



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 **Гидротехническое освоение реки
Кемь и изучение ее
гидрологического режима**

Исполнитель Михеева Мария Вадимовна
(фамилия, имя, отчество)

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

Вампилова Людмила Борисовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«16» июня 2026 г.

Санкт-Петербург
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНА РЕКИ КЕМЬ	7
1.1 Тектоника, геология и рельеф бассейна реки Кемь	7
1.2 Климатическая характеристика бассейна реки Кемь.	11
1.2.2 Атмосферные осадки	15
1.2.3 Ветровой режим.	18
1.3 Гидрографическая сеть и естественный водный баланс бассейна	19
1.3.1 Основные притоки.	20
1.3.2 Естественная зарегулированность стока.	21
1.3.3 Водный баланс.	22
1.3.4 Внутригодовое распределение стока (гидрограф).	23
1.3.5 Продольный профиль реки Кемь.	26
1.3.6 Морфометрические характеристики реки Кемь	29
1.3.7 Пороги реки Кемь.	30
1.4 Почвенно-растительный покров и его влияние на водность.....	32
1.4.1 Почвенный покров.	33
1.4.2 Растительный покров.....	35
1.4.3 Влияние почвенно-растительных условий на водность притоков. ..	38
2. КЕМСКИЙ КАСКАД ГЭС: СОСТАВ ГИДРОУЗЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОХРАНИЛИЩ.	42
2.1. Этапы гидротехнического освоения. Состав и основные параметры ГЭС	42

2.1.1 Состав и основные параметры ГЭС.....	44
2.2. Детальная характеристика водохранилищ Кемских ГЭС и их морфометрия.....	45
2.2.1 Уровенный режим водохранилищ.	47
2.3. Водный баланс и уровенный режим водохранилищ (с оценкой испарения и ледовой аккумуляции)	49
2.3.1 Притоки реки Кемь и их вклад в водный баланс.	49
2.3.2 Водный баланс водохранилищ.	50
2.3.3 Оценка испарения с водной поверхности	53
2.3.4 Оценка ледовой аккумуляции	54
3. АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕКИ КЕМЬ.....	56
3.1. Методика исследования и характеристика исходных данных.....	56
3.2. Многолетняя динамика притока к водохранилищам Кемского каскада	57
3.2.1. Зарегулированный режим (ГЭС Кемского каскада, 1968–2000 гг.)	59
3.2.2. Сравнение естественного и зарегулированного периодов	64
3.2.3. Боковая приточность и вклад реки Чирка-Кемь.....	66
3.2.4. Классификация лет по водности	68
3.2.5. Кривые обеспеченности годового стока	70
3.2.6. Статистические характеристики годового стока.....	73
3.3. Внутригодовое распределение стока	74
3.4. Уровенный режим и его трансформация.....	76
3.4.1. Хронология среднегодовых уровней	77
3.4.2. Сезонные изменения уровней.....	78

3.4.3. Изменение уровней в створах ГЭС	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	88
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	91

ВВЕДЕНИЕ

Река Кемь, крупнейшая водная артерия северной Карелии, играет ключевую роль в формировании природной среды и хозяйственного комплекса региона. Её гидроэнергетический потенциал, обусловленный значительным падением (101 м) и устойчивым стоком, начал активно осваиваться во второй половине XX века. Строительство каскада гидроэлектростанций, продолжавшееся с 1967 по 2024 год, превратило реку из естественного водотока в сложную водохозяйственную систему. Завершение этого длительного этапа гидротехнического строительства создает уникальную возможность для комплексной оценки его последствий и анализа современного состояния реки.

Актуальность темы исследования определяется несколькими взаимосвязанными факторами. Во-первых, река Кемь стала первым и единственным в Карелии водотоком, чей гидроэнергетический потенциал использован практически на 100%. Это позволяет рассматривать Кемский каскад ГЭС как модельный объект для изучения долгосрочных последствий полного зарегулирования речного стока в условиях таежной зоны Балтийского кристаллического щита (рис. 1.1.). Во-вторых, наблюдаемые в последние десятилетия климатические изменения, выражающиеся в устойчивом росте зимних температур и увеличении доли жидких осадков, вносят коррективы в сложившийся гидрологический режим. Это требует переоценки расчетных гидрологических характеристик, на которых основаны правила эксплуатации ГЭС, для обеспечения их безопасной и эффективной работы. В-третьих, создание каскада водохранилищ оказывает многоплановое воздействие на окружающую среду и хозяйственную деятельность: от затопления и подтопления территорий до активизации береговых процессов (абразии) и изменения условий водопользования. Систематизация и анализ накопленных данных о параметрах водохранилищ и трансформации гидрологического режима необходимы для устойчивого управления водными ресурсами, прогнозирования рисков и планирования природоохранных мероприятий. [3, 11, 27]

Объектом исследования является бассейн реки Кемь и в его пределах Кемский каскад гидроэлектростанций, включающий Юшкозерскую, Кривопорожскую, Белопорожские (1 и 2), Путкинскую и Подужемскую ГЭС. [22]. Предметом исследования выступают гидрологический режим реки и водохранилищ, его пространственно-временная динамика и трансформация под влиянием зарегулирования и современных климатических факторов.

Цель работы заключается в анализе трансформации гидрологического режима реки Кемь под влиянием гидротехнического строительства и изменений климата в бассейне. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Дать физико-географическую (покомпонентную) характеристику бассейна реки Кемь, с целью выявления влияния каждого природного компонента на водность реки Кемь.

2. Провести детальный анализ технических параметров гидроузлов и водохранилищ Кемского каскада.

