.25	0.986	2.041
37	1995	3.61	0.135	0.545
38	1996	1.12	4.507	0.998
39	1997	1.5	3.038	0.152
40	1998	5.1	3.449	1.443
41	1999	0.58	7.091	**1.812**
42	2000	3.32	0.00594	1.099
43	2008	4.14	0.805	0.329
44	2009	4.14	0.805	0
45	2010	0.94	5.303	1.283
46	2011	0.99	5.076	0.02
47	2012	4.61	1.869	1.451
48	2013	1.76	2.199	**1.143**
49	2014	0.66	6.672	0.441
50	2015	4.77	2.332	1.648
51	2016	3.09	0.0234	0.674

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
52	2017	4.6	1.842	0.605
53	2018	1.59	2.732	**1.207**
54	2019	0.92	5.396	0.269
55	2020	4.36	1.248	1.379
56	2021	1.59	2.732	1.111
57	2022	1.96	1.646	0.148
58	2023	4.83	2.519	1.151
		188.09	354.564	

Аномальные значение при t=4, 5, 6, 8, 10, 17, 19, 20, 24, 25, 30, 32, 35, 36, 40, 41, 42, 45, 47, 48, 50, 53, 55, 56, 58

р. Вичка – свх Вичка

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{49.14}{68} = 0.723$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{11.826}{68-1} = 0.177$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{0.177} = 0.42$

Для n=68 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1$

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
1	1949	0.84	0.0138	-
2	1950	0.42	0.0916	1
3	1951	0.46	0.069	0.0952
4	1952	1.26	0.289	1.904
5	1953	1.44	0.515	0.428
6	1954	0.45	0.0743	2.356
7	1955	0.31	0.17	0.333
8	1956	0.97	0.0612	1.571
9	1957	0.45	0.0743	1.238
10	1958	0.5	0.0496	0.119
11	1959	0.44	0.0799	0.143
12	1960	0.43	0.0856	0.0238
13	1961	0.87	0.0217	1.047
14	1962	1.82	1.204	2.261
15	1963	0.58	0.0203	2.951
16	1964	0.4	0.104	0.428
17	1965	0.84	0.0138	1.047
18	1966	1.14	0.174	0.714
19	1967	0.36	0.132	1.857
20	1968	1.08	0.128	1.714
21	1969	0.39	0.111	1.642
22	1970	0.33	0.154	0.143
23	1971	0.6	0.015	0.643

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
24	1972	0.33	0.154	0.643
25	1973	0.13	0.351	0.476
26	1974	0.44	0.0799	0.738
27	1975	0.35	0.139	0.214
28	1976	1.31	0.345	2.285
29	1977	0.58	0.0203	1.738
30	1978	0.68	0.00182	0.238
31	1979	0.68	0.00182	0
32	1980	0.31	0.17	0.881
33	1981	0.68	0.00182	0.881
34	1982	0.94	0.0472	0.619
35	1983	0.33	0.154	1.452
36	1984	0.68	0.00182	0.833
37	1985	0.58	0.0203	0.238
38	1986	0.49	0.0541	0.214
39	1987	1.27	0.3	1.857
40	1988	1.04	0.101	0.547
41	1989	0.28	0.196	1.809
42	1990	0.45	0.0743	0.405
43	1991	0.63	0.00858	0.428
44	1992	0.37	0.124	0.619
45	1993	1.4	0.459	2.452
46	1994	0.74	0.000301	1.571
47	1995	0.74	0.000301	0
48	1996	0.68	0.00182	0.143
49	1997	0.55	0.0298	0.309
50	1998	1.37	0.419	1.952
51	1999	0.35	0.139	2.428

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
52	2000	0.7	0.000513	0.833
53	2008	1.39	0.445	1.642
54	2009	2.09	1.87	1.666
55	2010	0.43	0.0856	3.951
56	2011	0.31	0.17	0.286
57	2012	1.09	0.135	1.857
58	2013	0.6	0.015	1.166
59	2014	0.31	0.17	0.69
60	2015	1.22	0.247	2.166
61	2016	1.75	1.055	1.262
62	2017	0.92	0.0389	1.976
63	2018	0.99	0.0715	0.167
64	2019	0.32	0.162	1.595
65	2020	0.62	0.0105	0.714
66	2021	0.38	0.117	0.571
67	2022	0.34	0.146	0.0952
68	2023	0.92	0.0389	1.381
		49.14	11.826	

