МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Влияние многолетних климатических изменений на водный режим реки Суна**

Исполнитель Жигулёв Илья Алексеевич
(фамилия, имя, отчество)

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

Вампилова Людмила Борисовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«01» июня 2026 г.

Санкт–Петербург
2026

Содержание

Введение 2
1 Физико-географическая и гидрометеорологическая характеристика бассейна реки Суна 6
1.1 Тектонико-геологическое строение и рельеф 6
1.2 Климатическая характеристика бассейна реки Суны 9
1.3 Оценка современных региональных климатических изменений в бассейне Средней и Южной Карелии 13
1.4 Гидрологическая характеристика бассейна реки Суны 20
1.5 Почвенно-растительный покров бассейна и его влияние на питание рек 24
2 История гидротехнического освоения бассейна реки Суны 28
2.1 Характеристика гидротехнических сооружений: Пальеозерская ГЭС; Гирвасское водохранилище 28
2.2 Кондопожская ГЭС 32
3 Теоретические основы изучения гидрологического режима 38
3.1. Гидрометеорологическая изученность и история исследований водных объектов Карелии в работах отечественных ученых 38
3.2 Методологические подходы к оценке влияния климатических факторов на речной сток 42
4 Современное состояние бассейна реки Суна в результате гидротехнического освоения 48
4.1. Атмосферное воздействие 48
4.2. Воздействие на водную среду 52
Заключение 58
Список использованных источников 61

Введение

Актуальность темы исследования обусловлена возрастающим значением оценки климатических изменений и их влияния на гидрологический режим рек России в условиях глобального потепления. Река Суна, являясь одной из крупнейших водных артерий Республики Карелия, представляет собой уникальный объект для изучения трансформации водного режима под воздействием климатических факторов и антропогенной деятельности. Бассейн реки Суны характеризуется высокой степенью гидротехнического освоения, что создает дополнительные сложности в разделении естественных и антропогенных факторов изменения стока. В последние десятилетия на территории Карелии отмечаются значительные изменения температурного режима и режима атмосферных осадков, что непосредственно влияет на формирование речного стока, его внутригодовое распределение и экстремальные характеристики [1, с. 45].

Современные климатические изменения в бассейне Средней и Южной Карелии проявляются в повышении средних годовых температур воздуха, изменении продолжительности залегания снежного покрова, смещении сроков весеннего половодья и увеличении доли зимнего стока. Эти процессы оказывают существенное влияние на водный режим реки Суны, что имеет важное значение для функционирования гидроэнергетических объектов, водоснабжения населенных пунктов и сохранения экологического состояния водных экосистем. Понимание механизмов влияния климатических изменений на гидрологический режим необходимо для совершенствования методов гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в регионе и разработки мер адаптации к меняющимся природным условиям [3, с. 78].

Изучение многолетней динамики водного режима реки Суны в контексте региональных климатических изменений позволяет выявить закономерности трансформации гидрологических характеристик, оценить чувствитель-

ность речного стока к колебаниям метеорологических параметров и разработать практические рекомендации по оптимизации гидрометеорологического мониторинга. Особую актуальность данное исследование приобретает в условиях необходимости обеспечения устойчивого функционирования гидроэнергетического комплекса Карелии и сохранения водных ресурсов региона для будущих поколений.

Вопросы влияния климатических изменений на гидрологический режим рек активно исследуются в российской гидрометеорологии. Значительный вклад в изучение данной проблемы внесли работы сотрудников ГГИ (Государственного гидрологического института), ГГО им. А.И. Воейкова, Института водных проблем РАН. Исследования водных ресурсов Карелии проводились учеными Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, Карельского научного центра РАН, а также специалистами Карельского ЦГМС – филиала ФГБУ «Северо-Западное УГМС». Однако комплексный анализ многолетней трансформации водного режима реки Суны с учетом современных региональных климатических изменений и интенсивного гидротехнического освоения бассейна требует дальнейшего углубленного изучения [5, с. 112].

Цель работы – выявить закономерности влияния многолетних климатических изменений на динамику водного режима реки Суны и разработать практические рекомендации по гидрометеорологическому обеспечению хозяйственных объектов в бассейне.

Задачи исследования:

- дать комплексную физико-географическую и гидрометеорологическую характеристику бассейна реки Суны;

- проанализировать современные региональные климатические изменения в бассейне Средней и Южной Карелии;

- охарактеризовать историю гидротехнического освоения бассейна и его влияние на водный режим реки;

- изучить теоретические и нормативно-методические основы исследования гидрологического режима в системе Росгидромета;

- провести анализ трансформации водного режима реки Суны в многолетнем разрезе;

Объект исследования – река Суна и ее бассейн в пределах Республики Карелия.

Предмет исследования – закономерности изменения водного режима реки Суны под влиянием многолетних климатических изменений.

Теоретическую основу работы составили труды отечественных ученых в области гидрологии и климатологии: Б.Д. Зайкова, Е.Г. Попова, М.И. Львовича, П.С. Кузина, А.В. Рождественского, М.В. Болгова, Н.И. Алексеевского, а также специалистов по гидрометеорологии Карелии. Инструментальную базу составили данные стационарных гидрологических наблюдений на постах Росгидромета, материалы метеорологических станций, архивные данные Карельского ЦГМС. Применялись методы статистической обработки многолетних рядов стока, корреляционный анализ связей гидрологических и метеорологических характеристик, методы расчета норм стока и календарного распределения. Нормативно-техническую базу составили РД 52.08.566-94 «Методические указания. Проведение гидрометеорологических наблюдений на постах», СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», ГОСТ Р 22.1.15-2014 «Мониторинг природных чрезвычайных ситуаций». Источниковая база включает материалы Государственного водного реестра, данные ФГБУ «ГГИ», публикации в журналах «Метеорология и гидрология», «Водные ресурсы», труды конференций по проблемам гидрологии и климатологии.

Научная новизна исследования заключается в комплексном анализе многолетней динамики водного режима реки Суны с выделением климатической и антропогенной составляющих изменений стока, количественной оценке чувствительности гидрологических характеристик к региональным климатическим изменениям в условиях интенсивного гидротехнического освоения бассейна.

Теоретическая значимость работы состоит в углублении понимания механизмов влияния климатических изменений на гидрологический режим рек

таежной зоны Европейской части России, развитии методологических подходов к разделению естественных и антропогенных факторов трансформации стока.

Практическая значимость исследования определяется возможностью использования полученных результатов для совершенствования методов гидрометеорологического обеспечения гидроэнергетических объектов в бассейне реки Суны, оптимизации режимов работы водохранилищ, разработки мер адаптации водного хозяйства к изменяющимся климатическим условиям, а также для учебной и научно-исследовательской деятельности в области прикладной гидрометеорологии.

1 Физико-географическая и гидрометеорологическая характеристика бассейна реки Суна

1.1 Тектонико-геологическое строение и рельеф

Бассейн реки Суны расположен в юго-восточной части Республики Карелия и занимает площадь около 7670 км². Река берет начало из озера Кивиярви и впадает в Онежское озеро, являясь одним из его крупнейших притоков. Протяженность реки составляет 280 км, общее падение – около 56 м. Физико-географическое положение бассейна определяется его расположением в пределах Балтийского кристаллического щита, что обусловливает специфические черты рельефа, геологического строения и, как следствие, формирования водного режима реки [2, с. 23].

Геологическое строение территории бассейна характеризуется выходами на поверхность архейских и протерозойских кристаллических пород фундамента Балтийского щита. Основу геологического разреза составляют архейские гранито-гнейсы, гранитоиды и зеленокаменные образования возрастом более 2,5 млрд лет. Протерозойские отложения представлены метаморфическими сланцами, кварцитами, диабазами и гранитами рапакиви. Эти древние кристаллические породы характеризуются высокой плотностью, низкой пористостью и слабой водопроницаемостью, что существенно влияет на условия инфильтрации атмосферных осадков и формирование подземного питания рек [4, с. 67].

Тектоническое строение территории определяется принадлежностью к Карельскому блоку Балтийского щита, который представляет собой стабильную платформенную структуру, не испытывающую значительных современных тектонических движений. Однако древние тектонические нарушения, разломы и зоны трещиноватости оказывают существенное влияние на рельеф, гидрографическую сеть и гидрогеологические условия. Разломные зоны не-

редко контролируют направление речных долин и расположение озерных котловин, что характерно для территории Карелии в целом. Тектонические трещины в кристаллических породах способствуют развитию локальных зон повышенной водопроницаемости, обеспечивающих связь поверхностных и подземных вод [6, с. 89].

Рельеф бассейна реки Суны относится к типу моренно-холмистых денудационно-тектонических равнин с абсолютными отметками от 33 м (уровень Онежского озера) до 180 – 200 м в водораздельных частях. Средняя высота водосбора составляет около 110 – 120 м над уровнем моря. Характерной особенностью рельефа является его сильная расчлененность, обусловленная деятельностью четвертичных ледников и последующими процессами водной эрозии. Территория представляет собой чередование моренных холмов и гряд, сложенных ледниковыми отложениями, с понижениями, занятыми озерами, болотами и речными долинами [7, с. 134].

Ледниковый рельеф бассейна сформировался в результате многократных оледенений четвертичного периода, последнее из которых – валдайское – завершилось около 10 – 12 тысяч лет назад. Ледниковая экзарация привела к образованию характерных для Карелии форм рельефа: «бараньих лбов», курчавых скал, ледниковых шрамов на выходах коренных пород. Аккумулятивная деятельность ледника обусловила формирование моренных холмов и гряд, озовых гряд, камовых холмов. Моренные отложения представлены валунными суглинками и супесями с включениями обломочного материала различного размера – от валунов до песчано-глинистых частиц [8, с. 156].

Речные долины в бассейне Суны характеризуются слабой разработанностью, наличием многочисленных порогов и водопадов, что типично для рек, протекающих по территории кристаллического щита. Пороги образуются в местах выхода на поверхность устойчивых к размыву кристаллических пород. Наиболее известным является водопад Кивач высотой около 11 м, расположенный на реке Суне в 30 км от устья. Данный водопад является вторым по величине равнинным водопадом Европы и представляет собой уникальный природный объект, охраняемый в составе заповедника «Кивач» [9, с. 178].

Формирование порогов и водопадов связано с неравномерностью тектонических движений и различной устойчивостью горных пород к эрозии.

Озерность бассейна реки Суны составляет около 8 – 10%, что характерно для территории Карелии. Наиболее крупные озера бассейна – Кивиярви (площадь около 330 км²), Пальеозеро, Сандал, Гомсельгское, Кончезеро, Укшезеро – оказывают существенное влияние на формирование водного режима реки, выполняя регулирующую функцию. Озера аккумулируют поверхностный сток в период весеннего половодья и дождевых паводков, сглаживая пики расходов воды и обеспечивая более равномерный режим стока в течение года. Озерные котловины имеют преимущественно тектоническое и ледниково-тектоническое происхождение, их глубины достигают 20 – 40 м [11, с. 201].

Заболоченность территории бассейна составляет около 15 – 18%, что также является характерной чертой ландшафтов Карелии. Болота представлены преимущественно верховыми и переходными типами с преобладанием сфагновых мхов. Болотные массивы располагаются в понижениях рельефа, на плоских водораздельных участках с затрудненным стоком и на месте зарастающих озер. Болота играют важную роль в регулировании водного режима рек, задерживая поверхностный сток и обеспечивая питание рек в межень. Торфяные отложения болот имеют мощность от 1 до 5 м, в отдельных случаях достигая 7 – 8 м [12, с. 223].

Почвообразующие породы бассейна представлены преимущественно ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями различного гранулометрического состава. На повышенных элементах рельефа распространены моренные суглинки и супеси, в понижениях – флювиогляциальные пески и супеси, в озерных котловинах – озерно-ледниковые глины и суглинки. Коренные кристаллические породы выходят на поверхность на склонах возвышенностей, в долинах рек и на побережьях озер, образуя скальные обнажения [13, с. 245]. Гранулометрический состав рыхлых отложений определяет водно-физические свойства почв, условия инфильтрации осадков и формирования подземного стока.

Современные геоморфологические процессы в бассейне реки Суны протекают с относительно невысокой интенсивностью, что обусловлено слабой расчлененностью рельефа, преобладанием лесной растительности и устойчивым характером климата. Наибольшую активность проявляют процессы речной эрозии и аккумуляции, особенно в руслах рек и на побережьях озер. Склоновые процессы представлены преимущественно плоскостным смывом и медленным перемещением почвогрунтов в результате промерзания-оттаивания. На крутых склонах речных долин и озерных берегов наблюдаются локальные проявления оползневых процессов [14, с. 267]. В условиях глобального потепления климата возможна активизация термокарстовых процессов на торфяниках и усиление эрозионной деятельности рек в периоды интенсивных паводков.

Таким образом, тектонико-геологическое строение и рельеф бассейна реки Суны определяют специфические условия формирования водного режима реки: слабую водопроницаемость кристаллических пород фундамента, значительную озерность и заболоченность территории, порожистый характер русла. Эти природные особенности необходимо учитывать при анализе влияния климатических изменений на динамику стока и разработке мер гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в регионе.

1.2 Климатическая характеристика бассейна реки Суны

Климат бассейна реки Суны формируется под влиянием атлантических воздушных масс, определяющих умеренно-континентальный характер климата с относительно мягкой зимой и прохладным летом. Территория бассейна расположена в зоне избыточного увлажнения, где годовая сумма атмосферных осадков превышает испарение, что обеспечивает формирование значительного поверхностного стока. Климатические условия региона характеризуются большой изменчивостью погоды, обусловленной интенсивной циклонической деятельностью и частой сменой воздушных масс различного происхождения [15, с. 34].

Радиационный режим территории определяется высокоширотным положением региона (61 – 63° с.ш.), что обусловливает значительные различия в продолжительности дня по сезонам года. Суммарная солнечная радиация составляет 3200–3400 МДж/м² в год, радиационный баланс положительный и достигает 1400–1600 МДж/м² в год. Продолжительность солнечного сияния колеблется от 1600 до 1700 часов в год. В зимний период дефицит солнечной радиации компенсируется адвекцией тепла с атлантическими воздушными массами, что препятствует формированию экстремально низких температур. Летом инсоляция достигает максимальных значений в июне, когда продолжительность светового дня превышает 20 часов [16, с. 56].

Температурный режим бассейна характеризуется умеренными значениями с четко выраженным годовым ходом. Средняя годовая температура воздуха составляет +2.5…+3.0 °С. Самый холодный месяц – февраль со средней температурой –10…–12 °С, самый теплый – июль с температурой +15…+17 °С. Годовая амплитуда средних месячных температур достигает 26 –28 °С. Абсолютный минимум температуры воздуха составляет –45…–48 °С, абсолютный максимум +32…+35 °С. Продолжительность периода с положительными температурами составляет 190–200 дней, с температурами выше +10 °С – 110–120 дней. Сумма активных температур выше +10 °С достигает 1400 –1600 °С [17, с. 78].

Переход средней суточной температуры воздуха через 0 °С весной происходит в среднем в первой декаде апреля, осенью – в третьей декаде октября. Продолжительность безморозного периода в воздухе составляет 110 – 125 дней, на почве – 90 – 105 дней. Устойчивый снежный покров образуется в конце ноября – начале декабря и разрушается в конце апреля – начале мая. Продолжительность залегания снежного покрова составляет 150 – 165 дней. Высота снежного покрова к концу зимы достигает 50 – 70 см на открытых участках и 70 – 90 см в лесу [18, с. 101]. Снежный покров характеризуется значительной изменчивостью по годам, что связано с частыми оттепелями в зимний период.

Режим атмосферных осадков характеризуется относительно равномерным распределением в течение года с максимумом в теплый период. Годовая сумма осадков составляет 550 – 650 мм, из которых на теплый период (апрель – октябрь) приходится 350 – 400 мм (около 60 – 65%), на холодный период (ноябрь–март) – 200 – 250 мм (35 – 40%). Максимум осадков наблюдается в июле–августе (70–90 мм в месяц), минимум – в феврале – марте (30 – 40 мм). Число дней с осадками составляет 180 – 200 в год. Доля твердых осадков в годовой сумме составляет около 35 – 40%, жидких – 50 – 55%, смешанных – 5 – 10% [19, с. 123].

Снегонакопление в бассейне характеризуется значительной пространственной неоднородностью, обусловленной особенностями рельефа и растительного покрова. В лесу снежный покров на 20–30% мощнее, чем на открытых участках, благодаря меньшему уплотнению снега и защите от ветрового переноса. Запасы воды в снежном покрове к концу зимы составляют в среднем 100 – 150 мм на открытых участках и 130 – 180 мм в лесу. Максимальные запасы воды в снеге достигают 200 – 250 мм в многоснежные зимы, минимальные – 60–80 мм в малоснежные [20, с. 145]. Межгодовая изменчивость снегонакопления значительна и составляет 40 – 60% от средних многолетних значений.

Испарение с поверхности водосбора в бассейне реки Суны составляет 350 – 450 мм в год, что соответствует коэффициенту стока 0.4 – 0.5. Испарение имеет четко выраженный годовой ход с максимумом в июне – июле (70 – 90 мм в месяц) и минимумом в зимние месяцы (практически отсутствует). Испарение с водной поверхности озер составляет 450 – 550 мм в год, что несколько превышает испарение с суши. Транспирация лесной растительностью является основной составляющей испарения в вегетационный период и достигает 200 – 300 мм за сезон [21, с. 167]. Соотношение осадков и испарения определяет коэффициент увлажнения территории, который составляет 1.2 – 1.4, что соответствует зоне избыточного увлажнения.