3. Рассчитать основные гидрологические характеристики на основе анализа многолетних рядов данных. Оценить изменения водного баланса, уровня режима реки Кемь под влиянием гидротехнического освоения.

4. Классифицировать годы по водности и проанализировать тенденции изменения стока.

Методологическую основу работы составляет комплекс взаимодополняющих методов: картографический (анализ карт рельефа, геологии, четвертичных отложений); статистический анализ временных рядов гидрометеорологических данных; метод водного баланса для оценки приточности и потерь в водохранилищах; методы математической статистики (построение кривых обеспеченности, выявление трендов). [2, 9, 12, 24]

Практическая значимость работы заключается в том, что ее результаты могут быть использованы для уточнения правил эксплуатации водохранилищ

Кемского каскада, при планировании берегоукрепительных работ, а также в учебном процессе при подготовке специалистов в области гидрологии и водного хозяйства.

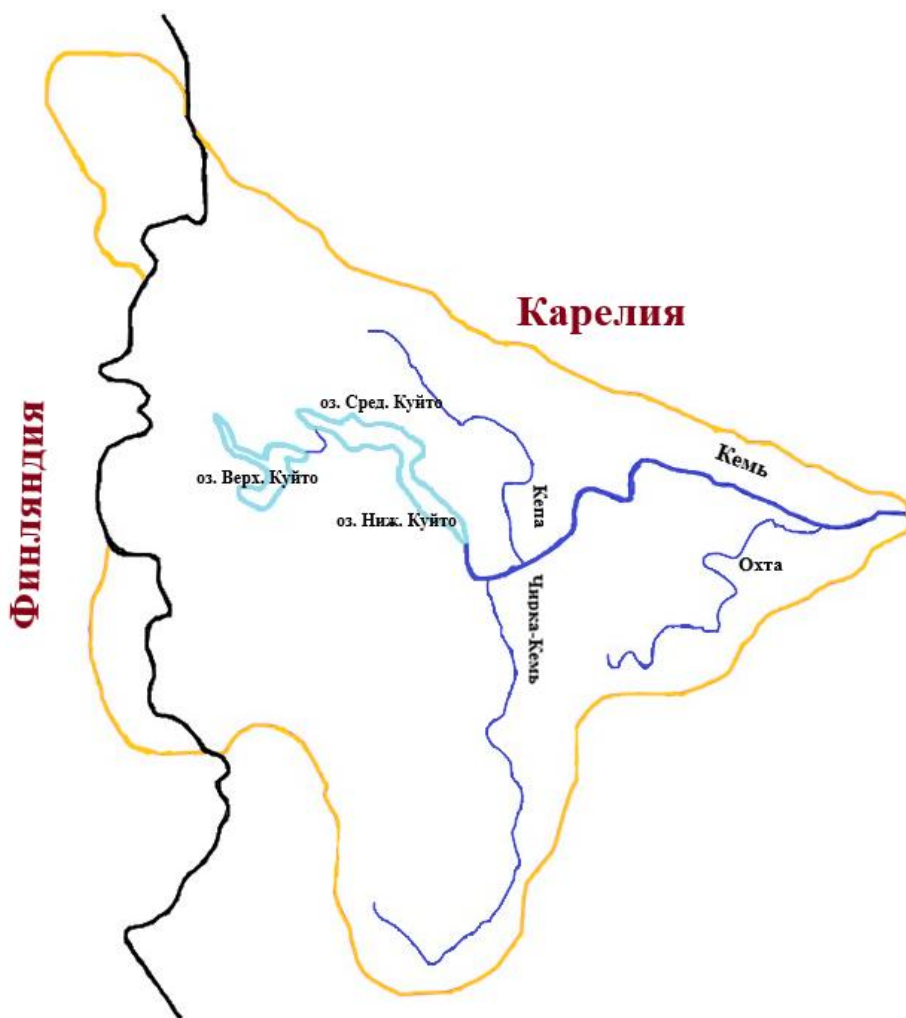


Рисунок 1.1 – Схема бассейна реки Кемь

1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БАСЕЙНА РЕКИ КЕМЬ

1.1 Тектоника, геология и рельеф бассейна реки Кемь

Бассейн реки Кемь расположен в северной части Республики Карелия и служит восточной частью Балтийского кристаллического щита, относящегося к Карельскому сегменту древней Восточно-Европейской платформы [3]. Геологический фундамент сложен древними породами архейско-протерозойского возраста: гранитами, гнейсами, амфиболитами, которые повсеместно выходят на поверхность или перекрыты маломощным чехлом четвертичных отложений (рис. 1.2) [8]. Тектоническая структура характеризуется системой разломов северо-западного простирания, которые предопределили ориентацию основных орографических элементов и самой речной сети [3, 19].