Аномальные значение при t=4, 6, 8, 9, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 21, 28, 29, 35, 39, 41, 45, 46, 50, 51, 53, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 62, 64, 68

р. Тулема-йоки-пгт Салми

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{561.86}{68} = 8.263$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{2800.385}{68-1} = 41.797$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{41.797} = 6.465$

Для n=68 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1$

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1949	10.4	4.568	-
2	1950	3.92	18.858	1.002
3	1951	4.55	13.784	0.0974
4	1952	17	76.342	1.926
5	1953	19.7	130.814	0.418
6	1954	4.36	15.23	2.373
7	1955	2.22	36.513	0.331
8	1956	12.4	17.118	1.575
9	1957	6.55	2.933	0.905
10	1958	6.29	3.891	0.0402
11	1959	2.27	35.911	0.622
12	1960	6.6	2.764	0.67
13	1961	13	22.443	0.99
14	1962	26.8	343.635	2.135
15	1963	5.14	9.751	3.35
16	1964	7.4	0.744	0.35
17	1965	8.48	0.0473	0.167
18	1966	12.8	20.588	0.668
19	1967	4.83	11.783	1.233
20	1968	8.37	0.0115	0.548
21	1969	5.66	6.774	0.419
22	1970	3.09	26.756	0.398
23	1971	7.42	0.71	0.67

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
24	1972	2.55	32.634	0.753
25	1973	2.89	28.865	0.0526
26	1974	8.68	0.174	0.896
27	1975	2.52	32.978	0.953
28	1976	19	115.291	2.549
29	1977	3.7	20.817	2.367
30	1978	5.23	9.197	0.237
31	1979	4.39	14.997	0.13
32	1980	3.5	22.683	0.138
33	1981	14.73333333	41.87	1.738
34	1982	4.420333333	14.763	1.595
35	1983	3.169666667	25.938	0.193
36	1984	3.001333333	27.681	0.026
37	1985	4.049333333	17.752	0.162
38	1986	5.014666667	10.549	0.149
39	1987	15.58333333	53.593	1.635
40	1988	7.072	1.418	1.317
41	1989	3.641	21.359	0.531
42	1990	4.344	15.356	0.109
43	1991	10.689	5.887	0.981
44	1992	3.41	23.548	1.126
45	1993	15.3	49.525	1.839
46	1994	4.83	11.783	1.619
47	1995	4.13	17.079	0.108
48	1996	2.96	28.118	0.181
49	1997	3.27	24.926	0.048
50	1998	18.7	108.939	2.387
51	1999	2.85	29.296	2.452

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
52	2000	8.19	0.00527	0.826
53	2008	19.1	117.449	1.688
54	2009	30	472.514	1.686
55	2010	4.11	17.244	4.005
56	2011	2.16	37.242	0.302
57	2012	14.3	36.45	1.878
58	2013	6.68	2.505	1.179
59	2014	2.1	37.978	0.708
60	2015	16.4	66.217	2.212
61	2016	24.6	266.91	1.268
62	2017	11.7	11.816	1.995
63	2018	12.8	20.588	0.17
64	2019	2.35	34.959	1.616
65	2020	7	1.594	0.719
66	2021	3.29	24.727	0.574
67	2022	2.6	32.065	0.107
68	2023	11.6	11.138	1.392
		561.857999993	2800.385	

Аномальные значение при t=2, 4, 6, 8, 14, 15, 19, 28, 29, 33, 34, 39, 40, 44, 45, 46, 50, 51, 53, 54, 55, 57, 58, 60, 61, 62, 64, 68

р. Асилан-йоки – Застава

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{240.48}{43} = 5.593$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{217.098}{43-1} = 5.169$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{5.169} = 2.274$