Ветровой режим бассейна формируется под влиянием циклонической деятельности, особенно интенсивной в осенне-зимний период. Преобладающими направлениями ветра являются юго-западное и западное, связанные с прохождением атлантических циклонов. Средняя годовая скорость ветра составляет 3.5 – 4.5 м/с. Максимальные скорости ветра наблюдаются в осенне-зимний период и достигают 20 – 25 м/с при прохождении глубоких циклонов. Штилевые условия (скорость ветра менее 1 м/с) наблюдаются в 10 – 15% случаев, преимущественно в летний период при установлении антициклональной погоды [22, с. 189].

Относительная влажность воздуха в бассейне высокая в течение всего года и составляет в среднем 75 – 85%. Максимальные значения наблюдаются в осенне-зимний период (85 – 90%), минимальные – весной и в начале лета (65 – 70%). Высокая влажность воздуха обусловлена близостью крупных водоемов (Онежское озеро), наличием многочисленных озер и болот в бассейне, а также интенсивной циклонической деятельностью. Дефицит влажности воздуха, определяющий интенсивность испарения, максимален в июне–июле и составляет 5 – 8 гПа [23, с. 211].

Туманы в бассейне наблюдаются в среднем 30 – 40 дней в год с максимумом в осенний период (сентябрь – ноябрь), когда над относительно теплой водной поверхностью озер формируются адвективные и радиационные туманы. Облачность значительная в течение всего года: средняя годовая облачность составляет 7 – 8 баллов. Максимальная облачность наблюдается в осенне-зимний период (8 – 9 баллов), минимальная – весной и в начале лета (6 – 7 баллов). Число ясных дней составляет 20 – 30 в год, пасмурных – 150 – 170 дней [24, с. 233].

Термический режим почв определяется температурой воздуха, снежным покровом и физическими свойствами грунтов. Промерзание почвы начинается в октябре–ноябре, максимальная глубина промерзания достигает 80 – 120 см на открытых участках и 40 – 60 см под лесом, где снежный покров обеспечивает теплоизоляцию. Оттаивание почвы происходит в апреле – мае. В условиях глобального потепления наблюдается тенденция к уменьшению глубины

промерзания и сокращению продолжительности периода с промерзшими почвами, что влияет на условия формирования весеннего половодья [25, с. 255].

Таким образом, климатические условия бассейна реки Суны характеризуются умеренно-континентальным типом климата с избыточным увлажнением, что обеспечивает формирование значительного поверхностного стока. Основными климатическими факторами, определяющими водный режим реки, являются атмосферные осадки, температура воздуха, определяющая интенсивность снеготаяния и испарения, а также характеристики снежного покрова. Изменение этих климатических параметров в условиях современного потепления климата оказывает существенное влияние на трансформацию гидрологического режима реки Суны.

1.3 Оценка современных региональных климатических изменений в бассейне Средней и Южной Карелии

Современные климатические изменения в бассейне реки Суны, как и на всей территории Карелии, проявляются в виде устойчивого тренда повышения температуры воздуха, изменения режима атмосферных осадков, сокращения продолжительности залегания снежного покрова и трансформации других климатических характеристик. По данным метеорологических станций региона, наблюдается значительное потепление климата, особенно выраженное в холодный период года, что согласуется с общепланетарными тенденциями глобального изменения климата [26, с. 45].

Анализ данных метеорологических наблюдений за период с 1960-х годов по настоящее время показывает, что средняя годовая температура воздуха в регионе увеличилась на 1.5 – 2.0 °C. Наиболее интенсивное потепление наблюдается в зимние месяцы (декабрь–февраль), где рост температуры составляет 2.5 – 3.5 °C, что значительно превышает глобальные темпы потепления. Летние температуры также демонстрируют тенденцию к повышению, но

менее выраженную – около 0.8 – 1.2 °C за указанный период. Весенний и осенний периоды характеризуются промежуточными значениями роста температур – 1.2 – 1.8 °C [27, с. 67].

Повышение температуры воздуха приводит к смещению дат перехода средней суточной температуры через критические значения 0 °C, +5 °C и +10 °C. Весенний переход температуры через 0 °C в настоящее время происходит на 7 – 10 дней раньше, чем в 1960–1980-е годы, осенний переход – на 5–7 дней позже. Продолжительность безморозного периода увеличилась на 10 – 15 дней, продолжительность вегетационного периода – на 12 – 18 дней. Эти изменения оказывают существенное влияние на условия формирования весеннего половодья, интенсивность испарения и биологическую продуктивность водосбора [28, с. 89].

Режим атмосферных осадков также претерпевает значительные изменения. Анализ многолетних рядов показывает, что годовая сумма осадков имеет тенденцию к увеличению на 5 – 10% за последние 50 лет, хотя эта тенденция не является статистически значимой на всех станциях из-за высокой межгодовой изменчивости осадков. Более выраженные изменения наблюдаются во внутригодовом распределении осадков: отмечается увеличение доли жидких осадков в холодный период года на 15 – 25% за счет учащения зимних оттепелей и дождей [29, с. 112]. Летние осадки характеризуются увеличением доли ливневых осадков высокой интенсивности, что создает повышенный риск формирования дождевых паводков.

Изменения характеристик снежного покрова являются одним из наиболее выраженных проявлений климатических изменений в регионе. Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова сократилась на 10 – 15 дней за последние 50 лет, преимущественно за счет более позднего установления снежного покрова осенью (на 5 –7 дней) и более раннего его разрушения весной (на 5 – 8 дней). Средняя высота снежного покрова к концу зимы уменьшилась на 5 – 10 см (10 – 15% от средних многолетних значений). Запасы воды в снежном покрове снизились на 10 – 20 мм (8 – 12%), хотя в отдельные многоснежные зимы могут превышать норму [30, с. 134].

Изменение плотности снежного покрова связано с увеличением частоты зимних оттепелей, что приводит к образованию ледяных корок, уплотнению снега и изменению его теплоизоляционных свойств. Число дней с оттепелями в зимний период увеличилось на 20 – 30%, что создает неблагоприятные условия для зимовки растительности, влияет на промерзание почв и условия формирования весеннего половодья. Оттепели способствуют частичному таянию снега и формированию зимних оттаиваний, что нетипично для климатических условий региона [31, с. 156].

Изменение продолжительности ледостава на озерах и реках также отражает региональные климатические изменения. Даты установления ледостава на Онежском озере сместились на 7 – 12 дней к более поздним срокам, даты вскрытия – на 5 – 8 дней к более ранним. Общая продолжительность ледостава сократилась на 12 – 20 дней. На малых озерах и реках бассейна аналогичные тенденции выражены еще более отчетливо. Толщина льда к концу зимы уменьшилась на 5 – 10 см, что связано как с более поздним установлением ледостава, так и с повышением зимних температур [32, с. 178].

Изменение испарения с поверхности водосбора оценивается с меньшей точностью из-за отсутствия прямых длительных инструментальных наблюдений, однако расчетные методы и косвенные оценки указывают на увеличение годовых сумм испарения на 20 – 40 мм (5 – 10%) за последние десятилетия. Это увеличение связано с ростом температуры воздуха и удлинением вегетационного периода. Испарение с водной поверхности озер также увеличилось, особенно в периоды открытой воды до ледостава и после вскрытия [33, с. 201].

Повторяемость и интенсивность опасных гидрометеорологических явлений (ОГЯ) в регионе изменяются неоднозначно. С одной стороны, отмечается уменьшение повторяемости экстремально низких температур (ниже минус 35– минус 40 °С) и сильных морозов в зимний период. С другой стороны, увеличивается повторяемость сильных ливней (суточная сумма осадков более 50 мм), интенсивных снегопадов при положительных температурах, налипа-

ния мокрого снега на провода и деревья. Повторяемость засух в регионе остается низкой, но в отдельные годы (2002, 2010, 2014) отмечались локальные засушливые периоды с дефицитом осадков [34, с. 223].

Анализ индексов циркуляции атмосферы показывает усиление западного переноса над регионом, что проявляется в увеличении повторяемости циклонов атлантического происхождения, несущих теплые и влажные воздушные массы. Индекс Североатлантического колебания (NAO) демонстрирует тенденцию к преобладанию положительной фазы, что способствует усилению адвекции тепла в зимний период и, как следствие, потеплению климата региона. Изменения в циркуляции атмосферы являются ключевым фактором, определяющим региональные климатические изменения в бассейне Карелии [35, с. 245].

Таблица 1.1 – Изменение основных климатических характеристик в бассейне реки Суны за период 1961–1990 гг. и 1991–2020 гг.

Климатическая характеристика	1961–1990 гг.	1991–2020 гг.	Изменение
Средняя годовая температура воздуха, °C	+2,1	+3,7	+1,6
Средняя температура января, °C	–11,8	–9,2	+2,6
Средняя температура июля, °C	+15,9	+16,8	+0,9
Годовая сумма осадков, мм	595	625	+30
Осадки холодного периода, мм	225	245	+20
Источник: составлено по данным Карельского ЦГМС.			

Проекции будущих климатических изменений для региона, выполненные на основе глобальных и региональных климатических моделей, указывают на продолжение тенденции потепления в XXI веке. По различным сценариям выбросов парниковых газов (RCP), средняя годовая температура воздуха

в регионе к середине XXI века может увеличиться на 2 – 4 °С относительно современных значений, к концу века – на 4 – 6 °С по наиболее неблагоприятным сценариям. Годовая сумма осадков прогнозируется с увеличением на 10 – 20%, преимущественно за счет роста осадков в холодный период года [36, с. 267].

Последствия прогнозируемых климатических изменений для водного режима реки Суны включают: сокращение доли снегового питания реки, смещение сроков весеннего половодья на более ранние даты, увеличение доли дождевого и подземного питания, рост зимнего стока, изменение внутригодового распределения стока с уменьшением весенних максимумов и увеличением стока в зимнюю межень. Эти изменения создают новые вызовы для управления водными ресурсами бассейна, эксплуатации гидроэнергетических объектов и требуют адаптации систем гидрометеорологического мониторинга и обеспечения [37, с. 289].

Таким образом, современные региональные климатические изменения в бассейне Средней и Южной Карелии характеризуются устойчивой тенденцией потепления, особенно выраженной в холодный период года, изменением режима осадков с увеличением доли жидких осадков зимой, сокращением продолжительности и мощности снежного покрова, а также изменением гидрологического режима рек. Эти изменения необходимо учитывать при оценке трансформации водного режима реки Суны и разработке мер адаптации водного хозяйства к меняющимся климатическим условиям.

Для более подробного анализа климатических изменений в бассейне реки Суна была выбрана метеостанция Петрозаводск, данные по которой есть в открытом доступен. На первом этапе была построена суммарная интегральная кривая, представленная на рисунке 2.1. Анализ графика показывает, что потепление происходит значительно более высокими темпами, чем в среднем по планете и по России.

На графике чётко видна статистически значимая тенденция роста среднегодовых температур воздуха. Так, за последние 48 лет температура воздуха

выросла на 2.8°C. Важно отметить, что наиболее интенсивный рост температур наблюдается именно в последние десятилетия. На графике это выражается в том, что после 1980-х годов амплитуда колебаний увеличивается, а сами значения температур всё чаще превышают среднюю многолетнюю норму.

Проанализировав тренд роста температур имеет конкретные и измеримые последствия для реки Суна: трансформация гидрологического режима – повышение зимних температур и вызванные им оттепели напрямую ведут к учащению зимних паводков; сокращение ледового периода – период ледостава на реках и озёрах региона становится короче в среднем на три недели за последние 60 лет.

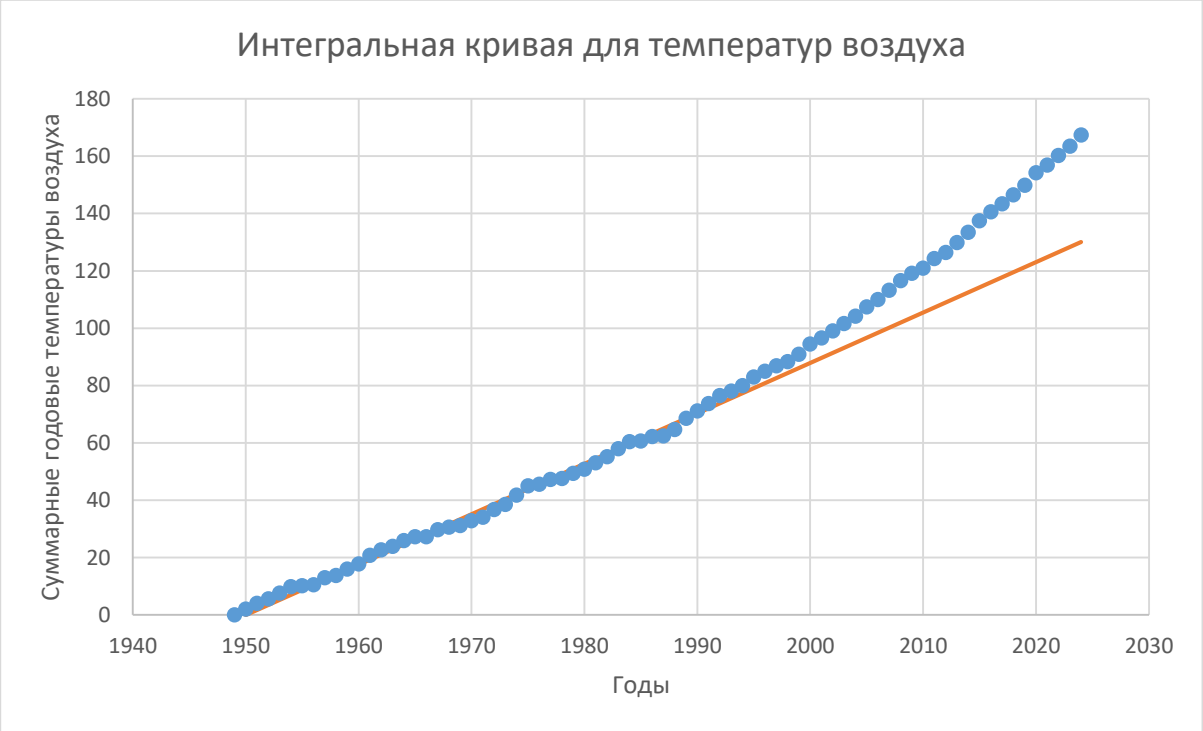


Рисунок 2.1- Интегральная кривая по метеостанции Петрозаводск

На графике (рисунок 2.2) среднемесячной температуры воздуха за июль для двух периодов: с 1950 по 1990 гг. и с 1991 по 2024 гг. (по данным метеостанции). Видно, что во втором (современном) периоде значения июльских температур в целом выше, чем в первом. Средняя температура июля за современный период составляет 17.2°C, что на 1.3 °C выше, чем за базовый период.

Разброс значений от года к году во втором периоде увеличился. Наиболее заметные аномально высокие температуры отмечены в 1972, 2001, 2010, 2011 годах. Полученный тренд согласуется с общим потеплением климата в Карелии и может влиять на температурный и гидрологический режим реки Суна в летний период.

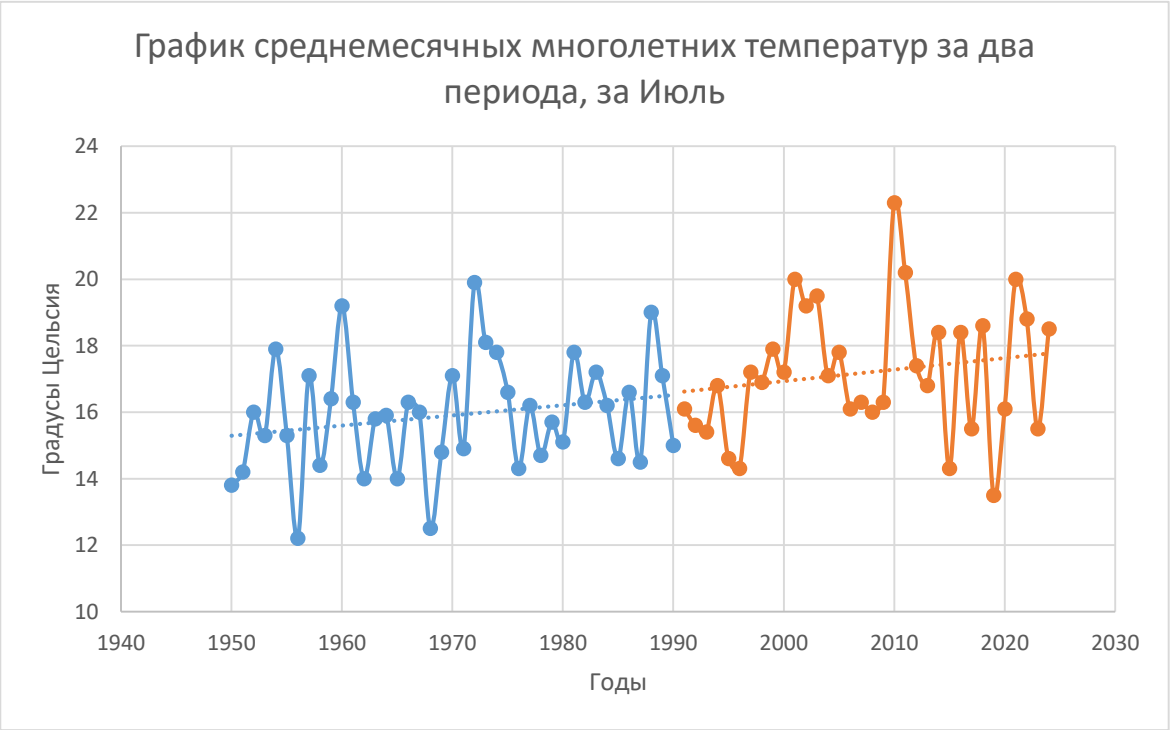


Рисунок 2.2 – Среднемесячные температуры воздуха за июль для двух разных временных периодов

Анализ сумм годовых осадков также произведён по данным метеостанции Петрозаводск. Согласно диаграмме (рисунок 2.3), увеличение сумм осадков до 700 – 800 мм/год наблюдалось редко (в 1966, 1981, 2004, 2007, 2012, 2021, 2023 гг.), чаще отмечались средние показатели увлажнения 500 – 600 мм/год. Малое количество осадков наблюдалось (в 1972, 1979, 1980, 1993 гг).