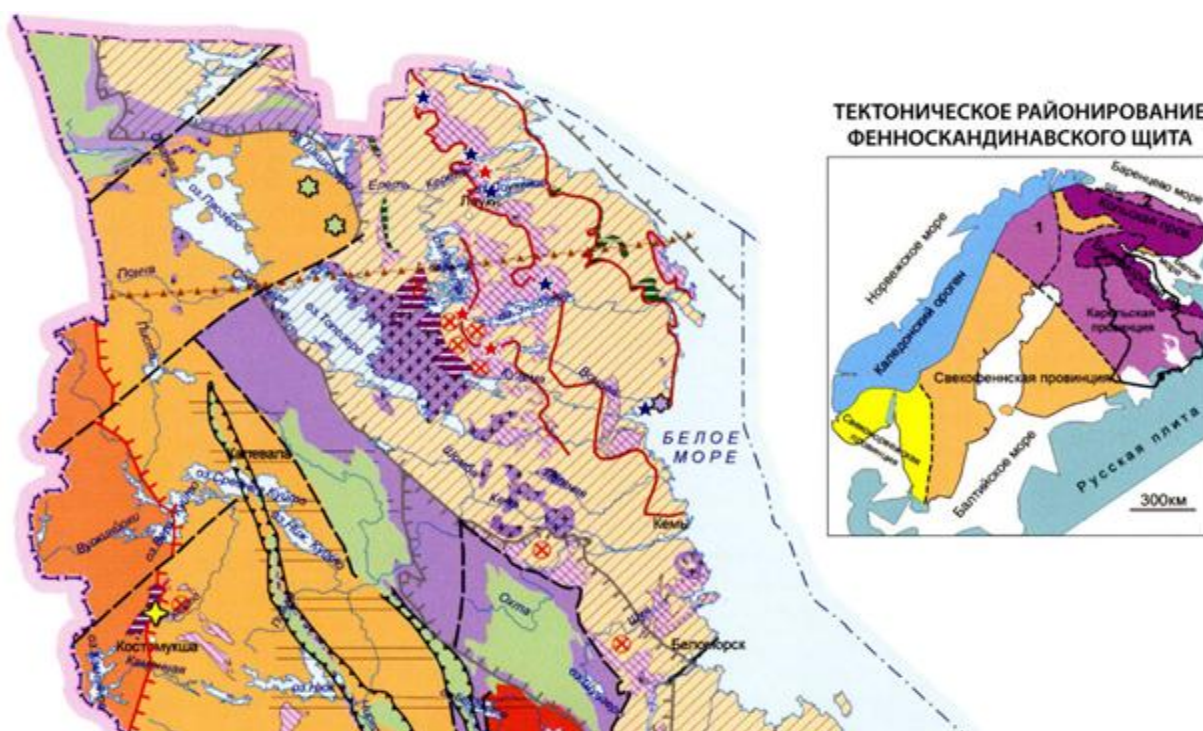


Рис. 1.2 Тектоническая карта Карелии (Условные обозначения Приложение Е1)

На протяжении всего бассейна реки Кемь отмечаются сбросы, ограничивающие ятулийские грабен-синклинали, в которых прослеживаются реликты бассейна с проявлениями мантийно-плюмового магматизма [16]. Часть

верхнего течения реки представлена палеопротерозойскими породами возраста 1,5-2,5 млрд. лет. В среднем течение есть проявления пород суммийского возраста континентального рифта (рис. 1.3). Кристаллический фундамент в нижнем течение реки Кемь представлен палеопротерозойскими орогенами. Складчатые комплексы унаследованы верхнеятулийско-суйсарскими деформациями разломного и приразломного типа, омоложенные в ятулийское время [19].

В верхней части бассейна, в месте выхода реки из озера Нижнее Куйто, повсеместно имеются выходы гранитов и палеогранитов, между ними встречаются выходы гранодиоритов архея. Центральная часть течения реки Кемь характеризуется выходами кварцитопесчанников, кварцитов, конгломератов, доломитов и базальтов. В нижнем течение в долине реки очаговые проявления базальтов, андезитов и интрузии перидотитов и габброидов. Все эти породы, относящиеся к архейским образованиям, переработаны в палеопротерозое (рис. 1.3). На всем протяжении геологическое строение характеризуется протерозойскими интрузиями гранитов, гранодиоритов, основных и ультраосновных пород [3, 8].

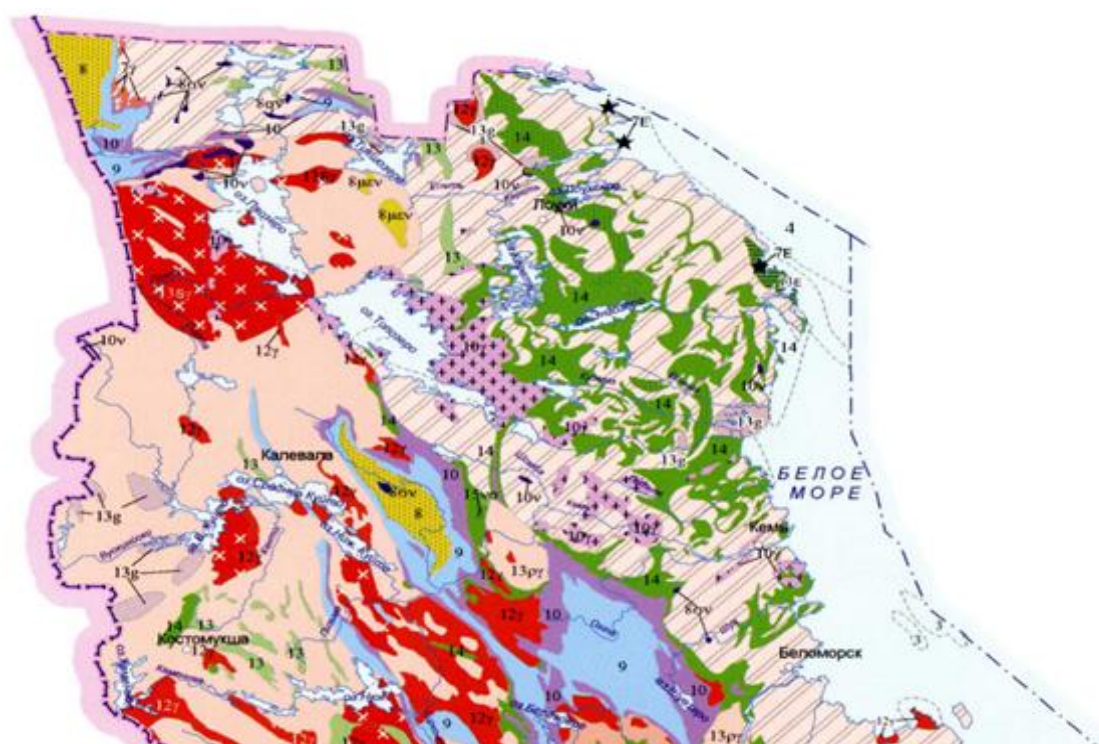


Рис. 1.3 Геологическая карта Карелии (Условные обозначения Приложение Е2)