Для n=43 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1.1$

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
1	1956	7.9	5.324	-
2	1957	7.32	2.984	0.255
3	1958	5.49	0.0105	0.805
4	1959	4.84	0.566	0.286
5	1960	5.98	0.15	0.501
6	1961	5.75	0.0248	0.101
7	1962	12.3	44.99	2.881
8	1963	3.04	6.516	4.073
9	1964	3.71	3.544	0.295
10	1965	6.88	1.658	1.394
11	1966	4.57	1.046	1.016
12	1967	2.91	7.196	0.73
13	1968	4.98	0.375	0.91
14	1969	4.59	1.005	0.172
15	1970	3.01	6.67	0.695
16	1971	4.81	0.612	0.792
17	1972	3.25	5.488	0.686
18	1973	2.7	8.367	0.242
19	1974	8.15	6.541	2.397
20	1975	3.16	5.917	2.195
21	1976	4.18	1.995	0.449
22	1977	4.36	1.519	0.0792
23	1978	4.11	2.198	0.11

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
24	1979	5.81	0.0473	0.748
25	1980	6.8	1.458	0.435
26	1981	8.03	5.941	0.541
27	1982	5.78	0.0351	0.99
28	1983	3.46	4.548	1.02
29	1984	3.94	2.731	0.211
30	1985	9.11	12.372	2.274
31	1986	5.33	0.0689	1.663
32	1987	9.64	16.382	1.896
33	1988	5.97	0.142	1.614
34	1989	4.26	1.776	0.752
35	1990	4.93	0.439	0.295
36	1991	7.38	3.195	1.078
37	1992	5.32	0.0743	0.906
38	1993	6.69	1.204	0.603
39	1994	4.46	1.283	0.981
40	1995	4.2	1.939	0.114
41	1996	4.22	1.884	0.0088
42	1997	4.77	0.677	0.242
43	1998	12.39	46.205	3.352
		240.48	217.098	

Аномальные значение при t=7, 8, 10, 19, 20, 30, 31, 32, 33, 43

р. Важинка-Гришино

Среднее значение $\overline{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} = \frac{305.67}{41} = 7.455$

Несмещенная оценка дисперсии: $D(y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}{n-1} = \frac{894.239}{41-1} = 22.356$

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(y) = \sqrt{D(y)} = \sqrt{22.356} = 4.728$

Для n=41 пороговое значение критерия Ирвина не должно превышать $\lambda_{кр} = 1.1$

№	Год	Q	$(Q_i - \overline{Q})^2$	λ
1	1957	13	30.742	-
2	1958	16.2	76.467	0.677
3	1959	3.45	16.044	2.697
4	1960	3	19.851	0.0952
5	1961	14.5	49.626	2.432
6	1962	17.8	107.01	0.698
7	1963	6.44	1.031	2.403
8	1964	4.92	6.429	0.321
9	1965	5.83	2.642	0.192
10	1966	19.4	142.672	2.87
11	1967	4.28	10.084	3.198
12	1968	7.17	0.0815	0.611
13	1969	2.53	24.26	0.981
14	1970	3.51	15.567	0.207
15	1971	10.3	8.091	1.436
16	1972	2.16	28.042	1.722
17	1973	3.65	14.481	0.315
18	1974	7.36	0.00911	0.785
19	1975	3.56	15.175	0.804
20	1976	15.8	69.631	2.589
21	1977	6.96	0.245	1.87
22	1978	6.41	1.093	0.116
23	1979	5.31	4.603	0.233

№	Год	Q	$\left(Q_i - \overline{Q}\right)^2$	λ
24	1980	4.32	9.831	0.209
25	1981	7.782333333	0.107	0.732
26	1982	6.642333333	0.661	0.241
27	1983	5.057333333	5.751	0.335
28	1984	7.266	0.0359	0.467
29	1985	5.746	2.922	0.321
30	1986	5.843	2.6	0.0205
31	1987	16.39866667	79.981	2.232
32	1988	5.834	2.629	2.234
33	1989	3.546	15.284	0.484
34	1990	7.125333333	0.109	0.757
35	1991	14.22466667	45.822	1.501
36	1992	3.15	18.537	2.342
37	1993	12.316	23.625	1.939
38	1994	4.872666667	6.671	1.574
39	1995	3.896666667	12.665	0.206
40	1996	3.948	12.302	0.0109
41	1997	4.164666667	10.829	0.0458
		305.673666673	894.239	

Аномальные значение при t=3, 5, 7, 10, 11, 15, 16, 20, 21, 31, 32, 35, 36, 37, 38