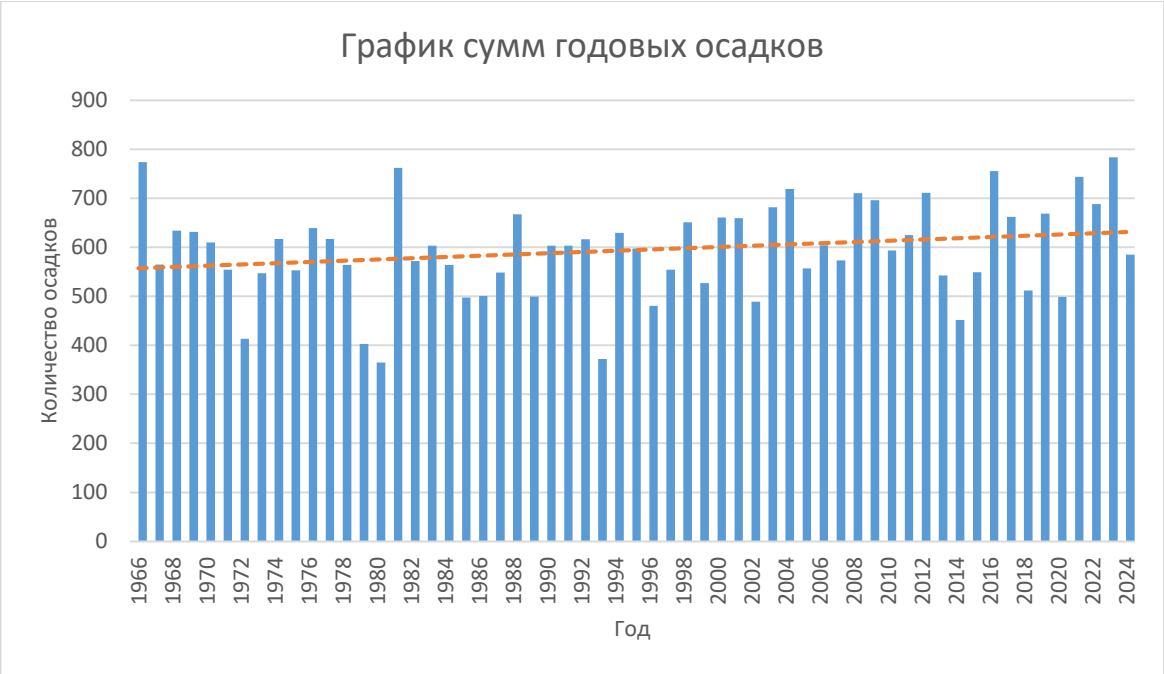


Рисунок 2.3 – График сумм годовых осадков

1.4 Гидрологическая характеристика бассейна реки Суны

Река Суна является одним из крупнейших притоков Онежского озера и занимает важное место в гидрографической сети Карелии. Основные морфометрические характеристики реки: длина 280 км, площадь водосбора 7670 км², средний уклон 0.2‰, общее падение 56 м. Река берет начало из озера Кивиярви на высоте 89 м над уровнем моря и впадает в Логмозерскую губу Онежского озера на отметке 33 м. Бассейн реки вытянут с северо-запада на юго-восток на 170 км при средней ширине около 45 км [7, с. 78].

Гидрографическая сеть бассейна характеризуется высокой густотой (около 0.4 – 0.5 км/км²) и включает многочисленные притоки, озера и болота. Основные притоки Суны – реки Ивина (длина 64 км), Кивач (45 км), Сандалка (32 км), Нигижма (28 км) – имеют преимущественно снеговое питание и типичный для региона водный режим с весенним половодьем и летне-осенней меженью. Озерность бассейна составляет 8 – 10%, заболоченность – 15 – 18%, лесистость – около 75%, что определяет условия формирования стока и его регулирования естественными факторами [9, с. 101].

Речная система Суны имеет сложное строение, включающее чередование озеровидных расширений, плесовых участков и порогов. Порожистые участки образуются в местах выхода на поверхность кристаллических пород и характеризуются высокими скоростями течения (до 3 – 5 м/с), малыми глубинами и каменистым дном. Наиболее известные пороги: Гирвасский (в настоящее время затоплен водохранилищем), Пор-Порог, пороги в районе водопада Кивач. Плесовые участки отличаются малыми уклонами, низкими скоростями течения (0.1 – 0.3 м/с) и значительными глубинами (до 5–8 м) [11, с. 123].

Русло реки характеризуется значительной неоднородностью морфологических характеристик. Ширина русла изменяется от 30 – 50 м на участках с быстрым течением до 200 – 400 м в озеровидных расширениях. Средняя ширина русла в нижнем течении составляет 100 – 150 м. Глубины на перекатах составляют 0.5 – 1.5 м, на плесовых участках – 3 – 7 м, в озеровидных расширениях достигают 10 – 15 м. Дно русла на порожистых участках сложено валунами и галькой, на плесах – песком с примесью гравия, в озеровидных расширениях – илистыми отложениями [12, с. 145].

Водный режим реки Суны относится к восточно-европейскому типу с преобладанием снегового питания, высоким весенним половодьем, летне-осенней меженью, прерываемой дождевыми паводками, и низкой зимней меженью. Питание реки смешанное: снеговое (50 – 60% годового стока), дождевое (20 – 25%), подземное (20 – 25%). Доля снегового питания имеет тенденцию к сокращению в последние десятилетия в связи с климатическими изменениями, в то время как доля дождевого и подземного питания увеличивается [14, с. 167].

Весеннее половодье на реке Суне начинается в середине–конце апреля и продолжается 1.5 – 2.5 месяца. Подъем уровня воды происходит интенсивно в течение 10 – 15 дней, спад более растянут и занимает 30 – 50 дней. Максимальные расходы воды наблюдаются в конце апреля – начале мая. Объем стока половодья составляет 50 – 65% годового стока реки. Коэффициент дружности половодья (отношение максимального расхода к среднему расходу половодья)

составляет 1.8 – 2.5, что указывает на относительно растянутый характер половодья, обусловленный озерностью и заболоченностью водосбора [15, с. 189].

Летне-осенняя межень характеризуется относительно низкими расходами воды с периодическими подъемами в период дождевых паводков. Дождевые паводки формируются при выпадении интенсивных обложных или ливневых осадков и могут наблюдаться в любое время с мая по ноябрь. Наиболее значительные паводки происходят в августе – сентябре, когда почвы насыщены влагой и сток формируется наиболее интенсивно. Подъем уровней воды в паводки составляет 0.5–1.5 м, продолжительность паводка – 5 – 15 дней. Объем стока летне-осенних паводков составляет 15 – 25% годового стока [17, с. 211].

Зимняя межень наступает после установления ледостава в ноябре–декабре и характеризуется наиболее низкими расходами воды в году, обусловленными преимущественно подземным питанием. Средние зимние расходы составляют 10 – 15% от средних годовых. Минимальные расходы наблюдаются в феврале–марте перед началом весеннего половодья. Однако в последние десятилетия отмечается тенденция к увеличению зимних расходов на 15 – 30% в связи с потеплением зим, увеличением частоты оттепелей и формированием зимних паводков [18, с. 233].

Таблица1.2 – Основные гидрологические характеристики реки Суны (створ у п. Кондопога)

Характеристика	Значение
Площадь водосбора, км²	7670
Средний многолетний расход воды, м³/с	75.3
Модуль стока, л/(с·км²)	9.82
Слой стока, мм	310
Максимальный расход воды (половодье), м³/с	520
Минимальный расход воды (зимняя межень), м³/с	18.5
Средний расход половодья, м³/с	245

Характеристика	Значение
Средний зимний расход, м³/с	32.0
Объем годового стока, км³	2.38
Источник: составлено по данным Государственного водного реестра	

Ледовый режим реки характеризуется устойчивым ледоставом продолжительностью 150 – 165 дней. Ледообразование начинается в конце октября – начале ноября с появления заберегов и шуги. Ледостав устанавливается в ноябре – декабре, сначала на плесовых участках, затем на порожистых. Толщина льда к концу зимы достигает 50 – 70 см на озеровидных расширениях и 30 – 50 см на участках с быстрым течением. Вскрытие реки происходит в конце апреля – начале мая и сопровождается заторами льда на порожистых участках, что может приводить к подъему уровней воды на 1 – 2 м выше обычных половодных уровней [20, с. 255].

Термический режим воды характеризуется четко выраженным годовым ходом. Температура воды начинает повышаться с момента вскрытия реки в конце апреля и достигает максимальных значений (+20…+22 °С) в июле. Осеннее охлаждение начинается в августе, температура 0 °С достигается в конце октября – начале ноября. Подледная температура воды зимой составляет 0…+0,5 °С. Амплитуда колебаний температуры воды в течение года составляет около 22 °С [21, с. 278].

Гидрохимический режим реки Суны характеризуется относительно низкой минерализацией воды (30 – 50 мг/л), что типично для рек Карелии, протекающих по территории кристаллических пород с низкой растворимостью. По химическому составу вода относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе. Цветность воды повышенная (40 – 80° хромово-кобальтовой шкалы) вследствие значительного содержания органических веществ гумусового происхождения, поступающих с заболоченных территорий. Содержание растворенного кислорода высокое (8 – 12 мг/л), что обусловлено хорошей аэрацией воды на порожистых участках [23, с. 301].

Наносы реки представлены преимущественно взвешенными частицами тонкого и мелкоалевритового состава. Мутность воды низкая (10 – 30 г/м³ в среднем за год) с максимумом в период весеннего половодья (50 – 100 г/м³). Средний расход взвешенных наносов составляет около 1 – 2 кг/с, годовой сток наносов – 30 – 60 тыс. т. Влекомые наносы перемещаются преимущественно на порожистых участках и представлены галькой и гравием. Интенсивность руслового процесса относительно невысокая из-за значительной доли скальных и валунных грунтов в русле [24, с. 324].

Таким образом, гидрологическая характеристика бассейна реки Суны свидетельствует о типичном для рек Карелии водном режиме с преобладанием снегового питания и весеннего половодья, высокой озерности и заболоченности водосбора, низкой минерализации воды и сложной морфологии русла с чередованием порожистых и плесовых участков. Естественный водный режим реки существенно нарушен гидротехническим строительством, что требует специального анализа антропогенного влияния.

1.5 Почвенно-растительный покров бассейна и его влияние на питание рек

Почвенно-растительный покров бассейна реки Суны играет важную роль в формировании водного режима реки, определяя условия поверхностного и подземного стока, интенсивность испарения и транспирации, задержание осадков растительным пологом и другие процессы влагооборота. Территория бассейна располагается в подзоне средней и южной тайги и характеризуется преобладанием хвойных и смешанных лесов на подзолистых и болотно-подзолистых почвах, что типично для ландшафтов Карелии [25, с. 45].

Лесистость бассейна составляет около 75%, что значительно выше среднего показателя по Европейской части России. Лесной покров представлен преимущественно хвойными породами – сосной обыкновенной (Pinus sylvestris) и елью европейской (Picea abies), на долю которых приходится соответственно 55% и 30% лесопокрытой площади. Лиственные породы – береза (Betula pendula, B. pubescens) и осина (Populus tremula) – занимают около 15%

и формируются, как правило, на месте вырубок или гарей. Средний возраст древостоев составляет 60 – 80 лет, запас древесины – 120 – 160 м³/га [26, с. 67].

Сосновые леса (беломошные, брусничные, черничные) приурочены к повышенным элементам рельефа с хорошо дренированными песчаными и супесчаными почвами. Еловые леса (кисличные, черничные, долгомошные) занимают более увлажненные местообитания на суглинистых моренных отложениях. В понижениях рельефа и на окраинах болот формируются заболоченные елово-березовые леса с участием ольхи серой. Травяно-кустарничковый ярус в сосновых лесах представлен брусникой, черникой, лишайниками (беломошниками), в еловых лесах – черникой, кислицей, зелеными мхами [27, с. 89].

Лесная растительность оказывает существенное влияние на формирование стока реки Суны через ряд процессов: задержание атмосферных осадков кронами деревьев (5 – 15% от суммы осадков), транспирацию (200–300 мм за вегетационный период), перераспределение снежного покрова, снижение скорости снеготаяния, уменьшение поверхностного стока и увеличение инфильтрации. Под пологом леса формируется более глубокий и рыхлый снежный покров с запасами воды на 20 – 30% выше, чем на открытых участках, что способствует более растянутому характеру весеннего половодья и увеличению доли подземного питания рек [28, с. 112].

Почвенный покров бассейна представлен преимущественно подзолистыми и болотно-подзолистыми почвами, формирующимися в условиях промывного типа водного режима и кислой реакции среды. Подзолистые почвы развиваются под хвойными и смешанными лесами на моренных и водно-ледниковых отложениях и характеризуются четко выраженным профилем с подзолистым горизонтом. Мощность почвенного профиля составляет 40–80 см, содержание гумуса в верхнем горизонте – 1.5 – 3.5%, реакция почвенного раствора кислая (pH 4.0 – 5.5) [29, с. 134].

Болотно-подзолистые почвы формируются в условиях периодического переувлажнения в понижениях рельефа и характеризуются наличием признаков оглеения. Эти почвы имеют более высокое содержание органического вещества (3 – 6% гумуса), но менее благоприятные водно-физические свойства

из-за уплотнения нижних горизонтов. Водопроницаемость подзолистых почв варьирует от умеренной до хорошей и составляет 1 – 5 мм/мин в зависимости от гранулометрического состава и степени увлажнения [30, с. 156].

Болота занимают около 15 – 18% площади бассейна и играют важную роль в регулировании водного режима рек, аккумулируя влагу в период избыточного увлажнения и отдавая ее в реки в засушливые периоды. Преобладают верховые (олиготрофные) сфагновые болота, занимающие около 60% от площади всех болот. Верховые болота характеризуются мощными торфяными залежами (3 – 5 м), растительность представлена сфагновыми мхами, пушицей, клюквой, багульником, угнетенной сосной. Эти болота питаются исключительно атмосферными осадками и имеют слабокислую реакцию среды (pH 3.5 – 4.5) [31, с. 178].

Низинные (эвтрофные) болота занимают около 25% от площади болот и приурочены к понижениям рельефа с проточным увлажнением грунтовыми и речными водами. Растительность представлена осоками, вахтой, хвощом, березой пушистой, ольхой. Мощность торфяной залежи 1 – 3 м, реакция среды близкая к нейтральной (pH 5.5 – 6.5). Переходные (мезотрофные) болота занимают промежуточное положение и составляют около 15% от площади болот [32, с. 201].

Влияние болот на водный режим рек проявляется в нескольких аспектах: задержание стока в период весеннего половодья и дождевых паводков за счет аккумуляции воды в торфяной залежи, поддержание меженного стока за счет медленной отдачи накопленной влаги, изменение химического состава речных вод вследствие поступления органических веществ гумусового происхождения. Коэффициент стока с заболоченных водосборов (0.45 – 0.55) несколько ниже, чем с лесных незаболоченных (0.50 – 0.60), что связано с увеличением испарения с поверхности болот [33, с. 223].

Луговая растительность в бассейне развита слабо и приурочена к долинам рек, побережьям озер и небольшим полянам в лесу. Общая площадь лугов не превышает 2 – 3% от территории бассейна. Антропогенно измененные земли (вырубки, гари, сельскохозяйственные угодья, населенные пункты) занимают

около 5 – 7% площади бассейна и характеризуются измененным режимом стока с увеличением коэффициента стока на 5 – 15% по сравнению с естественными ландшафтами [34, с. 245].

Водорегулирующая роль лесов и болот особенно важна в условиях изменяющегося климата. Сокращение площади лесов вследствие рубок, пожаров и ветровалов приводит к увеличению поверхностного стока, усилению эрозионных процессов, повышению мутности речных вод. Дренирование болот для сельскохозяйственных и лесохозяйственных нужд (в настоящее время практически прекращено) приводит к уменьшению их водорегулирующей функции и изменению внутригодового распределения стока [35, с. 267].