Кристаллический фундамент на протяжении всего бассейна перекрыт разновозрастными четвертичными отложениями: в низовьях реки преобладают гомогенные глинисто-алевритовые отложения, песчано-гравийные морского и ледникового происхождения и биогенные (торфяные) отложения. Средняя часть бассейна представлена ледниковыми моренными отложениями с гравийно-песчаной мореной с полями друмлинов, фрагментами конечно-моренных гряд и холмов (рис 1.4.). Верховья реки и северные берега озер Куйто перекрыты холмистыми моренными отложениями с песчано-гравийной смесью и биогенными отложениями. Верхнечетвертичные и современные отложения различаются по происхождению: на морские, озерно-ледниковые, озерные внутриледниковые, флювиогляциальные, ледниковые [3, 9]. Среди них встречаются выходы дочетвертичных пород — граниты, диабазы и др.



Рис. 1.4 Карта четвертичных отложений Карелии (Условные обозначения Приложение Е3)

Мощность четвертичного покрова на территории бассейна неравномерна и колеблется от нескольких сантиметров на выступах кристаллического фундамента до 100–150 метров в тектонических депрессиях, при средних значениях 8–12 метров [9, 20].

Четвертичные отложения бассейна реки Кемь, благодаря своей значительной мощности и высокой влагоемкости, выполняют важнейшую гидрологическую функцию — они аккумулируют влагу в периоды избыточного увлажнения и постепенно отдают её в речную сеть в засушливые периоды, тем самым регулируя сток на протяжении всего года. Именно эта способность рыхлых отложений выступать в роли природного буфера влаги, наряду с высокой озерностью и заболоченностью территории, создала уникальные условия естественной зарегулированности реки Кемь, что впоследствии определило успешность её гидроэнергетического освоения.

Специфические особенности рельефа связаны с тем, что западная часть, системы озер Куйто, приурочена к отрогам возвышенностей Маанселькя и Западно-Карельской, поэтому абсолютные отметки значительно выше, чем на всей остальной части бассейна. Здесь преобладают возвышенности разного уровня: мяки и ваара. После выхода реки Кемь из Нижнего Куйто в центральную часть Карельской моренной равнины, относящейся к ландшафтам платформенных равнин на кристаллических породах докембрийских щитов с ледниковой обработкой. Отдельные участки относятся к ландшафтам возвышенных платформенных равнин с выходами докембрийских щитов, местами с грядами и глыбовыми холмогорьями [2, 9].

Важность четвертичных отложений как природного резервуара чистой подземной воды подтверждается недавним открытием. В декабре 2024 года специалисты АО «Росгеология» завершили работы по поиску подземных вод на севере Карелии, которые велись с 2022 года в рамках федеральной программы «Геология: возрождение легенды» [26]. В пределах лицензионной площади было пробурено семь гидрогеологических скважин глубиной 100 м каждая. В результате открыто Кемское месторождение питьевых подземных вод с утверждёнными балансовыми запасами 4,3 тыс. м³/сут по категориям С1+С2 [21, 26]. Месторождение станет резервным источником водоснабжения для города Кемь и посёлка Рабочеостровск, что особенно важно, поскольку

существующий водозабор на реке Кемь, построенный ещё в 1970-х годах, не может гарантировать стабильное качество питьевой воды из-за специфики геологических и климатических условий [23, 26]. Этот факт наглядно иллюстрирует высокий гидрогеологический потенциал рыхлых четвертичных отложений региона и подтверждает их значение как природного резервуара для устойчивого водоснабжения.

Таким образом, специфика геологического строения и рельефа бассейна р. Кемь играет ключевую роль в формировании её гидрологического режима и определила благоприятные условия для гидротехнического строительства. Кристаллический фундамент, перекрытый чехлом рыхлых четвертичных отложений разной мощности и генезиса, создаёт мозаичную картину условий залегания и движения подземных вод. Наличие мощной толщи рыхлых отложений (моренных, озерно-ледниковых, биогенных) в центральной и нижней частях бассейна, обладающих высокой влагоёмкостью, способствует аккумуляции атмосферных осадков и регулированию подземного питания реки, что в совокупности с высокой озерностью и заболоченностью обеспечивало высокую естественную зарегулированность стока [9, 19]. С инженерно-геологической точки зрения, выходы на поверхность или неглубокое залегание скальных кристаллических пород в русле реки создали надёжное основание для возведения плотин Кемского каскада. В то же время, широкое распространение водонасыщенных, часто неустойчивых биогенных (торфяных) и тонкодисперсных озерно-ледниковых отложений в зонах затопления и на берегах водохранилищ предопределило развитие таких негативных процессов, как переработка берегов и подтопление прилегающих территорий.

1.2 Климатическая характеристика бассейна реки Кемь.