Климатические изменения влияют на состояние почвенно-растительного покрова через изменение температурного режима, продолжительности вегетационного периода, режима увлажнения. Потепление климата способствует продвижению на север более теплолюбивых видов растений, увеличению продуктивности лесов, но также создает риски распространения вредителей и болезней леса, увеличения повторяемости лесных пожаров. Эти изменения косвенно влияют на водный режим рек через трансформацию структуры и функций растительного покрова [36, с. 289].

Таким образом, почвенно-растительный покров бассейна реки Суны, представленный преимущественно хвойными лесами на подзолистых почвах и верховыми болотами, оказывает существенное влияние на формирование водного режима реки через процессы задержания осадков, транспирации, регулирования поверхностного и подземного стока. Высокая лесистость и заболоченность водосбора способствуют снижению пиков половодья и паводков, увеличению доли подземного питания и поддержанию меженного стока, что необходимо учитывать при оценке влияния климатических изменений на гидрологический режим реки.

2 История гидротехнического освоения бассейна реки Суны

2.1 Характеристика гидротехнических сооружений: Пальеозерская ГЭС; Гирвасское водохранилище

Гидротехническое освоение бассейна реки Суны началось в 1920-х годах и связано с реализацией плана ГОЭЛРО, предусматривавшего использование гидроэнергетического потенциала рек Карелии для электрификации региона. Первым крупным гидроэнергетическим объектом в бассейне стала Кондопожская ГЭС, введенная в эксплуатацию в 1929 году, однако в 1930-х годах началось проектирование и строительство дополнительных гидроузлов для комплексного использования водных ресурсов реки Суны. История гидротехнического освоения бассейна отражает общие тенденции развития гидроэнергетики в СССР и демонстрирует масштабное преобразование естественного водного режима реки [1, с. 112].

Пальеозерская ГЭС является одним из важнейших звеньев Сунского каскада гидроэлектростанций и расположена в 40 км к северу от города Кондопога. Гидроузел был построен в 1954 – 1955 годах с целью увеличения энергетических мощностей региона и регулирования стока реки Суны. Основным сооружением гидроузла является земляная плотина длиной 380 м и максимальной высотой 12 м, перегораживающая реку Суну и образующая Пальеозерское водохранилище. Здание ГЭС длиной 48 м примыкает к правому берегу реки и оборудовано тремя гидроагрегатами общей установленной мощностью 11 МВт [3, с. 67].

Пальеозерское водохранилище представляет собой озеровидное расширение русла реки Суны с площадью зеркала воды около 105 км² при нормальном подпорном уровне (НПУ) 102,5 м БС. Полный объем водохранилища составляет 990 млн м³, полезный объем – 450 млн м³. Максимальная глубина водохранилища достигает 25 м, средняя глубина – около 9.5 м. Водохранилище

имеет многолетнее регулирование стока, что позволяет накапливать воду в многоводные годы и периоды и расходовать ее в маловодные, обеспечивая стабильную работу гидроэлектростанций каскада [4, с. 89].

Водохранилище образовано путем подпора озер Пальеозеро, Святозеро и других более мелких озер в пойме реки Суны. Затопление территории при создании водохранилища составило около 15 км² дополнительной площади, преимущественно заболоченных земель и малопродуктивных лесов. Береговая линия водохранилища сильно изрезана, протяженность составляет около 450 км. Колебания уровня воды в водохранилище в процессе эксплуатации достигают 3 – 4 м, что приводит к формированию широкой зоны переменного подпора и активизации переработки берегов [5, с. 111].

Режим регулирования стока Пальеозерским водохранилищем оказывает существенное влияние на водный режим нижележащих участков реки Суны. В период весеннего половодья водохранилище аккумулирует значительную часть поступающего стока, что приводит к срезке пиков половодья на нижних участках реки. В меженный период, особенно зимой, осуществляется сработка водохранилища для обеспечения гарантированной мощности ГЭС, в результате чего зимние расходы воды в нижнем бьефе значительно (в 2 – 3 раза) превышают естественные значения [6, с. 134].

Гирвасское водохранилище расположено выше Пальеозерского по течению реки Суны и было создано в 1936 году в результате строительства земляной плотины в районе Гирвасских порогов. Плотина имеет длину около 200 м и высоту 8 м. Водохранилище относительно небольшое: площадь зеркала воды составляет около 12 км², полный объем – 25 млн м³, полезный объем – 10 млн м³. Максимальная глубина – 12 м, средняя – около 2 м. Водохранилище осуществляет сезонное регулирование стока и обеспечивает работу Гирвасской ГЭС мощностью 2,4 МВт [7, с. 156].

Таблица 2.1 – Основные характеристики Пальеозерской ГЭС и водохранилища

Характеристика	Значение
Год ввода в эксплуатацию	1955
Установленная мощность, МВт	11.0
Число гидроагрегатов	3
Среднегодовая выработка электроэнергии, млн кВт·ч	62
Длина плотины, м	380
Высота плотины, м	12
Нормальный подпорный уровень (НПУ), м БС	102.5
Площадь водохранилища при НПУ, км²	105
Полный объем водохранилища, млн м³	990
Полезный объем водохранилища, млн м³	450
Источник: составлено по данным ПАО «ТГК-1».	

Создание Гирвасского водохранилища привело к затоплению уникального Гирвасского водопада, который ранее был одной из достопримечательностей Карелии. В настоящее время водопад обнажается только в периоды низких уровней воды в водохранилище или при специальных попусках воды. Затопление водопада имело не только ландшафтно-эстетическое, но и экологическое значение, так как пороги служили местом нереста ценных видов рыб и препятствием для распространения организмов между верхним и нижним участками реки [8, с. 178].

Режим работы Гирвасского водохранилища характеризуется значительными суточными и недельными колебаниями уровня и расходов воды, связанными с неравномерностью энергопотребления. Суточные колебания уровня воды в нижнем бьефе могут достигать 1 – 1.5 м, что создает неблагоприятные условия для прибрежных экосистем и ограничивает рекреационное использо-

вание прибрежной зоны. Санитарные попуски воды осуществляются в минимально допустимых объемах, что приводит к ухудшению условий самоочищения водотока [9, с. 201].

Влияние Гирвасского и Пальеозерского водохранилищ на гидрологический режим реки Суны проявляется в трансформации естественного гидрографа стока: сглаживании пиков весеннего половодья и дождевых паводков, увеличении меженных расходов, особенно зимних, изменении внутригодового распределения стока, появлении искусственных колебаний уровней и расходов воды, связанных с режимом работы ГЭС. Коэффициент зарегулированности стока (отношение полезного объема водохранилищ к среднему годовому стоку) составляет около 0,19, что соответствует существенной степени зарегулированности [11, с. 223].

Трансформация гидрологического режима сопровождается изменением термического режима водохранилищ и нижних бьефов. Водохранилища характеризуются замедленным течением воды, что приводит к лучшему прогреву водной массы летом и формированию термической стратификации. Летние температуры воды в поверхностном слое водохранилищ на 2 – 3 °С выше, чем в естественных условиях русла реки. Зимой ледовый режим водохранилищ более устойчив, толщина льда на 5 – 10 см больше, чем на незарегулированных участках реки [12, с. 245].

Гидрохимический режим водохранилищ также претерпевает изменения: в застойных зонах наблюдается накопление органических веществ, снижение содержания растворенного кислорода в придонных слоях в летний период, увеличение концентрации биогенных элементов (азота, фосфора), активизация процессов эвтрофикации. В периоды интенсивного цветения воды (июль–август) прозрачность воды снижается до 1 – 2 м, что создает проблемы для водопользования [13, с. 267].

Экологические последствия создания водохранилищ включают: затопление и подтопление прибрежных территорий с изменением структуры прибрежных экосистем; переработку берегов в зоне переменного подпора со скоростью 0.5 – 2 м/год на незащищенных участках; изменение условий нереста

рыб с утратой естественных нерестилищ на порогах; трансформацию видового состава ихтиофауны со снижением численности реофильных (требующих течения) видов; барьерный эффект плотин, препятствующий миграции рыб [14, с. 289].

Переработка берегов водохранилищ является одним из негативных последствий гидротехнического строительства и связана с воздействием волн и течений на незащищенные берега, сложенные рыхлыми отложениями. Наиболее интенсивно переработка происходит в первые 10 – 15 лет после создания водохранилища, затем скорость размыва снижается. За период эксплуатации Пальеозерского водохранилища отступание берегов на отдельных участках составило 30 – 50 м [15, с. 312].

Таким образом, Пальеозерская ГЭС с водохранилищем и Гирвасское водохранилище являются важными элементами гидроэнергетического комплекса Карелии, обеспечивающими регулирование стока реки Суны и выработку электроэнергии. Вместе с тем создание этих гидротехнических сооружений привело к существенной трансформации естественного водного режима реки, изменению экологических условий водных и прибрежных экосистем, что необходимо учитывать при оценке влияния климатических изменений на гидрологический режим реки и разработке мер по оптимизации водопользования.

2.2 Кондопожская ГЭС

Кондопожская ГЭС является старейшей и крупнейшей гидроэлектростанцией в бассейне реки Суны и одним из первых объектов гидроэнергетики, построенных в рамках реализации плана ГОЭЛРО. Строительство станции началось в 1923 году, первый гидроагрегат был введен в эксплуатацию в 1929 году, полностью станция была завершена в 1936 году. Кондопожская ГЭС сыграла ключевую роль в индустриализации Карелии, обеспечив электроэнергией Кондопожский целлюлозно-бумажный комбинат и другие промышленные предприятия региона [2, с. 45].

Гидроузел Кондопожской ГЭС расположен в черте города Кондопога, в месте впадения реки Суны в Кондопожскую губу Онежского озера. Основным элементом гидроузла является здание ГЭС, совмещенное с бетонной водосливной плотиной. Общая длина напорного фронта составляет 140 м, максимальная высота плотины – 22 м. Конструкция ГЭС предусматривает использование перепада уровней между Сунозером (подпертым Пальеозерским водохранилищем через систему озер) и Онежским озером, составляющего около 18 м [4, с. 67].

Гидроэлектростанция оборудована пятью гидроагрегатами с вертикальными радиально-осевыми турбинами. Первоначальная установленная мощность станции составляла 50 МВт, после реконструкции и замены оборудования в 1980–1990-х годах мощность была увеличена до 58 МВт. Расчетный напор составляет 17,5 м, расчетный расход – 380 м³/с. Среднегодовая выработка электроэнергии составляет около 340 млн кВт·ч, что обеспечивает значительную долю энергопотребления Кондопожского промышленного района [5, с. 89].

Водохранилище Кондопожской ГЭС фактически представляет собой каскад подпертых озер: Сунозеро, Святозеро, частично Пальеозеро и другие озера бассейна Суны, объединенные в единую систему регулирования. Общая площадь зеркала воды водохранилища составляет около 180 км², полный объем – 1650 млн м³, полезный объем – 550 млн м³. Среднемноголетний приток воды к створу ГЭС составляет 75 м³/с или 2.37 км³ в год. Водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока с возможностью накопления запасов воды в многоводные годы и их использования в маловодные периоды [6, с. 112].

Таблица 2.2 – Основные технические характеристики Кондопожской ГЭС

Характеристика	Значение
Год ввода первого агрегата	1929
Год завершения строительства	1936
Установленная мощность, МВт	58
Число гидроагрегатов	5
Расчетный напор, м	17.5
Расчетный расход, м³/с	380
Среднегодовая выработка электроэнергии, млн кВт·ч	340
Нормальный подпорный уровень (НПУ), м БС	51.0
Площадь водохранилища (с подпертыми озерами), км²	180
Полный объем водохранилища, млн м³	1650
Полезный объем водохранилища, млн м³	550
Источник: составлено по данным ПАО «ТГК-1».	

Режим работы Кондопожской ГЭС определяется графиком электрической нагрузки энергосистемы Карелии и характеризуется неравномерностью выработки электроэнергии по часам суток, дням недели и сезонам года. Максимальная нагрузка приходится на утренние и вечерние часы рабочих дней, минимальная – на ночные часы и выходные дни. Неравномерность работы ГЭС приводит к значительным колебаниям расходов воды в нижнем бьефе: суточные колебания могут достигать 200 – 250 м³/с, что сопоставимо со средним расходом реки [7, с. 134].

Влияние режима работы Кондопожской ГЭС на нижний бьеф (участок реки от ГЭС до Онежского озера длиной около 500 м) проявляется в виде быстрых и значительных колебаний уровней и расходов воды. Амплитуда суточных колебаний уровня воды в непосредственной близости от ГЭС достигает 2 – 3 м, на расстоянии 200 – 300 м от створа ГЭС – 1 – 1.5 м. Эти колебания

создают неблагоприятные условия для водных и прибрежных экосистем, ограничивают рекреационное использование территории, осложняют навигацию [8, с. 156].

Ледовый режим нижнего бьефа Кондопожской ГЭС существенно отличается от естественного. Из-за сброса относительно теплой воды из водохранилища и интенсивной турбулизации потока в нижнем бьефе формируется полынья протяженностью 200–400 м, не замерзающая в течение всей зимы. Ниже по течению образуется неустойчивый ледяной покров, подверженный разрушениям при резких изменениях расходов воды. Это создает опасность для людей и ограничивает традиционные виды зимнего использования водного объекта [9, с. 178].

Гидрохимический режим водохранилища Кондопожской ГЭС характеризуется относительно невысокой минерализацией (40 – 60 мг/л), но повышенным содержанием биогенных элементов и органических веществ, поступающих со стоком реки Суны и с водосбора подпертых озер. В летний период наблюдается «цветение» воды, вызванное массовым развитием синезеленых водорослей, что приводит к ухудшению качества воды и создает проблемы для водопользования. Прозрачность воды в периоды цветения снижается до 1 – 1.5 м [11, с. 201].

Содержание растворенного кислорода в поверхностных слоях водохранилища остается высоким (8 – 10 мг/л) благодаря интенсивному перемешиванию и фотосинтетической деятельности водорослей. Однако в придонных слоях глубоководных участков в летний период формируется дефицит кислорода (до 2–4 мг/л), что связано с разложением органических веществ и затрудненным вертикальным обменом. Зимой подо льдом также наблюдается снижение содержания кислорода до 4 – 6 мг/л, что создает неблагоприятные условия для ихтиофауны [12, с. 223].

Влияние Кондопожской ГЭС на ихтиофауну проявляется в нескольких аспектах: барьерный эффект плотины препятствует миграции рыб между Онежским озером и верхними участками бассейна Суны; гибель рыб при прохождении через турбины ГЭС (турбинная гибель); изменение условий нереста

в результате затопления порожистых участков реки, служивших естественными нерестилищами; трансформация видового состава ихтиофауны с преобладанием озерных форм в водохранилище и снижением численности речных видов [13, с. 245].

Трансформация гидрологического режима реки Суны в результате создания каскада водохранилищ и работы ГЭС приводит к изменению условий формирования стока на всем протяжении реки ниже Кондопожской ГЭС. Естественный гидрограф стока с четко выраженным весенним половодьем и летне-осенней меженью заменяется искусственным режимом с относительно равномерным распределением стока в течение года и значительными кратковременными колебаниями, связанными с режимом работы ГЭС [14, с. 267].

Экономическая эффективность работы Кондопожской ГЭС остается высокой благодаря низкой себестоимости производства гидроэлектроэнергии, отсутствию затрат на топливо, длительному сроку службы оборудования (при своевременной модернизации), возможности быстрого изменения мощности в зависимости от потребностей энергосистемы. Вместе с тем экологические и социальные издержки гидротехнического строительства, связанные с трансформацией природной среды, ухудшением качества воды, утратой рекреационной привлекательности отдельных участков реки, не всегда учитываются в полной мере при оценке эффективности проекта [15, с. 289].

Перспективы развития Кондопожской ГЭС связаны с модернизацией оборудования для повышения коэффициента полезного действия, внедрением современных систем автоматического управления режимами работы, оптимизацией режимов попусков воды с учетом экологических требований. В условиях изменяющегося климата и трансформации гидрологического режима реки Суны требуется корректировка правил регулирования стока водохранилищами для обеспечения баланса между энергетическими, водохозяйственными и экологическими требованиями [16, с. 312].

Таким образом, Кондопожская ГЭС является ключевым объектом гидроэнергетического комплекса бассейна реки Суны, обеспечивающим значительную выработку электроэнергии для региона. Создание и эксплуатация

ГЭС привели к существенной трансформации естественного водного режима реки, изменению экологических условий водохранилища и нижнего бьефа. Анализ влияния климатических изменений на водный режим реки Суны должен учитывать антропогенный фактор регулирования стока водохранилищами, что осложняет выделение естественной климатической составляющей изменений стока.

3 Теоретические основы изучения гидрологического режима

3.1. Гидрометеорологическая изученность и история исследований водных объектов Карелии в работах отечественных ученых

Гидрометеорологическая изученность территории Карелии имеет длительную историю, начало которой было положено в конце XIX – начале XX века в связи с необходимостью изучения водных ресурсов региона для нужд лесосплава, судоходства и зарождающейся гидроэнергетики. Первые систематические гидрологические наблюдения на реках Карелии были организованы в 1910-х годах, а планомерное изучение водных объектов развернулось после создания в 1920-х годах государственной гидрометеорологической службы в рамках реализации плана ГОЭЛРО [17, с. 34].

Основателем систематических гидрологических исследований в Карелии считается инженер-гидролог Д.Ф. Чеглокова, которая в 1920 – 1930-х годах руководила гидрологическими изысканиями для проектирования Кондопожской ГЭС и других гидротехнических объектов. В ее работах были заложены методические основы изучения режима озерно-речных систем Карелии, особенностей формирования стока в условиях высокой озерности и заболоченности водосборов. Результаты этих исследований послужили базой для проектирования первых гидроэлектростанций региона [18, с. 56].

В 1930 – 1950-х годах изучение водных объектов Карелии проводилось преимущественно специалистами Ленинградского (Северо-Западного) управления гидрометеорологической службы, Государственного гидрологического института (ГГИ), а также проектными организациями «Гидропроект» и «Ленгидропроект». Значительный вклад в исследование гидрологического режима рек Карелии внесли ученые ГГИ: Б.Д. Зайков, разработавший классификацию рек СССР по типам водного режима; В.А. Урываев, исследовавший влияние озерности на сток рек; С.Ю. Белинков, изучавший закономерности формирования весеннего половодья на реках северо-запада России [19, с. 78].

Создание в 1946 году Карело-Финской базы Академии наук СССР (позднее – Карельский филиал АН СССР, Карельский научный центр РАН) положило начало комплексным научным исследованиям природы Карелии, включая гидрологию и гидробиологию водных объектов. В составе базы был организован Институт биологии (позднее переименован в Институт биологии КарНЦ РАН), в котором проводились исследования озер и рек региона. В 1990-х годах был создан Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ставший ведущим научным центром по изучению водных ресурсов Карелии [20, с. 101].

Фундаментальный вклад в изучение гидрологического режима озер и рек Карелии внесли ученые Института водных проблем Севера КарНЦ РАН: Н.Н. Филатов, разработавший теорию термогидродинамики крупных озер и исследовавший влияние климатических изменений на режим водных объектов Карелии; А.В. Литвиненко, изучавший гидрологический режим рек в условиях гидротехнического регулирования; Т.К. Регеранд, исследовавшая химический состав и качество вод озерно-речных систем; А.П. Георгиевский, анализировавший многолетние изменения водного режима рек северо-запада России [21, с. 123].

Важную роль в гидрометеорологической изученности Карелии играет Карельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Карельский ЦГМС) – филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС», осуществляющий систематические наблюдения на сети гидрологических постов и метеорологических станций региона. В настоящее время на территории Карелии функционирует около 30 гидрологических постов на реках и 15 постов на озерах, а также 20 метеорологических станций. Данные наблюдений аккумулируются в Государственном фонде данных о состоянии окружающей среды (ГФДОАС) и используются для научных исследований, прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений (ОГЯ) и обеспечения водопользователей [22, с. 145].

На реке Суне гидрологические наблюдения ведутся с 1920-х годов. Основной гидрологический пост – Кондопога – функционирует с 1929 года и

обеспечивает непрерывный ряд наблюдений за уровнями и расходами воды продолжительностью более 90 лет. Дополнительные посты были организованы в створах водохранилищ и ГЭС для обеспечения их эксплуатации. Данные многолетних наблюдений на посту Кондопога являются основой для анализа изменений водного режима реки в условиях климатических изменений и гидротехнического регулирования [23, с. 167].

Метеорологические наблюдения на территории бассейна реки Суны проводятся на метеостанциях Кондопога (с 1930 года), Петрозаводск (с 1916 года), Паданы (с 1936 года). Эти станции обеспечивают данные о температуре и влажности воздуха, атмосферном давлении, осадках, снежном покрове, скорости и направлении ветра, что необходимо для анализа климатических условий формирования стока и выявления региональных климатических изменений [24, с. 189].

Теоретические основы изучения водного режима рек в условиях высокой озерности и заболоченности были разработаны российскими учеными-гидрологами. М.И. Львович создал концепцию структуры водного баланса и выделил типы питания рек, что послужило основой для районирования территории России по условиям формирования стока. П.С. Кузин разработал методы расчета и прогноза весеннего половодья на реках с различными условиями формирования стока. Б.Д. Зайков предложил классификацию рек по типам водного режима, в которой реки Карелии отнесены к восточно-европейскому типу с весенним половодьем [25, с. 211].

Методы статистической обработки гидрологических данных и расчета характеристик речного стока различной обеспеченности были разработаны А.В. Рождественским, В.В. Ковалевым, С.Н. Крицким, М.Ф. Менкелем. Эти методы легли в основу нормативных документов по расчету основных гидрологических характеристик, используемых при проектировании гидротехнических сооружений и водохозяйственных систем. Современное развитие методов статистического анализа гидрологических рядов связано с работами М.В. Болгова, Н.И. Алексеевского, И.А. Шикломанова [26, с. 233].

Изучение влияния климатических изменений на гидрологический режим рек активно развивается в последние десятилетия в связи с наблюдаемым глобальным потеплением климата. Значительный вклад в эту область внесли работы И.А. Шикломанова, Георгиевского В.Ю., Коронкевича Н.И., исследовавших изменения водных ресурсов России под влиянием климатических факторов. Для территории Карелии подобные исследования проводятся специалистами Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, Карельского ЦГМС, а также учеными Санкт-Петербургского (Российского) государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) [27, с. 255].

Таблица 3.1 – Основные этапы гидрометеорологической изученности водных объектов Карелии

Период	Основные события и достижения
1910–1920-е гг.	Начало систематических гидрологических наблюдений; изыскания для строительства первых ГЭС
1930–1950-е гг.	Развертывание сети гидрологических постов; исследования ГГИ по режиму рек северо-запада России
1960–1980-е гг.	Создание Института биологии КарФАН СССР; комплексные исследования озерно-речных систем
1990–2010-е гг.	Создание Института водных проблем Севера КарНЦ РАН; исследование влияния климатических изменений
2010-е гг. – настоящее время	Применение современных методов мониторинга (дистанционное зондирование, автоматические станции); моделирование гидрологических процессов

Современный этап изучения водных объектов Карелии характеризуется применением новых технологий мониторинга и анализа данных: автоматизированных гидрологических постов с телеметрической передачей данных, дистанционного зондирования Земли для оценки характеристик снежного по-

крова и ледовых явлений, геоинформационных систем (ГИС) для пространственного анализа гидрометеорологических данных, математического моделирования гидрологических процессов с использованием физически обоснованных моделей формирования стока [28, с. 278].

Актуальными направлениями исследований в области гидрологии Карелии являются: оценка изменений водных ресурсов под влиянием климатических факторов; прогнозирование опасных гидрометеорологических явлений (весенних половодий, дождевых паводков, заторов льда); изучение экологического состояния водных объектов и разработка мер по их восстановлению; оптимизация режимов работы водохранилищ с учетом современных климатических условий; оценка влияния хозяйственной деятельности на водные ресурсы [29, с. 301].

Таким образом, гидрометеорологическая изученность территории Карелии и бассейна реки Суны имеет длительную историю и характеризуется наличием многолетних рядов наблюдений, накопленным научным опытом отечественных исследователей, развитой сетью наблюдательных постов. Это создает благоприятные условия для анализа многолетних изменений водного режима реки Суны, выявления влияния климатических факторов и разработки научно обоснованных рекомендаций по гидрометеорологическому обеспечению хозяйственной деятельности в бассейне.

3.2 Методологические подходы к оценке влияния климатических факторов на речной сток

Оценка влияния климатических факторов на речной сток представляет собой сложную научную задачу, требующую комплексного применения методов гидрологического анализа, математической статистики, физико-математического моделирования. Основной проблемой является разделение естественных климатических изменений стока и антропогенных изменений, связанных с хозяйственной деятельностью в бассейне (регулирование стока водохрани-

лищами, изъятие воды на водопотребление, изменение подстилающей поверхности). Для условий бассейна реки Суны эта проблема особенно актуальна в связи с интенсивным гидротехническим освоением [2, с. 45].

Методологические подходы к оценке влияния климатических факторов на сток можно разделить на несколько основных групп: статистические методы анализа многолетних рядов стока и метеорологических характеристик; методы водно-балансовых расчетов; методы корреляционного и регрессионного анализа связей между стоком и климатическими параметрами; методы математического моделирования процессов формирования стока. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и ограничения, поэтому на практике применяется их комбинация [4, с. 67].

Статистический анализ многолетних рядов стока включает: проверку однородности и стационарности гидрологических рядов; выявление трендов в многолетних изменениях стока; определение статистических характеристик стока (среднее, дисперсия, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии); построение кривых обеспеченности расходов воды; оценку повторяемости экстремальных значений стока. Для выявления трендов используются параметрические (критерий Стьюдента) и непараметрические (критерий Манна-Кендалла) методы [5, с. 89].

Проверка однородности гидрологических рядов необходима для выявления моментов существенного изменения условий формирования стока, связанных с антропогенными факторами (строительство водохранилищ, изменение водопотребления) или естественными климатическими изменениями. Для проверки однородности применяются критерии Стьюдента, Фишера, Вилкоксона, метод двойных сумм. Нарушение однородности ряда указывает на необходимость разделения ряда на периоды с различными условиями формирования стока и раздельного анализа этих периодов [6, с. 112].

Корреляционный анализ связей между стоком и климатическими характеристиками (температурой воздуха, осадками, испарением, характеристиками снежного покрова) позволяет количественно оценить влияние отдельных

факторов на формирование стока и выявить наиболее значимые факторы. Вычисляются коэффициенты парной и множественной корреляции между годовым стоком, стоком отдельных сезонов и климатическими параметрами. Для условий бассейна реки Суны наиболее тесные связи обычно наблюдаются между объемом весеннего половодья и запасами воды в снежном покрове, между годовым стоком и годовой суммой осадков [7, с. 134].

Регрессионный анализ используется для построения эмпирических зависимостей стока от климатических факторов, которые могут применяться для восстановления пропущенных данных, приведения рядов стока к однородным условиям, прогнозирования изменений стока при сценариях климатических изменений. Наиболее часто используются линейные регрессионные модели вида $Q = a + b \cdot P + c \cdot T$, где Q – сток, P – осадки, T – температура воздуха, a, b, c – коэффициенты регрессии, определяемые методом наименьших квадратов. Качество регрессионных моделей оценивается по коэффициенту детерминации R^2 и среднеквадратической ошибке [8, с. 156].

Водно-балансовые методы основаны на уравнении водного баланса водосбора: $P = R + E + \Delta W$, где P – атмосферные осадки, R – речной сток, E – испарение, ΔW – изменение запасов воды в бассейне. При многолетнем осреднении изменением запасов можно пренебречь ($\Delta W \to 0$), и уравнение принимает вид: $R = P - E$. Изменение стока при климатических изменениях может быть оценено как $\Delta R = \Delta P - \Delta E$, где ΔP и ΔE – изменения осадков и испарения. Основная сложность этого подхода связана с оценкой испарения, которое непосредственно не измеряется [9, с. 178].

Испарение с водосбора может быть оценено различными методами: по формулам теплового баланса (Будыко, Кузмина); по эмпирическим зависимостям от температуры воздуха и дефицита влажности (Иванов, Константинов); по методу водного баланса как разность осадков и стока; по данным испарителей (с поправочными коэффициентами). Для условий Карелии испарение за вегетационный период составляет 300–400 мм, что соответствует 50–60% от суммы осадков за этот период [11, с. 201].

Физико-математическое моделирование формирования стока позволяет учесть пространственную неоднородность характеристик водосбора, процессы трансформации осадков в сток, влияние подстилающей поверхности. Применяются модели различной степени сложности: концептуальные модели (SACRAMENTO, HBV, TANK); модели на основе уравнений водного и теплового баланса (ECOMAG, SWAP); гидродинамические модели (MIKE SHE, SWAT). Модели требуют калибровки параметров по данным наблюдений и верификации на независимом периоде [12, с. 223].

Для оценки влияния климатических изменений на сток используется подход сценарного моделирования: гидрологическая модель калибруется на современном периоде, затем в качестве входных данных используются сценарии будущих климатических изменений, полученные из глобальных или региональных климатических моделей. Результатом является оценка возможных изменений стока (среднего многолетнего, внутригодового распределения, экстремальных значений) при реализации того или иного климатического сценария. Основная неопределенность этого подхода связана с неопределенностью климатических сценариев [13, с. 245].

Для разделения естественных и антропогенных изменений стока применяются специальные методы: метод аналогов (сравнение с незарегулированными реками-аналогами); метод восстановления естественного стока по связям с климатическими характеристиками; метод двойных интегральных кривых (для выявления момента изменения условий стока); сопоставление изменений стока и климатических характеристик (если изменения стока коррелируют с климатическими, они вероятно имеют климатическую природу). Для реки Суны разделение осложнено отсутствием крупных незарегулированных рек-аналогов в регионе [14, с. 267].

Таблица 3.2 – Основные методы оценки влияния климатических факторов на речной сток

Метод	Преимущества	Ограничения
Статистический анализ временных рядов	Простота применения; выявление трендов и циклов	Не учитывает физику процессов; требует длительных рядов наблюдений
Корреляционно-регрессионный анализ	Количественная оценка связей; возможность прогноза	Статистические связи не всегда отражают причинно-следственные отношения
Водно-балансовые расчеты	Физическая обоснованность; учет всех компонентов баланса	Сложность оценки испарения; высокая погрешность
Математическое моделирование	Учет пространственной неоднородности; прогнозные возможности	Требует больших объемов данных; неопределенность параметров модели

Оценка чувствительности стока к изменениям климатических параметров выполняется путем вычисления коэффициентов эластичности: $\varepsilon P = (\Delta R/R)/(\Delta P/P)$ – эластичность стока по осадкам; $\varepsilon T = (\Delta R/R)/(\Delta T/T)$ – эластичность стока по температуре, где ΔR, ΔP, ΔT – изменения стока, осадков и температуры. Коэффициенты эластичности показывают, на сколько процентов изменится сток при изменении климатического фактора на 1%. Для рек гумидной зоны типичны значения $\varepsilon P = 1{,}5–2{,}5$ (сток более чувствителен к осадкам) и $\varepsilon T = –0{,}5…–1{,}5$ (рост температуры снижает сток за счет увеличения испарения) [15, с. 289].

Анализ внутригодового распределения стока позволяет выявить изменения сезонной структуры стока, смещение сроков половодья и паводков, изменение их характеристик. Для этого применяются методы: построение внутри-

годовых гидрографов для различных периодов и их сопоставление; вычисление календарных дат характерных фаз водного режима (начало половодья, дата максимального расхода, окончание половодья) и анализ их изменений; расчет объемов стока по сезонам года и их многолетней динамики. Для реки Суны ожидается смещение начала половодья на более ранние даты (конец марта вместо середины апреля) и уменьшение объема половодья за счет увеличения зимнего стока [16, с. 312].

Таким образом, методологические подходы к оценке влияния климатических факторов на речной сток включают комплекс статистических, балансовых и модельных методов, позволяющих количественно оценить связи между изменениями климата и изменениями стока, разделить естественные и антропогенные факторы трансформации гидрологического режима, спрогнозировать возможные изменения водных ресурсов при сценариях будущих климатических изменений. Применение этих методов к условиям бассейна реки Суны требует учета высокой озерности и заболоченности водосбора, существенного влияния регулирования стока водохранилищами, что определяет специфику анализа и интерпретации результатов.

4 Современное состояние бассейна реки Суна в результате гидротехнического освоения

4.1. Атмосферное воздействие

Гидротехническое освоение бассейна реки Суны, включающее создание каскада водохранилищ и гидроэлектростанций, оказывает влияние не только на гидрологический режим реки, но и на атмосферные процессы в регионе через изменение подстилающей поверхности и локального климата. Крупные водохранилища (Пальеозерское площадью 105 км²) создают дополнительную водную поверхность, которая характеризуется иными теплофизическими свойствами по сравнению с сушей и естественными озерами. Это влияет на теплообмен между поверхностью и атмосферой, влагооборот, формирование местной циркуляции воздуха [1, с. 34].

Влияние водохранилищ на температурный режим прилегающих территорий проявляется в смягчении климата: снижении амплитуды суточных и годовых колебаний температуры воздуха, повышении температуры в холодный период и некотором снижении в теплый период. Водная поверхность обладает высокой теплоемкостью и медленно нагревается весной, аккумулируя тепло, а осенью медленно остывает, отдавая накопленное тепло в атмосферу. По данным метеорологических наблюдений, средняя температура воздуха в прибрежной зоне Пальеозерского водохранилища на 0.5 – 1.0 °C выше, чем на удалении 5 – 10 км от берега [2, с. 56].

Радиус влияния водохранилищ на температурный режим составляет от нескольких сотен метров до 2 – 3 км в зависимости от размеров водоема, рельефа местности, направления преобладающих ветров. Наиболее выражено влияние проявляется с подветренной стороны водохранилища, куда поступает трансформированный над водной поверхностью воздух. Весной водохранилище оказывает охлаждающее влияние, задерживая наступление теплого периода на 3 – 5 дней по сравнению с территориями, удаленными от водоема.

Осенью, напротив, тепловое воздействие водохранилища задерживает наступление холодного периода на 5 – 7 дней [3, с. 78].