Географическое положение бассейна реки Кемь (между $63^{\circ}30'$ и $65^{\circ}50'$ с.ш.) в умеренных широтах определяет основные климатические особенности территории. Суммарная солнечная радиация в регионе составляет около 80–85 ккал/см² в год, а годовой радиационный баланс — порядка 32–35 ккал/см², что

характерно для таёжной зоны с избыточным увлажнением. Положительный радиационный баланс сохраняется с апреля по сентябрь, достигая максимума в июне [2, 3].

Циркуляция атмосферы над территорией бассейна определяется взаимодействием трёх ключевых центров действия: Исландского минимума, Азорского максимума и Арктического максимума [1]. Это обеспечивает круглогодичное преобладание западного переноса воздушных масс с Атлантического океана. Атлантический воздух поступает на территорию прогретым и насыщенным влагой, что смягчает зимние холода (вызывая частые оттепели) и снижает летнюю жару, одновременно принося основную массу осадков [1, 12]. Вторжения арктического воздуха, особенно в тылу циклонов, вызывают резкие и длительные похолодания зимой и заморозки в переходные сезоны [3].

1.2.1 Температурный режим.

Для анализа температурного режима привлечены данные метеостанции Кемь-порт (индекс ВМО 22520), расположенной на острове Попова в посёлке Рабочеостровск ($64^{\circ}59'49''$ с.ш., $34^{\circ}47'25''$ в.д.). В работе использован максимально длинный и качественно однородный ряд инструментальных наблюдений за 1960–2025 гг., охватывающий 65 лет. С 1960-х годов на станции внедрены стандарты современных восьмисрочных наблюдений, что обеспечивает высокую сопоставимость данных во времени [24].

Средняя многолетняя температура воздуха за указанный период составляет $+1,69^{\circ}\text{C}$ (таблица 1.1). Отрицательные среднемесячные температуры сохраняются с ноября по март; самый холодный месяц — январь ($-10,30^{\circ}\text{C}$), самый тёплый — июль ($+14,58^{\circ}\text{C}$). Амплитуда между средними температурами января и июля достигает около 25°C , что подтверждает континентальный характер климата, смягчённый влиянием Белого моря. Переход температуры через 0°C происходит в апреле, а устойчивый переход через $+10^{\circ}\text{C}$ — в июне. Это определяет продолжительность вегетационного периода и условия формирования весеннего половодья.

Таблица 1.1 – Среднемесячная температура воздуха на метеостанции Кемь-порт.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
t, °C	-10,30	-9,91	-5,39	-0,31	5,35	11,12	14,58	13,29	8,95	2,87	-2,80	-7,12	1,69

Графическая интерпретация годового хода температур представлена на рисунке 1.5. На графике хорошо виден синусоидальный ход температур с резким подъёмом от апреля к июлю и более плавным спадом осенью. Асимметрия кривой (быстрое потепление весной и медленное охлаждение осенью) объясняется влиянием Белого моря и крупных озёр, которые отдают накопленное тепло в осенний период.

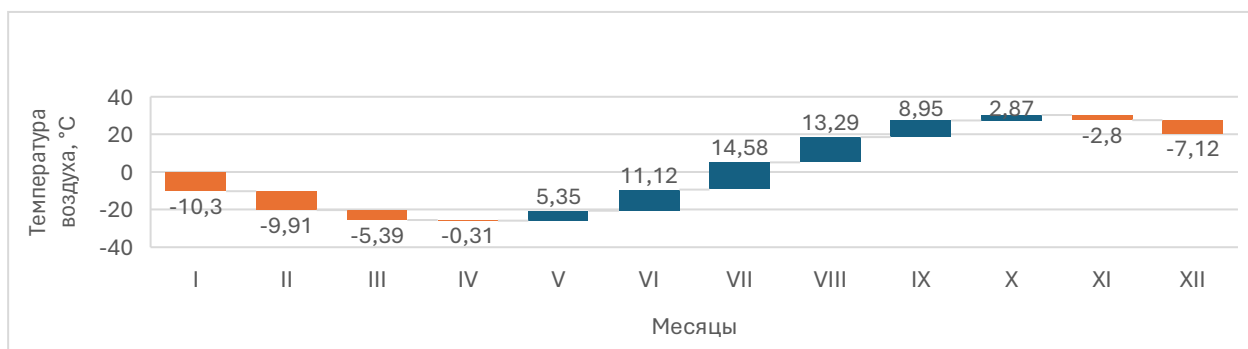


Рис. 1.5 – Ход среднемесячной температуры воздуха по метеостанции Кемь-порт.

Для выявления долговременной тенденции изменений температуры воздуха выполнен линейный регрессионный анализ среднегодовых температур за период 1960–2025 гг. Полученное уравнение тренда имеет вид: $y = 0,0412x - 80,379$, где y — температура воздуха, °C; x — год. Коэффициент детерминации указывает на то, что линейный тренд объясняет около 36% изменчивости среднегодовой температуры. Положительный коэффициент при x (0,0412) свидетельствует о тренде потепления. Согласно уравнению, за 65 лет наблюдений среднегодовая температура повысилась на 2,68 °C (рис. 1.6).

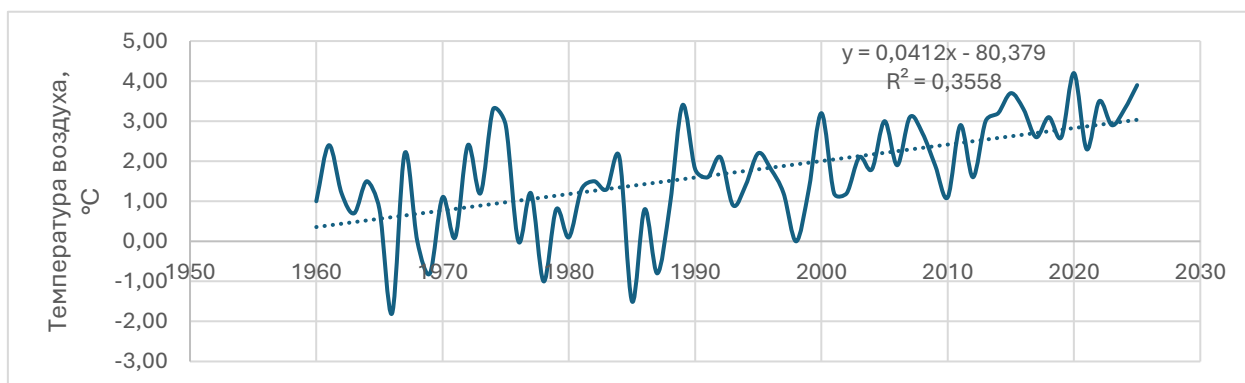


Рисунок 1.6 – Динамика среднегодовой температуры воздуха на метеостанции Кемь-порт.

Поскольку для гидрологического режима важно различие между зимними и летними условиями, был выполнен отдельный анализ для холодного периода (ноябрь–март) и тёплого периода (апрель–октябрь). Результаты представлены на рисунке 1.7.

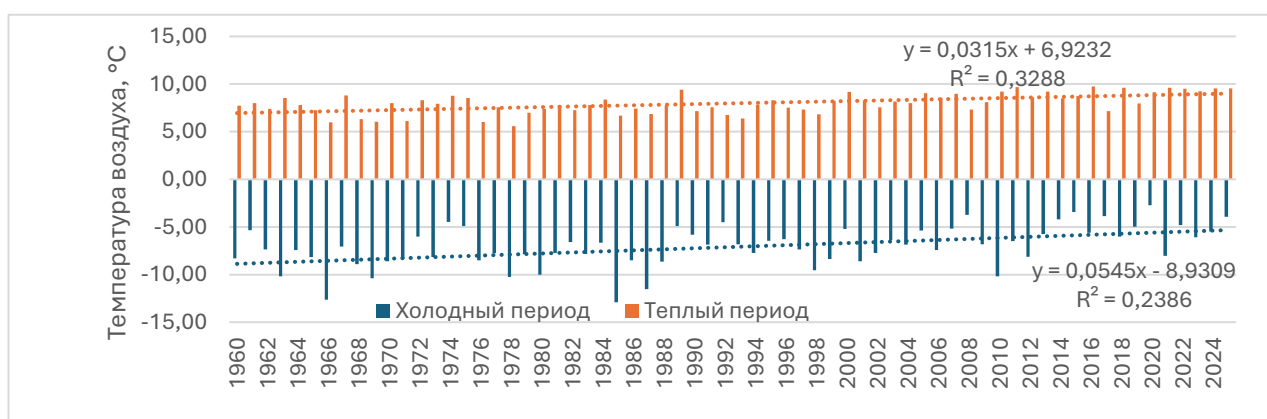


Рисунок 1.7 – Динамика средней температуры воздуха за холодный и тёплый периоды на метеостанции Кемь-порт.

Для холодного периода получено уравнение тренда: $y = 0,0545x - 8,9309$ ($R^2 = 0,2386$). Температура холодного периода повышается со скоростью $0,0545 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. За 65 лет это даёт суммарное приращение $3,54 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Для тёплого периода получено уравнение тренда: $y = 0,0315x + 6,9232$ ($R^2 = 0,3288$). Температура тёплого периода повышается со скоростью $0,0315 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, что за 65 лет даёт приращение $2,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полученные результаты показывают, что наиболее интенсивные климатические изменения в районе исследования происходят в холодное полугодие.

Скорость потепления холодного периода (0,0545 °С/год) примерно в 1,7 раза выше, чем тёплого периода (0,0315 °С/год). Это согласуется с общими тенденциями изменения климата в высоких широтах, где зимние температуры растут быстрее летних. С гидрологической точки зрения данный вывод имеет ключевое значение: повышение зимних температур ведёт к увеличению доли жидких осадков в холодный период, формированию зимних паводков и изменению режима питания реки Кемь, что необходимо учитывать при эксплуатации Кемского каскада ГЭС.

1.2.2 Атмосферные осадки.

Для анализа режима увлажнения использованы данные той же метеостанции Кемь-порт за период 1960–2025 гг. Средняя многолетняя сумма годовых осадков составляет 495 мм (таблица 1.2). Для режима увлажнения характерно отсутствие ярко выраженного сухого сезона

Таблица 1.2 – Среднемесячное количество осадков на метеостанции Кемь-порт, мм

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сумма за год
Осадки, мм	26,2	19,7	21,0	27,5	40,7	55,1	60,8	67,0	54,2	51,6	40,0	32,0	494,8

Внутригодовое распределение осадков характеризуется максимумом в августе (67 мм) и минимумом в феврале (20 мм). Сумма осадков за летние месяцы (июнь–август) составляет 183 мм, что примерно в 2,4 раза превышает сумму осадков за зимние месяцы (декабрь–февраль — 78 мм), что характерно для умеренно-континентального климата с морским влиянием.

Графическая интерпретация среднемесячного распределения осадков представлена на рисунке 1.8. Гистограмма наглядно демонстрирует внутригодовое распределение осадков. Чётко выделяются два периода: наименее влажный (ноябрь–март) и наиболее влажный летне-осенний (июнь–октябрь).