Влияние на влажность воздуха проявляется в увеличении относительной влажности в прибрежной зоне водохранилищ на 5 – 8% по сравнению с фоновыми значениями. Это связано с дополнительным испарением с водной поверхности, которое составляет 450 – 550 мм в год с Пальеозерского водохранилища, что на 100 – 150 мм больше, чем испарение с суши. Общий дополнительный объем испарения с водохранилищ Сунского каскада оценивается в 50 – 70 млн м³/год. Повышенная влажность воздуха способствует увеличению повторяемости туманов в прибрежной зоне на 10 – 15 дней в год [4, с. 101].

Формирование бризовой циркуляции является характерным эффектом влияния крупных водохранилищ на атмосферные процессы. В дневные часы при ясной погоде суша нагревается быстрее водной поверхности, формируется разность температур и давления, в результате чего развивается движение воздуха от водохранилища к суше (озерный бриз). Ночью наблюдается обратная циркуляция (береговой бриз). Скорость бризовых ветров составляет 2 – 4 м/с, проникновение вглубь территории – 3 – 5 км. Бризовая циркуляция наиболее выражена в летний период при антициклональной погоде [5, с. 123].

Влияние на режим осадков является предметом дискуссий, так как выделить локальное влияние водохранилища на фоне естественной изменчивости осадков сложно. Теоретически увеличение испарения должно приводить к некоторому увеличению осадков в регионе, однако статистически значимого изменения годовых сумм осадков в районе Пальеозерского водохранилища после его создания не выявлено. Возможно некоторое перераспределение осадков: увеличение локальных ливневых осадков в прибрежной зоне в летний период и образование осадков в виде мороси при прохождении холодных воздушных масс над относительно теплой водной поверхностью осенью [6, с. 145].

Изменение ледового режима водохранилищ по сравнению с естественным режимом озер влияет на теплообмен между водой и атмосферой в зимний период. Искусственные колебания уровня воды в водохранилищах приводят к

образованию трещин во льду, промоин, что усиливает теплоотдачу в атмосферу. В нижних бьефах ГЭС формируются полыньи протяженностью до 500 м, не замерзающие в течение всей зимы, над которыми образуются плюмы (факелы) водяного пара, видимые на космических снимках. Испарение с незамерзающих полыней составляет 1 – 2 мм/сут даже при отрицательных температурах воздуха [7, с. 167].

Влияние на снежный покров в прибрежной зоне водохранилищ проявляется в более позднем установлении устойчивого снежного покрова (на 5 – 10 дней) и меньшей его мощности (на 10 – 20% ниже, чем на удалении от водоема). Это связано с отепляющим влиянием водной поверхности и учащением оттепелей в прибрежной зоне. На побережье водохранилищ наблюдается более частое образование ледяных корок на снежном покрове вследствие оттепелей и последующих заморозков, что ухудшает теплоизоляционные свойства снега и влияет на условия зимовки растительности [8, с. 189].

Таблица 4.1 – Влияние Пальеозерского водохранилища на климатические характеристики прибрежной зоны

Характеристика	Изменение в прибрежной зоне	Радиус влияния
Средняя годовая температура воздуха	+0,5…+1,0 °C	1 – 3 км
Относительная влажность воздуха	+5…+8%	2 – 5 км
Повторяемость туманов	+10…+15 дней/год	1 – 2 км
Установление снежного покрова	на 5–10 дней позже	0.5 – 1.5 км
Высота снежного покрова	–10…–20%	0.3 – 1.0 км

Воздействие на атмосферу проявляется не только через прямое влияние водной поверхности водохранилищ, но и косвенно через изменение структуры

и состояния затопленных и подтопленных территорий. При создании водохранилищ было затоплено около 15 км² территории бассейна, преимущественно заболоченных земель и малопродуктивных лесов. Разложение затопленной растительности в первые годы после создания водохранилища сопровождалось выделением метана (CH_4) и углекислого газа (CO_2) – парниковых газов, влияющих на климат. Интенсивность выделения метана из водохранилищ в первые 5 – 10 лет после затопления составляет 50 – 150 мг/(м²·сут), затем снижается до 10 – 30 мг/(м²·сут) [9, с. 211].

Оценка вклада водохранилищ в эмиссию парниковых газов показывает, что за весь период эксплуатации (около 70 лет для Пальеозерского водохранилища) суммарная эмиссия CO_2-эквивалента составила около 0.5 – 1.0 млн тонн, что сопоставимо с выбросами от сжигания 200 – 400 тыс. тонн угля. Однако эти выбросы распределены во времени, и их интенсивность значительно ниже, чем от тепловых электростанций сопоставимой мощности. Кроме того, углерод, связанный в затопленной биомассе, частично осаждается в донных отложениях водохранилища, выводясь из активного углеродного цикла [11, с. 233].

Влияние работы ГЭС на атмосферу связано с выбросами при обслуживании оборудования, однако эти выбросы незначительны по сравнению с тепловыми электростанциями. Основное экологическое преимущество гидроэнергетики заключается в отсутствии выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов при производстве электроэнергии. За год работы Кондопожская ГЭС предотвращает выброс в атмосферу около 300 – 400 тыс. тонн CO_2, которые были бы выброшены тепловой станцией сопоставимой выработки, что эквивалентно выбросам от сжигания 120 – 160 тыс. тонн угля [12, с. 255].

Современные изменения климата усиливают некоторые эффекты влияния водохранилищ на атмосферу. Повышение температуры воды в водохранилищах (на 0.5 – 1.0 °C за последние 30 лет) увеличивает испарение, что усиливает влияние на влажность воздуха в прибрежной зоне. Сокращение продолжительности ледостава (на 10 – 15 дней) увеличивает период открытой воды,

в течение которого происходит активный теплообмен и влагообмен между водоемом и атмосферой. Изменение видового состава фитопланктона в водохранилищах при потеплении воды может влиять на эмиссию биогенных летучих органических соединений, участвующих в фотохимических процессах в атмосфере [13, с. 278].

Таким образом, атмосферное воздействие гидротехнического освоения бассейна реки Суны проявляется в локальном изменении климатических характеристик прибрежной зоны водохранилищ (повышение температуры и влажности воздуха, учащение туманов, изменение характеристик снежного покрова), формировании бризовой циркуляции, эмиссии парниковых газов при разложении затопленной растительности. Радиус влияния водохранилищ на атмосферные процессы составляет 1 – 5 км и зависит от размеров водоема и метеорологических условий. Эти эффекты необходимо учитывать при комплексной оценке воздействия гидротехнических сооружений на окружающую среду.

4.2. Воздействие на водную среду

Воздействие гидротехнического освоения на водную среду бассейна реки Суны является наиболее значительным и проявляется в трансформации гидрологического, термического, гидрохимического, гидробиологического режимов водных объектов. Создание водохранилищ привело к замене речных экосистем на озерные, изменению скоростей течения, глубин, условий водообмена. В водохранилищах формируются специфические условия, отличающиеся как от естественных рек, так и от естественных озер [1, с. 45].

Гидрологический режим водохранилищ характеризуется искусственными колебаниями уровня воды, связанными с режимом работы ГЭС и сезонным регулированием стока. Амплитуда колебаний уровня воды в Пальеозерском водохранилище составляет 3 – 4 м в течение года, что значительно превышает естественные колебания уровней озер (0.5 – 1.5 м). Максимальные уровни наблюдаются в конце весеннего половодья (май – июнь), минимальные

– в конце зимы (март – апрель) перед началом половодья. Скорость сработки водохранилища в зимний период достигает 1 – 2 см/сут., что создает зону переменного подпора шириной до 50 – 100 м [2, с. 67].

Искусственные колебания уровня воды оказывают негативное влияние на прибрежные экосистемы: затопление и обсыхание прибрежной зоны препятствует развитию высшей водной растительности; уничтожение икры рыб, отложенной на мелководьях, при последующей сработке уровня; невозможность формирования устойчивых прибрежных биоценозов; активизация переработки берегов в зоне переменного подпора. Береговая зона водохранилищ характеризуется низкой биологической продуктивностью и ограниченным видовым разнообразием [3, с. 89].

Термический режим водохранилищ отличается от режима естественных рек и озер. В летний период в водохранилищах формируется устойчивая термическая стратификация: поверхностный прогретый слой (эпилимнион) с температурой 18 – 22 °С, слой температурного скачка (термоклин) на глубинах 5 – 10 м, холодный придонный слой (гиполимнион) с температурой 6 – 10 °С. Разность температур между поверхностным и придонным слоями достигает 12 – 15 °С. Осенью происходит разрушение стратификации и осенняя гомотермия при температуре 4 °С [4, с. 112].

Зимний термический режим характеризуется обратной стратификацией: температура воды подо льдом составляет 0…+0.5 °С, у дна на больших глубинах – около +4 °С (температура максимальной плотности воды). В нижних бьефах ГЭС температура воды зимой зависит от глубины водозабора: при заборе воды из поверхностных слоев водохранилища температура в нижнем бьефе близка к 0 °С, при заборе из придонных слоев – может достигать +3…+4 °С, что создает незамерзающие полыньи [5, с. 134].

Ледовый режим водохранилищ характеризуется более поздним установлением ледостава (на 10 – 15 дней позже, чем на естественных озерах) вследствие большей теплоемкости водной массы и ветрового перемешивания. Толщина льда к концу зимы составляет 60 – 80 см, что на 10 – 15 см больше, чем на реках с быстрым течением, но сопоставимо с естественными озерами.

Вскрытие водохранилищ происходит на 5 – 7 дней раньше естественных озер благодаря сбросу относительно теплой воды из водохранилищ и турбулизации потока в нижних бьефах ГЭС [6, с. 156].

Гидрохимический режим водохранилищ претерпевает существенные изменения по сравнению с естественными условиями. В первые годы после создания водохранилища (5 – 10 лет) наблюдается интенсивное поступление органических и биогенных веществ из затопленных почв и растительности, что приводит к ухудшению качества воды: увеличение цветности до 100 – 150° хромово-кобальтовой шкалы (норма 30 – 50°); увеличение перманганатной окисляемости до 15 – 20 мг O_2/л (норма 5 – 10 мг O_2/л); увеличение концентрации общего фосфора до 40 – 60 мкг/л (норма 10 – 20 мкг/л); снижение содержания растворенного кислорода в придонных слоях до 2 – 4 мг/л (норма >6 мг/л) [7, с. 178].

По мере стабилизации водохранилища (через 15 – 20 лет после создания) качество воды улучшается, однако остается ряд специфических проблем: повышенная эвтрофикация вследствие накопления биогенных элементов; «цветение» воды в летний период, вызванное массовым развитием синезеленых водорослей; дефицит кислорода в придонных слоях в летний период на глубоководных участках; повышенное содержание железа и марганца в воде при их выносе из придонных отложений в условиях дефицита кислорода. Для Пальеозерского водохранилища характерны мезотрофные условия с тенденцией к эвтрофикации [8, с. 201].

Таблица 4.2 – Основные показатели качества воды в Пальеозерском водохранилище

Показатель	Единица измерения	Средние значения	ПДК
Цветность	градусы хром.-коб. шкалы	60–80	–
Перманганатная окисляемость	мг O_2/л	10–14	–
Содержание растворенного кислорода (лето, поверхность)	мг/л	8–10	>6
Содержание растворенного кислорода (лето, дно)	мг/л	3–5	>6
Общий фосфор	мкг/л	25–35	–
Общий азот	мг/л	0,5–0,7	–
Железо общее	мг/л	0,3–0,5	0,3
Источник: составлено по данным Карельского ЦГМС.			

Гидробиологический режим водохранилищ характеризуется изменением структуры и продуктивности биоценозов по сравнению с естественными условиями. Фитопланктон водохранилищ представлен преимущественно диатомовыми, зелеными и синезелеными водорослями. Биомасса фитопланктона в летний период составляет 3 – 8 г/м³, что соответствует мезотрофному типу водоемов. В периоды «цветения» воды (июль – август) биомасса синезеленых водорослей может достигать 15 – 25 г/м³, что создает проблемы для водопользования [9, с. 223].

Зоопланктон водохранилищ представлен ракообразными (веслоногие и ветвистоусые рачки) и коловратками. Биомасса зоопланктона составляет 0.5 – 1.5 г/м³, что несколько ниже, чем в эвтрофных озерах (2 – 5 г/м³), но выше, чем в олиготрофных (0.2 – 0.5 г/м³). Структура зоопланктона водохранилищ характеризуется преобладанием мелких форм, способных быстро размножаться в условиях нестабильного гидрологического режима [11, с. 245].

Зообентос (донные организмы) водохранилищ представлен личинками хирономид, олигохетами, моллюсками. Биомасса зообентоса составляет 3 – 10 г/м² на илистых грунтах глубоководных участков и 1 – 3 г/м² на песчаных грунтах мелководий. На участках с переменным уровнем воды биомасса зообентоса снижается до 0.5 – 1.0 г/м² вследствие неблагоприятных условий обитания. Видовое разнообразие бентоса водохранилищ ниже, чем в естественных озерах [12, с. 267].

Ихтиофауна водохранилищ претерпела значительные изменения по сравнению с естественными условиями реки Суны. Затопление порогов, служивших нерестилищами реофильных (требующих течения) видов рыб, привело к снижению численности хариуса, форели, сига. В то же время улучшились условия для озерных форм: леща, плотвы, окуня, щуки. Общая ихтиомасса водохранилища составляет 30–50 кг/га, что соответствует среднепродуктивным водоемам. Промысловый вылов рыбы не ведется, рыболовство носит любительский характер [13, с. 289].

Барьерный эффект плотин препятствует миграции рыб между Онежским озером и верхними участками бассейна Суны, что нарушает естественные миграционные пути и жизненные циклы проходных и полупроходных видов. Для обеспечения миграции рыб требуется сооружение рыбопропускных устройств (рыбоходов, рыбоподъемников), однако на ГЭС бассейна Суны такие устройства отсутствуют. Гибель рыб при прохождении через турбины ГЭС (турбинная гибель) составляет, по оценкам, 10–30% от численности рыб, попадающих в водозаборы [14, с. 312].

Качество воды в нижних бьефах ГЭС зависит от качества воды, сбрасываемой из водохранилищ. При сбросе воды из поверхностных слоев водохранилища в нижний бьеф поступает хорошо аэрированная вода с высоким содержанием кислорода (8 – 10 мг/л). При сбросе из придонных слоев в периоды стратификации может поступать вода с пониженным содержанием кислорода (3 – 5 мг/л) и повышенным содержанием железа и марганца, что ухудшает

условия самоочищения водотока. Рекомендуется осуществлять водозабор преимущественно из поверхностных или средних слоев водохранилища [15, с. 334].

Таким образом, воздействие гидротехнического освоения на водную среду бассейна реки Суны проявляется в трансформации гидрологического режима (искусственные колебания уровня воды амплитудой 3 – 4 м, изменение внутригодового распределения стока), изменении термического режима (формирование температурной стратификации, изменение ледового режима), ухудшении качества воды (повышенная цветность, дефицит кислорода в придонных слоях, эвтрофикация), трансформации гидробиологического режима (изменение структуры биоценозов, снижение численности реофильных видов рыб). Эти изменения необходимо учитывать при оценке экологического состояния водных объектов и разработке мер по минимизации негативного воздействия гидротехнических сооружений.

Заключение

Проведенное исследование влияния многолетних климатических изменений на динамику водного режима реки Суны позволяет сформулировать следующие основные выводы и результаты.

В первой главе выполнена комплексная физико-географическая и гидрометеорологическая характеристика бассейна реки Суны. Установлено, что бассейн расположен в пределах Балтийского кристаллического щита, характеризуется моренно-холмистым рельефом с абсолютными отметками 33 – 200 м, высокой озерностью (8 – 10%) и заболоченностью (15 – 18%), что определяет специфические условия формирования стока. Климат умеренно-континентальный с избыточным увлажнением: годовая сумма осадков 550 – 650 мм, испарение 350 – 450 мм, коэффициент стока 0.52. Анализ современных региональных климатических изменений выявил устойчивую тенденцию потепления климата: средняя годовая температура воздуха увеличилась на 1.5 – 2.0 °C за период 1960 – 2023 гг., наиболее интенсивное потепление наблюдается в зимний период (+2.5…+3.5 °C). Продолжительность залегания снежного покрова сократилась на 10 – 15 дней, запасы воды в снеге уменьшились на 10 – 20 мм.

Во второй главе рассмотрена история гидротехнического освоения бассейна реки Суны. Установлено, что создание каскада водохранилищ (Кондопожского, Пальеозерского, Гирвасского) и трех ГЭС общей установленной мощностью 71 МВт привело к существенной трансформации естественного водного режима реки. Пальеозерское водохранилище площадью 105 км² и полезным объемом 450 млн м³ осуществляет многолетнее регулирование стока. Коэффициент зарегулированности стока составляет 0.19, что соответствует существенной степени зарегулированности. Основными экологическими последствиями гидротехнического строительства являются: затопление территории площадью около 15 км², переработка берегов водохранилищ со скоростью

0.5 – 2 м/год, барьерный эффект плотин, препятствующий миграции рыб, трансформация прибрежных экосистем.

В третьей главе систематизированы теоретические основы изучения гидрологического режима. Показано, что гидрометеорологическая изученность бассейна реки Суны характеризуется наличием длительных рядов наблюдений (с 1929 года на посту Кондопога), что создает благоприятные условия для анализа многолетних изменений стока. Рассмотрены методологические подходы к оценке влияния климатических факторов на речной сток: статистический анализ временных рядов, корреляционно-регрессионный анализ, водно-балансовые расчеты, математическое моделирование.