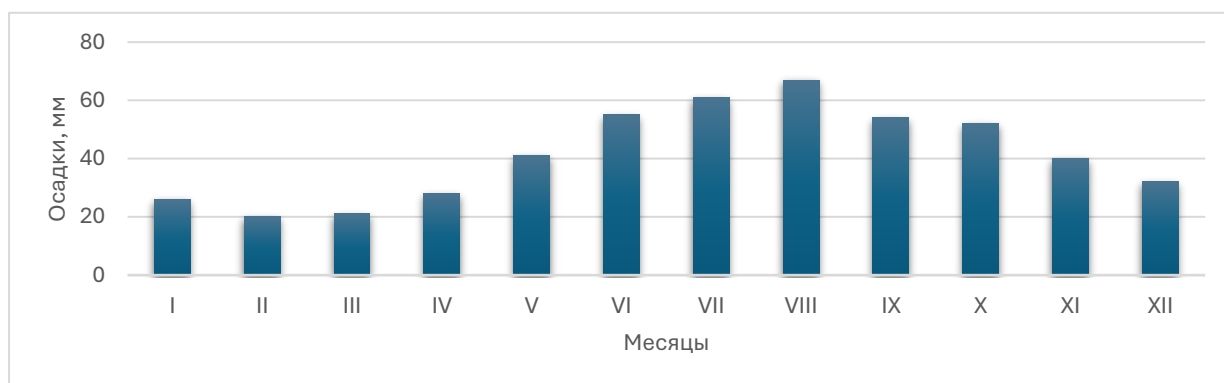


Рисунок 1.8 – Ход среднемесячных атмосферных осадков на метеостанции Кемь-порт.

Для выявления долговременных тенденций выполнен линейный регрессионный анализ многолетних рядов годовых сумм осадков, а также осадков за холодный (ноябрь–март) и тёплый (апрель–октябрь) периоды.

Годовые суммы осадков (рисунок 1.9). Полученное уравнение тренда: $y = 2,0001x - 3490,1$ ($R^2 = 0,1496$). Скорость изменения составляет 2,00 мм/год, что за 65 лет даёт приращение 130 мм. Однако низкий коэффициент детерминации ($R^2 = 0,15$) указывает на слабую связь и значительную межгодовую изменчивость, поэтому тренд не является статистически значимым.

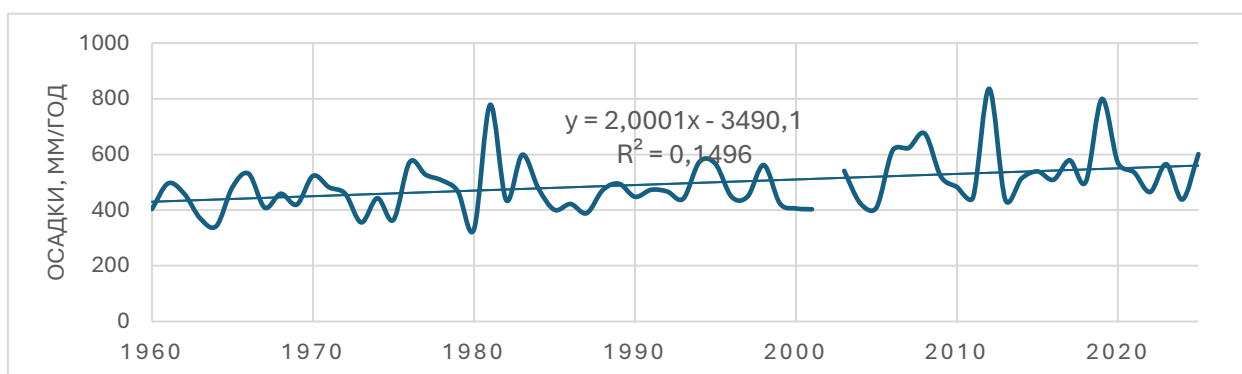


Рисунок 1.9 – Многолетняя динамика годовых сумм осадков на метеостанции Кемь-порт.

Осадки холодного периода (ноябрь–март, рисунок 1.10). Уравнение тренда: $y = 0,181x - 332,88$ ($R^2 = 0,3355$). Скорость изменения составляет 0,18 мм/год, приращение за 65 лет — 12 мм. Несмотря на несколько более высокий

коэффициент детерминации по сравнению с годовыми суммами, $R^2 = 0,34$ указывает лишь на слабую связь. Кроме того, абсолютное приращение (12 мм за 65 лет) является незначительным — менее 9% от средней суммы осадков холодного периода (которая составляет около 140 мм). Таким образом, практической значимости этот тренд не имеет.

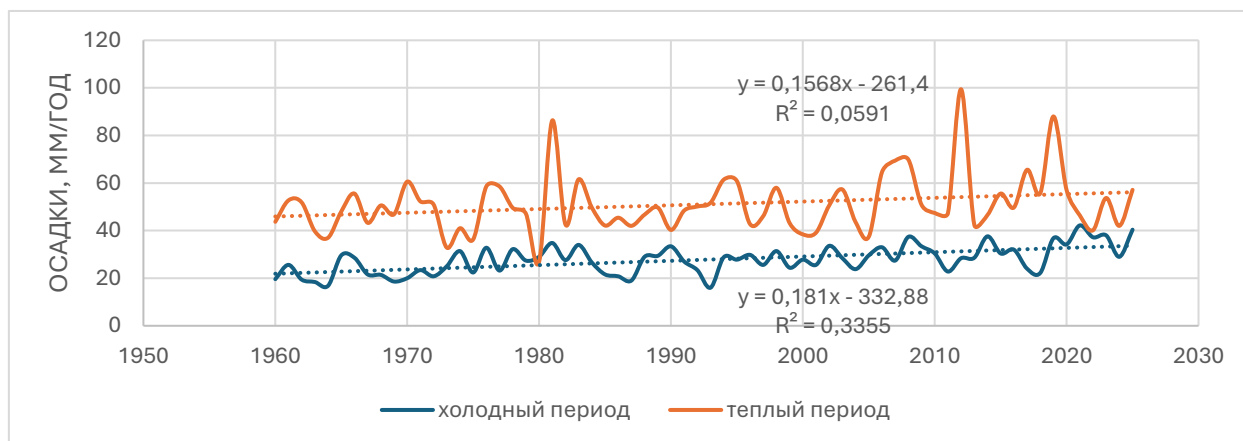


Рисунок 1.10 – Многолетняя динамика осадков за холодный (ноябрь–март) и теплый (апрель–октябрь) период на метеостанции Кемь-порт.