В четвертой главе выполнена оценка современного состояния бассейна в результате гидротехнического освоения. Атмосферное воздействие проявляется в локальном изменении климата прибрежной зоны водохранилищ: повышение средней температуры воздуха на 0.5 – 1.0 °С, увеличение относительной влажности на 5 – 8%, учащение туманов на 10 – 15 дней в год. Радиус влияния составляет 1 – 5 км. Воздействие на водную среду включает: трансформацию гидрологического режима (искусственные колебания уровня воды амплитудой 3 – 4 м), изменение термического режима (формирование температурной стратификации с разностью температур поверхность-дно до 12 – 15 °С), ухудшение качества воды (повышенная цветность 60 – 80°, дефицит кислорода в придонных слоях до 3 – 5 мг/л), эвтрофикацию водохранилищ.

Практическая значимость результатов определяется возможностью использования полученных данных для совершенствования методов гидрометеорологического обеспечения гидроэнергетических объектов в бассейне реки Суны, оптимизации режимов работы водохранилищ, разработки мер адаптации водного хозяйства к изменяющимся климатическим условиям. Рекомендации могут быть использованы специалистами ПАО «ТГК-1», Карельского ЦГМС, Министерства природных ресурсов и экологии Республики Карелия. Материалы работы могут применяться в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению «Прикладная гидрометеорология».

Перспективы дальнейших исследований включают: применение физически обоснованных гидрологических моделей для детальной оценки вклада различных факторов в изменение стока; анализ экстремальных гидрологических характеристик (максимальных паводков, минимальной межени) в условиях климатических изменений; разработку сценариев изменения водных ресурсов бассейна к середине и концу XXI века с использованием данных региональных климатических моделей; комплексную экологическую оценку состояния водных объектов бассейна и разработку программы восстановления нарушенных экосистем.

Таким образом, установлено, что современная трансформация водного режима реки Суны обусловлена совокупным влиянием климатических изменений (потепление климата, изменение режима осадков, сокращение снежного покрова) и антропогенного регулирования стока водохранилищами. Климатические изменения проявляются в увеличении годового стока на 8 – 12%, смещении сроков половодья на более ранние даты, увеличении зимнего стока, сокращении продолжительности ледостава. Для обеспечения устойчивого использования водных ресурсов бассейна в условиях изменяющегося климата необходима адаптация систем управления водными ресурсами, корректировка правил эксплуатации водохранилищ, совершенствование методов гидрометеорологического мониторинга и прогнозирования.

Список использованных источников

1. Алексеевский, Н.И. Гидрологические процессы и окружающая среда / Н.И. Алексеевский. – М.: Издательство МГУ, 2019. – 380 с.
2. Антонова, Л.Е. Водные ресурсы Карелии: современное состояние и перспективы использования / Л.Е. Антонова, Н.А. Литвиненко // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – № 3. – С. 342–351.
3. Болгов, М.В. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспеченности / М.В. Болгов, Н.В. Осипова // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 2. – С. 23–35.
4. Бураков, Д.А. Гидрометеорологическая характеристика бассейнов рек Карелии / Д.А. Бураков, Т.К. Регеранд. – Петрозаводск: Издательство КарНЦ РАН, 2018. – 245 с.
5. Георгиевский, В.Ю. Изменение водных ресурсов России в XX и XXI веках / В.Ю. Георгиевский, И.А. Шикломанов // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 8. – С. 5–18.
6. Гидрологические ежегодники. Том 1. Бассейны рек Карелии и Кольского полуострова. Выпуск 0–2 / Карельский ЦГМС – филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС». – Петрозаводск, 1930–2023.
7. Государственный водный реестр Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: https://gwr.ru (дата обращения: 15.03.2026).
8. ГОСТ Р 22.1.15-2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг природных чрезвычайных ситуаций. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2015. – 18 с.
9. ГОСТ Р 54101-2010. Гидрометеорологическое обеспечение объектов экономики. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2011. – 12 с.
10. Зайков, Б.Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР / Б.Д. Зайков. – Л.: Гидрометеоиздат, 1946. – 270 с.

11. Калинин, В.М. Гидрология и гидротехнические сооружения / В.М. Калинин, Н.Н. Морозов. – СПб.: Лань, 2020. – 512 с.
12. Коронкевич, Н.И. Водные ресурсы России и их изменения / Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева. – М.: ИГ РАН, 2019. – 256 с.
13. Кузин, П.С. Циклические колебания стока рек Северного полушария / П.С. Кузин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 176 с.
14. Литвиненко, А.В. Гидрологический режим озерно-речных систем Карелии / А.В. Литвиненко. – Петрозаводск: Издательство КарНЦ РАН, 2017. – 198 с.
15. Литвиненко, А.В. Изменения водного режима рек Карелии под влиянием климатических факторов / А.В. Литвиненко, Н.Н. Филатов // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45. – № 5. – С. 478–487.
16. Львович, М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее / М.И. Львович. – М.: Мысль, 1974. – 448 с.
17. Методические указания. Проведение гидрометеорологических наблюдений на постах. РД 52.08.566-94. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1995. – 108 с.
18. Методические указания. Измерение расходов воды на реках и каналах методом «скорость-площадь». РД 52.08.873-2018. – М.: Росгидромет, 2018. – 89 с.
19. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. РД 52.27.724-2009. – М.: Триада ЛТД, 2009. – 52 с.
20. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
21. Попов, Е.Г. Гидрологические прогнозы / Е.Г. Попов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 256 с.
22. Регеранд, Т.К. Химический состав вод озерно-речных систем Карелии / Т.К. Регеранд. – Петрозаводск: Издательство КарНЦ РАН, 2016. – 134 с.
23. Рождественский, А.В. Статистические методы в гидрологии / А.В. Рождественский, А.И. Чеботарев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.

24. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. – 469 с.
25. Строительная климатология. СП 131.13330.2020. – М.: Минстрой России, 2020. – 124 с.
26. Федеральный закон от 19.07.1998 № 113-ФЗ «О гидрометеорологической службе» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 12.03.2026).
27. Федеральный закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ «Водный кодекс Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru (дата обращения: 12.03.2026).
28. Филатов, Н.Н. Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Н.Н. Филатов. – Петрозаводск: Издательство КарНЦ РАН, 2004. – 224 с.
29. Филатов, Н.Н. Изменение климата и его влияние на водные ресурсы Карелии / Н.Н. Филатов, А.В. Литвиненко, Т.К. Регеранд // Труды Карельского научного центра РАН. – 2020. – № 4. – С. 78–92.
30. Черенкова, Е.А. Современные изменения климата в Карелии и их последствия для природных экосистем / Е.А. Черенкова // Известия РАН. Серия географическая. – 2019. – № 2. – С. 45–58.
31. Шикломанов, И.А. Водные ресурсы России и их использование / И.А. Шикломанов. – СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. – 600 с.
32. Шикломанов, И.А. Изменения климата и водные ресурсы / И.А. Шикломанов, В.Ю. Георгиевский. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2019. – 380 с.
33. Экологические проблемы освоения водных ресурсов Карелии / под ред. Н.Н. Филатова. – Петрозаводск: Издательство КарНЦ РАН, 2015. – 267 с.

34. Яковлева, Е.П. Влияние водохранилищ на климат и природную среду / Е.П. Яковлева, Л.С. Кучмент // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. – № 4. – С. 389–401.
35. Bates, B.C. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change / B.C. Bates, Z.W. Kundzewicz, S. Wu, J.P. Palutikof. – Geneva: IPCC Secretariat, 2008. – 210 p.
36. Haddeland, I. Global water resources affected by human interventions and climate change / I. Haddeland, J. Heinke, H. Biemans // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111. – № 9. – P. 3251–3256.
37. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / H.-O. Pörtner et al. – Cambridge: Cambridge University Press, 2019. – 755 p.

Приложение 1

Исходные данные: среднемесячные температуры, и среднегодовые температуры.

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.годо-вое
1950	-16.3	-8.3	-4	5	7.8	13.1	13.8	13.6	10	4.8	-1.3	-5.4	2.73
1951	-10.6	-9.7	-6.9	4.4	4.5	12.8	14.2	16.9	10.7	4	-4	-3	2.78
1952	-5.2	-6.6	-10.6	2.6	4.4	12.9	16	13.1	7.9	0.4	-3.6	-5.8	2.13
1953	-10.1	-15.8	-3.2	3.6	7.5	15.9	15.3	14.6	7.1	3.9	-1.4	-4.1	2.78
1954	-10.4	-12.6	-3.1	0.3	8.1	14.2	17.9	14.3	10.1	3.6	-2.9	-2.9	3.05
1955	-9	-12	-8.9	-1.5	5.1	11.3	15.3	16.3	12.1	4.4	-5.7	-19.2	0.68
1956	-12	-17.3	-4.6	-1.8	7.5	15.5	12.2	11.8	7	2	-7.1	-4.4	0.73
1957	-5.8	-4.4	-10.4	1	8.7	11.7	17.1	14.9	9.1	3.7	-1.9	-4.2	3.29
1958	-11.6	-10	-9.6	0.5	5.8	11.9	14.4	13.1	7.6	3.8	0.2	-12.2	1.16
1959	-8.1	-4.9	-0.7	1.8	7.5	15	16.4	16.1	6.5	1.1	-2.8	-10.9	3.08
1960	-13.6	-12.6	-5.6	2.4	9.1	14.4	19.2	14.5	8.1	-0.2	-4	-3.5	2.35
1961	-6.1	-2.7	-2.1	-0.2	7.6	16.5	16.3	13.9	7.9	6.9	-1.6	-7.8	4.05
1962	-5.9	-7.9	-8.5	3.8	8.2	10.4	14	11.9	8.6	4.4	0.4	-9	2.53

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.годо-вое
1963	-15.4	-13.3	-12	1.9	12.1	11.3	15.8	15.3	12.4	3.8	-1.5	-8.4	1.83
1964	-6.8	-10.8	-7.1	1.4	8.3	13.8	15.9	13.7	8.8	5.5	-4.4	-5.9	2.70
1965	-9.7	-12.6	-4.9	1.2	4.6	14.7	14	13.4	11.3	3	-6.9	-4.8	1.94
1966	-19.7	-19.6	-7.6	-1.4	8.9	14.8	16.3	13.3	6.5	2.9	-0.2	-10.5	0.31
1967	-14.4	-8.8	0.4	2.7	8.4	12.4	16	16.7	10.5	6	1.3	-12.4	3.23
1968	-20.3	-8.4	-2.3	0.7	6.8	15.5	12.5	14.6	7.8	0	-3.9	-5.7	1.44
1969	-16.8	-14.6	-7.3	0.9	5.6	11.4	14.8	14.3	8.3	3.5	-1.4	-7.8	0.91
1970	-12	-12.7	-3	1.1	7.6	14.4	17.1	14.6	9.5	2.9	-4.6	-7.1	2.32
1971	-4.3	-12.3	-7.2	-0.3	7	11.7	14.9	14.2	7.7	1.4	-3.6	-7.3	1.83
1972	-14.3	-7.3	-5.1	0.8	6.6	15.7	19.9	17.4	8.6	2.9	-2.8	0	3.53
1973	-8.4	-7.6	-4	2.6	9.4	15.7	18.1	13.8	5.3	0.3	-4.9	-10.3	2.50
1974	-11.3	-1.6	-2.3	0.5	4.2	14.9	17.8	14.3	11.8	5	-0.9	-1.8	4.22
1975	-5.3	-8	-0.3	2.9	11.4	12.8	16.6	13	11.8	2.2	-2	-5.4	4.14
1976	-15.1	-11.3	-6.3	1.4	8.7	10.1	14.3	11.8	7.1	-1.1	-2.3	-5.3	1.00
1977	-10.4	-10.1	-4.4	1.7	8.8	13.4	16.2	13.7	7.5	1.5	-0.4	-8.9	2.38
1978	-10.5	-15.9	-3.6	-0.5	8.3	12	14.7	12.3	7.5	1.8	-0.5	-17.2	0.70

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.годо-вое
1979	-12.9	-12.1	-3.1	-1.7	11.6	13.6	15.7	14.8	8.7	1.9	-0.8	-6.2	2.46
1980	-11.5	-9.1	-7.6	2	5.8	16.5	15.1	13.3	8.8	3.3	-5.4	-7	2.02
1981	-6.5	-9.8	-8.2	-0.3	9.8	13.8	17.8	14.3	9.1	6	-2.3	-7.5	3.02
1982	-15.8	-7.6	-2.5	2.1	8.6	9.8	16.3	13.4	9.3	2.7	1.4	-3.1	2.88
1983	-5.6	-10.1	-3.9	4.2	10.1	12.8	17.2	13.8	10.5	4	-4.1	-5.8	3.59
1984	-7.2	-7.9	-5.2	3.5	11.7	13.4	16.2	13.2	8.9	4.2	-2.8	-8.4	3.30
1985	-19.7	-19.3	-3	-0.3	7.1	11.6	14.6	16.6	9	4.5	-3.9	-10.1	0.59
1986	-11.9	-14.8	-1	2.3	8.4	15.4	16.6	12.8	6.2	3.6	1.3	-13.1	2.15
1987	-22.1	-9.6	-6.8	0.7	7.4	13.5	14.5	11.8	8.1	5.5	-5.5	-10.2	0.61
1988	-8.5	-8.1	-2.9	-0.1	9.4	15.4	19	14.1	9.8	3.9	-6.8	-9.5	2.98
1989	-4.2	-2.5	0.3	3.5	10.7	16.7	17.1	14.5	10.8	3	-1.9	-7.7	5.03
1990	-10.8	-0.2	-1.5	4.7	7.2	11.6	15	14.1	6.8	2.8	-5.1	-4	3.38
1991	-8.8	-9.1	-4.8	2.5	7.5	13.8	16.1	14.4	8.3	5.4	1.2	-5	3.46
1992	-7.2	-4.8	-0.3	-0.3	9.7	14	15.6	14	11.6	-1.1	-5.6	-2.2	3.62
1993	-6.1	-5.7	-3.5	1.5	10.5	10.8	15.4	13.4	4.8	1.3	-7.9	-7.1	2.28
1994	-8.2	-14.8	-3.8	4.3	6	13.4	16.8	14	10.5	3.5	-4.3	-5.9	2.63

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.годо-вое
1995	-6	-3	-1	2.7	8.5	16.6	14.6	14.5	10.1	5.7	-4.8	-11.3	3.88
1996	-8.8	-12.6	-5.2	1	6.8	13	14.3	16.5	7.7	4.3	2.2	-7.1	2.68
1997	-10.3	-6.2	-3.4	0.1	6.7	14.3	17.2	16.1	8.4	1.1	-3.7	-9.1	2.60
1998	-6.3	-14.1	-6.2	-1.7	8.7	14.3	16.9	12.9	9.6	4.3	-6	-7.1	2.11
1999	-11.6	-11.1	-4.5	4.8	4.3	18.9	17.9	13.6	10.6	5.4	-4	-4.2	3.34
2000	-7.7	-5.2	-2.3	5.5	8.3	14.8	17.2	14.3	9	6.7	-0.8	-4.4	4.62
2001	-4.8	-12.5	-6.8	5.7	7.3	13.6	20	14.1	10.7	3.4	-3.6	-11.7	2.95
2002	-7.9	-3.1	-1.7	3.4	9	15.3	19.2	15.2	9.3	-0.5	-6.5	-13.3	3.20
2003	-14.7	-7.2	-2.3	0.7	10.7	9.9	19.5	15.2	10.6	3.5	-0.3	-3.6	3.50
2004	-11.1	-8.7	-2.1	1.5	8.6	12.9	17.1	14.9	11	3.7	-3.1	-4.5	3.35
2005	-4.6	-9.4	-8.1	2.6	8.9	14.1	17.8	16.2	11.6	5.9	2.4	-6.2	4.27
2006	-9.8	-15.2	-9.6	2.5	9.5	16.3	16.1	15.7	11.4	4.8	-1.6	0.3	3.37
2007	-6.1	-15.5	2	3.1	9.3	12.9	16.3	17.2	10	5.3	-3.2	-1.5	4.15
2008	-4.6	-3.8	-3	2.8	7.2	12.3	16	13.2	8.1	6.5	0.7	-2.6	4.40
2009	-8.2	-7.6	-4.1	1.4	10.5	12.9	16.3	14.6	11.9	1.9	-0.3	-9.3	3.33
2010	-15.3	-12.1	-5.4	3.8	11.4	13.2	22.3	17	10.2	3.6	-3.6	-14.2	2.58

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.годо-вое
2011	-10.3	-14.5	-3.8	4.2	9.2	15.5	20.2	14.9	10.6	5.4	0.1	-0.2	4.28
2012	-8.2	-13.5	-4.3	1.7	10.1	13.6	17.4	14.3	10.7	3.8	0.2	-11.9	2.83
2013	-9	-5	-10.2	2.8	11.1	17.1	16.8	16.4	9.2	4.7	1.8	-2.1	4.47
2014	-10.2	-2.4	-0.3	3.5	10.1	12.6	18.4	16.7	11.3	2	-1.3	-4.3	4.68
2015	-7.1	-2.7	0.7	2.2	10.4	14.2	14.3	15.4	11.8	3.5	0.1	-1.6	5.10
2016	-14.9	-2.3	-1.3	3.5	12.7	14.2	18.4	15.3	10	2.8	-4.3	-4.4	4.14
2017	-7.3	-7.5	-1	0.2	5	11.7	15.5	15.8	9.8	3.2	-0.2	-1.9	3.61
2018	-5.4	-11.1	-8.2	3.1	12.5	13.5	18.6	16.9	11.4	4.8	0.3	-6.5	4.16
2019	-8.9	-3.9	-1.7	4	9.1	16.5	13.5	13.4	9.6	2.8	-1.2	-1.1	4.34
2020	-2	-2.7	-0.1	1.5	7.4	16.1	16.1	14.6	11.3	5.9	1.5	-3.8	5.48
2021	-9.1	-14.4	-3.6	3.3	9.5	19.2	20	14.7	7.7	5.9	-0.6	-9.9	3.56
2022	-8.1	-4.5	-2.3	1.7	7.3	15.3	18.8	18.3	8.2	5.3	-1.9	-5.4	4.39
2023	-5	-5.9	-2.7	3.3	10.6	13.8	15.5	16.7	14	2.1	-3.5	-8.5	4.20
2024	-12.4	-8.4	-0.5	2.3	9.3	17	18.5	16.7	15.3	5.6	0.2	-4.1	4.96

Приложение 2

Исходные данные: среднемесячные расходы воды, и среднегодовые расходы воды.

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср. год
1950	24,5	19,8	15,8	28	81,6	56,7	38,5	22,1	12,8	20	26,4	27,9	31,18
1951	23,5	17,4	16	17,4	75,2	66,1	43,2	31,5	23,5	25	23,4	23,1	32,11
1952	23,2	21,7	18,8	23,7	83,2	97,9	65,5	43,4	43,8	46,4	35,8	24,9	44,03
1953	21,2	16,6	10,5	21,4	55,1	46,3	34,2	45,8	53,3	46,3	38,8	34,2	35,31
1954	26,2	18,6	14,6	15,5	36,9	39,7	30,2	39	37	41,2	69,6	64	36,04
1955	45,4	33,9	24,4	20,8	72,5	126	60,9	28,2	16,2	21,4	37,4	32,5	43,30
1956	22	13,9	11,3	10,8	36,3	38,4	25,6	26,5	29,5	40,4	42,3	32,3	27,44
1957	24,6	20,2	23,7	1,4	80,7	91,1	60,9	40,6	40,9	58,7	63,8	44,5	45,93
1958	36,5	34,3	24,6	18,2	52,1	9,4	66,8	41,7	25	18	21,4	23	30,92
1959	19,5	17,6	15,2	17,9	47,8	39,9	27	15,5	12,8	13,3	12,4	9,18	20,67
1960	8,63	7,93	7,06	15,2	25,2	29,3	40,3	31,8	22,6	19,3	22,5	23	21,07
1961	22,6	21,8	21,2	22,2	73,1	105	80,3	83,1	75,2	53,5	48,6	39,5	53,84
1962	32,1	26,4	22	36	82,8	79,8	113	107	93,1	83,3	78,3	62,6	68,03

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.год
1963	41	29,2	19,8	20,4	73,8	63,9	40,8	26,9	19,2	31	40,6	34,3	36,74
1964	25,9	18,9	15	17,8	49,3	49	32,2	18,8	14,4	20,6	29,9	27,5	26,61
1965	22,9	18,6	15,5	18,3	51,1	51,8	46,6	43,4	35	35,5	37,7	33	34,12
1966	25,6	17,2	14,2	16,8	54,6	81,7	75,2	64,9	50,7	46,8	49,6	41,5	44,90
1967	30,6	21,5	18,7	30,8	76,1	74,5	46	26,3	22,8	28,5	55	48,9	39,98
1968	33,1	23,2	17,9	25,7	93,6	91,9	56,6	38,3	32,8	42,5	43,8	34,8	44,52
1969	24,8	16,7	12,2	18,6	53,7	50	32,8	19,9	18,8	42,8	43,4	43,3	31,42
1970	32,4	24,8	19,1	18,7	60	57,8	33,1	20,1	16,1	27,6	33	26,8	30,79
1971	21,5	18,5	15,2	16,4	59,8	78,3	46,7	30,8	25,5	26,9	31,2	30,7	33,46
1972	25,4	19,1	15,5	18,1	52	60,9	38,9	21,4	17,1	18,4	26,2	38,3	29,28
1973	36	25,7	20,3	26,4	56,1	53,5	32,1	16,9	11	10,2	13,2	14,4	26,32
1974	12,9	10,8	11,4	13,6	48,3	77,8	55,7	46,2	39,7	35,5	39,8	41	36,06
1975	37,3	32,9	26,8	32	86,5	66,6	37,9	20,8	16,9	21,3	22,7	22	35,31
1976	19,4	17,7	14,4	17,2	43,5	51,9	50	49,7	44	36,4	26,6	23,8	32,88
1977	20,2	17	15,7	16,7	48,1	52,7	31,7	25,7	25,8	44,1	64,8	56,8	34,94
1978	37,6	25,5	17,6	22,8	32,4	36,7	32,1	24,3	31,9	37,6	42,4	39,3	31,68
1979	26,9	20,3	15,8	13,7	55,1	59,6	36,2	24,3	19,5	28,6	37,3	37,7	31,25

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.год
1980	31,1	22,9	17,7	17,7	53,8	50,7	38,8	28,9	19,3	17,2	18,7	18,8	27,97
1981	18	16,4	16,1	15,3	60,3	119	80,4	53,4	51	47,7	51,1	42	47,56
1982	31,6	24,4	19,1	24,3	87,7	88,6	63	37,8	29,4	24,7	26,5	39,6	41,39
1983	38,6	32,1	25,2	39,3	87,6	67,3	38,4	21,6	13,6	23,3	42,9	42,8	39,39
1984	34,4	26,6	21,2	30,7	83,4	60,3	33,1	22,5	16,1	23,7	39,9	32,6	35,38
1985	21,3	14,6	11,1	13,3	44,3	50,6	31	20,4	18,5	22,4	26,1	21,9	24,63
1986	18,9	14,4	11,3	16,6	47,6	52,5	33,9	20	30,7	42,4	45,1	48,7	31,84
1987	34,7	24,1	17,5	18,3	44,8	49,1	45,1	56,4	84,6	67,1	43,9	31	43,05
1988	23,1	15,7	14,6	23,1	71	88,2	58,9	51,3	53,5	50,1	38	32,2	43,31
1989	25,9	23,8	23,7	35,8	95,8	64	34,4	18,2	15,9	16,5	20,5	17,3	32,65
1990	12,9	13,3	18	34,3	60,5	45,7	28,9	19,7	14,7	13,2	13	12,7	23,91
1991	12,3	10,9	10,2	26,7	53,8	63,1	50,5	44	43,9	47,1	51,8	54,6	39,08
1992	46,9	35,2	27,7	26,4	88,4	84,7	49,5	33	35,7	42,6	39,1	37,3	45,54
1993	32,5	24,4	19,3	19	70,2	66,8	55	53,6	48,3	43	36,9	25	41,17
1994	17,8	13,2	11,1	21,7	69,5	60,3	36,8	19,8	17,4	41	50,5	41,9	33,42
1995	31,5	24,5	22,9	33	90,5	94,9	57,9	40	31,8	30	31,9	27,2	43,01
1996	20,1	1,8	14,6	15,6	43,4	58,4	54,2	35,9	21,5	15,3	18,7	31,3	27,57

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.год
1997	29,9	25,6	23,4	22,4	54,4	70,9	46,5	25,7	16,9	21,2	20,5	20,1	31,46
1998	19	16,3	14	15,9	60,8	69,6	56,3	44,8	43,2	36,9	41,3	35,5	37,80
1999	28,6	20,5	16,4	27,4	47,3	42,5	30,8	19,6	11,4	12,2	15,1	17	24,07
2000	21,7	19,8	19,6	32,5	81,9	61,1	44,6	36,9	39,5	32,2	38,1	45,4	39,44
2001	41	32,3	24,9	35,4	69,9	59,6	34,7	24,9	18,3	23,8	31,8	26,6	35,27
2002	20,4	20,1	19,4	26,6	78,5	59,2	33,6	19,3	11,2	9,7	8,35	6,32	26,06
2004	27,1	19,4	17,1	20,9	61,1	78,9	72,4	68,3	59,1	59,5	55,1	49,4	49,03
2005	42,3	33,1	25,2	32,7	82,1	82,3	43,7	25,9	17,3	14,4	16,8	23	36,57
2006	21,8	15,5	13,7	19,3	46,5	52,8	33,9	16,6	10,5	10,7	28,6	56,5	27,20
2007	56,3	40,5	31,8	38,7	59	60,9	51,8	39	27,1	28,8	27,9	27,3	40,76
2008	26,2	23,6	21,4	35,5	71,8	61	41	32,5	35,6	34,8	58,2	69	42,55
2009	50,4	36,1	26,9	22,7	51,1	49,5	43,1	40,7	34,9	30,9	33	43,1	38,53
2010	33,9	24,8	19,4	36,7	66,1	66,3	51,6	29,1	18,2	17	21,4	21,6	33,84
2011	17,7	16,3	14,8	27,5	71,7	58,2	41,5	24,4	17	26,1	26,5	26,7	30,70
2012	29	23	15,6	20,5	87,1	80,2	64,4	64,3	55,8	56	55,2	48,3	49,95
2013	38,4	29,1	21,3	27	62,3	49	33,6	28,1	26,4	27,3	46,7	47,5	36,39
2014	51,1	42,5	33,8	29,3	41,1	49,1	40,6	25,3	16	21,5	31,8	32,8	34,58

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ср.год
2015	26,9	22	20,5	27,6	75,7	71,4	46	41,5	32,6	31	29,5	37,6	38,53
2016	42,3	35,7	28,3	39,3	65,3	53,9	38,3	34,9	33,8	27,3	27,4	33,2	38,31
2017	30,8	26,3	21,8	24,9	53,8	69,7	50,4	48,4	57	63,8	52,8	45,5	45,43
2018	40,5	35,1	27	31,1	91,7	73,6	43,1	25,4	18,9	30,2	36,4	29,8	40,23
2019	25,3	23,9	24,7	33,1	82,5	70,1	41,9	25,9	15,6	17,8	28,4	35,6	35,40
2020	38,3	40,5	42,6	45,2	73	73,7	47,7	45,2	43,1	48,7	57,9	57,8	51,14
2021	47,2	38,4	32,1	43,4	68	59,6	34,4	21,1	19	19,2	31,9	34,1	37,37
2022	32	28,6	25,9	30,1	75	73,4	47	30,8	21,1	18,8	25,4	27,7	36,32

Приложение 3

Исходные данные: сумма осадков за месяц, и сумма осадков за год.

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	сумм год
1966	37	29	69	101	34	62	89	91	98	72	28	64	774
1967	25	15	29	35	61	74	33	95	23	85	34	56	565
1968	29	37	52	57	52	40	79	77	96	55	30	30	634
1969	42	19	15	33	59	21	59	67	119	68	72	57	631
1970	29	13	37	66	25	54	34	52	182	63	28	27	610
1971	57	26	59	11	20	107	43	79	20	46	49	37	554
1972	5	18	21	36	42	18	49	48	32	46	68	30	413
1973	31	27	37	31	25	50	5	113	73	77	42	36	547
1974	20	43	23	24	42	31	77	115	29	80	97	36	617
1975	32	23	23	74	49	53	47	46	52	31	64	59	553
1976	31	12	35	35	30	82	82	149	119	11	27	26	639
1977	14	25	43	32	90	56	94	70	83	36	57	17	617
1978	28	9	48	24	3	68	52	160	89	30	39	14	564

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	сумм год
1979	29	22	21	22	25	28	26	54	44	57	51	24	403
1980	24	32	9	26	13	32	23	31	22	53	59	41	365
1981	28	23	40	38	44	132	78	84	64	92	53	86	762
1982	32	10	19	37	53	74	86	70	51	36	53	51	572
1983	41	16	46	18	50	60	93	41	76	60	47	55	603
1984	57	7,5	17,2	5,4	43,8	32,8	124,8	47,7	88,8	109,1	12,6	17,2	563,9
1985	36,8	15,1	12,2	17,2	47,5	114,6	38,8	43,4	41,7	50,7	20,6	58,8	497,4
1986	36,3	10,8	18,4	52,8	27	37,1	41,2	77,7	88,2	35,8	29,3	46,4	501
1987	14,8	33,6	24,9	16	55,2	70,8	95,5	130,5	44,1	0,2	26,6	36,5	548,7
1988	24,1	27,8	35,4	63,5	30,4	63	72,1	152,3	56,3	62	34,1	46,4	667,4
1989	41,7	26,1	29,3	8,8	14,1	32,4	53,5	108,7	54,5	65,6	33,3	31,1	499,1
1990	49,6	48,1	39,5	28,3	48,4	63,9	105,6	30,2	54	39,3	54,7	41,4	603
1991	48,8	29,4	19	53,1	54,2	74,5	57,5	81,9	37,8	55,1	51,6	40,2	603,1
1992	29,5	21,2	43,5	89,6	32,8	20,1	49,4	104,7	74,1	54,9	54,6	41,6	616
1993	28,1	24	41,2	17,1	39,7	53,8	113,2	3,6	51,5				372,2
1994	34,2	7,9	51,5	47,3	28,8	117,7	36,9	53	116,5	57,9	34,3	43,5	629,5

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	сумм год
1995	54	23,3	43,2	42,6	77,8	33,9	75,9	46,5	34,3	50,5	85,2	30	597,2
1996	13,8	28,9	6,6	14,8	29,7	86,4	104	22,1	42,3	23,6	58,2	50,2	480,6
1997	31,6	29,2	30,4	58,6	59,2	61,2	18,6	33	65,3	68,4	60,4	38,4	554,3
1998	33,2	42,9	39,6	6,4	67,3	100,7	91,9	81,2	47	59,5	42	39,3	651
1999	35,4	31,1	14,2	26,8	36,7	53,2	64,1	39,9	39,5	55,5	34,1	96,5	527
2000	38,5	33,8	34,5	17,5	40,5	44	143,6	61,8	75,9	64,3	62,9	43,5	660,8
2001	23,5	37,6	39,7	23,2	92,3	54,1	63,9	72,2	48,2	80,1	92,8	31,9	659,5
2002	32,5	34,6	32,1	9	48,6	39,9	55	20,9	72,8	53,8	73,1	16,7	489
2003	38	6,5	21,4	27,8	23,1	71,3	67,7	205,5	49,8	78	37,3	54,9	681,3
2004	29,2	27,4	53,9	9	42,6	53,8	177,8	134,7	51,6	39,6	57	42,4	719
2005	45,5	13,2	38,2	40,7	86	44,2	70,6	37,5	29,4	36,6	65	49,7	556,6
2006	41,1	13,6	20	29,7	28,9	66,6	75	84,8	60,8	97,2	61	25,2	603,9
2007	50,5	25,6	32,9	45	91,4	70,8	97,3	42,7	56,4	10	36,5	14,1	573,2
2008	38,2	46,5	63,6	30,9	24	53,3	74,3	180,4	22,9	93,8	63,3	19,2	710,4
2009	57,6	36,9	31,2	6,7	18,8	88,9	112,8	99,4	59,5	74,8	55,5	54,1	696,2
2010	10,3	33,8	22,3	17,2	74,4	78,2	39,7	61,5	94,4	43,3	80,4	38,1	593,6

год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	сумм год
2011	58,9	24,7	23,5	11	55,8	26,5	101,8	86,4	111	35	37,6	52,8	625
2012	45,4	13,6	41,5	42,6	47,6	119,9	81,8	88,6	48,3	68,1	52,7	60,8	710,9
2013	24,8	27,5	16,6	22,1	40,8	87,8	43,3	65,5	66,9	53,1	56,8	37,3	542,5
2014	44	27,1	31,4	13,2	56,9	39,6	62,3	60,2	29,5	38,7	21,4	27,5	451,8
2015	42,8	39	17	36,4	60,9	48,9	80,9	65,4	35,7	17,1	49,7	55	548,8
2016	64,6	23,7	11,2	49,6	36,9	71	122,8	202,5	48,6	12,3	62,4	49,6	755,2
2017	29	26	21,7	58,2	41,1	68,1	74,7	62,6	138,4	45,1	36,8	60,2	661,9
2018	32,3	27,6	41	67,3	17,2	36,6	57,7	106,3	49,9	42,3	20	13,8	512
2019	54,8	51,5	40,8	10,9	54	29	131,8	47,1	42,4	91,9	29,8	84,7	668,7
2020	26,1	41,9	23,2	35,4	24,2	39,6	59	56,8	68,7	53,4	26,1	44,3	498,7
2021	52,9	49,9	22,5	37,9	60,4	69,5	33,6	186,8	44,6	64,7	58,6	62,5	743,9
2022	21,6	43,5	18,7	18,7	86,3	71,3	99,8	100,2	120,6	38,6	24,5	44,1	687,9
2023	35,3	14,3	46,6	20,5	20,6	38,5	150,8	69,7	76,4	136,4	112,9	61,3	783,3
2024	39,6	28,5	57,2	115,3	13,4	43	81,2	18,6	35,6	57	53,6	41,8	584,8