Осадки тёплого периода (апрель–октябрь). Уравнение тренда: $y = 0,1568x - 261,4$ ($R^2 = 0,0591$). Очень низкий коэффициент детерминации ($R^2 = 0,06$) указывает на отсутствие статистически значимого тренда, что говорит о стабильности летнего увлажнения за рассматриваемый период.

Таким образом, в режиме осадков за период 1960–2025 гг. не выявлено статистически значимых долговременных тенденций. Отмечается слабая положительная динамика годовых сумм и осадков холодного периода, тогда как осадки тёплого периода остаются стабильными. Все выявленные тренды имеют низкую практическую значимость из-за малых абсолютных приращений и высокой межгодовой изменчивости.

1.2.3 Ветровой режим.

Для территории бассейна реки Кемь характерно преобладание ветров западного и юго-западного направлений, суммарная повторяемость которых составляет 40–45% [1]. Среднегодовая скорость ветра колеблется в пределах 3,7–4,5 м/с, увеличиваясь в прибрежной зоне Белого моря и на крупных озёрах.

Направление	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль
Повторяемость, %	10	8	10	9	14	15	21	13	2

Повторяемость направлений ветра по многолетним данным метеостанции Кемь-Порт приведена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Повторяемость направлений ветра на метеостанции Кемь-Порт.

Графическая интерпретация годового распределения направлений ветра представлена на рисунке 1.11 в виде розы ветров.

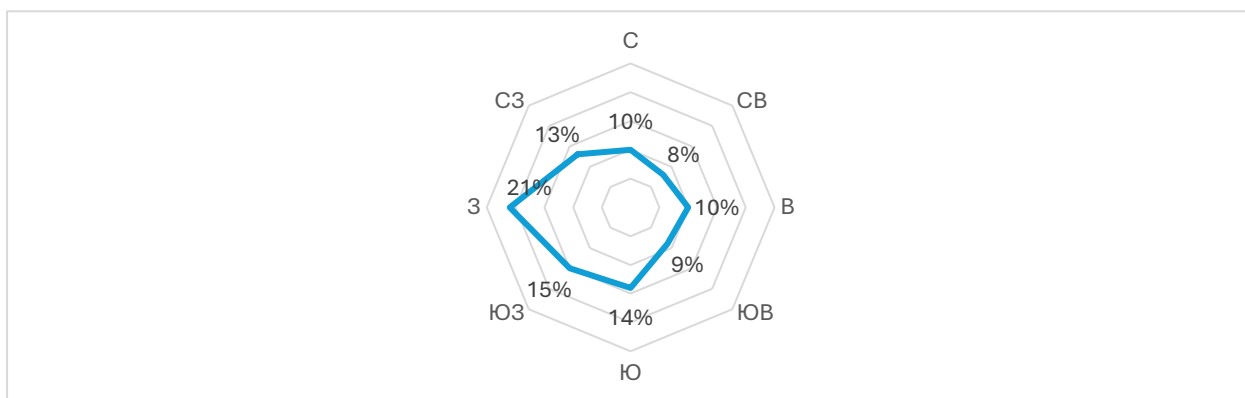


Рисунок 1.11 – Роза ветров на метеостанции Кемь-Порт

Анализ таблицы 1.3 и розы ветров показывает, что в течение года преобладают ветры западного (21%) и юго-западного (15%) направлений. Ветры северных и восточных румбов наблюдаются реже (8–10%). Доля штилей составляет 2%. Наибольшая повторяемость западных и юго-западных ветров отмечается в осенне-зимний период, однако в это время водохранилища покрыты льдом, что снижает волновое воздействие. Наиболее опасный период для абразии — весна и осень, когда водоёмы свободны ото льда, а ветровая

активность ещё достаточно высока. Ветровой режим имеет ключевое значение для формирования волновой абразии берегов водохранилищ Кемского каскада. Преобладающие западные и юго-западные ветры создают наибольшее волновое воздействие на восточные и северо-восточные берега, которые являются наветренными и подвергаются максимальному разрушению. Это необходимо учитывать при планировании берегоукрепительных работ.

1.3 Гидрографическая сеть и естественный водный баланс бассейна

Река Кемь принадлежит к бассейну Белого моря и является одной из крупнейших озерно-речных систем Республики Карелия. Фактическим истоком реки Кемь служит озеро Нижнее Куйто, однако с гидрологической точки зрения главной водной артерией системы следует считать её крупнейший приток — реку Чирка-Кемь, которая имеет большую длину (221 км) и площадь водосбора (8 270 км²) [3]. Сама река Кемь на участке от выхода из озера Нижнее Куйто до устья имеет длину 191 км, площадь её водосборного бассейна составляет 27 700 км² [2, 22]

В верхней части бассейна расположены крупные озёрные водоёмы: система озёр Куйто (Верхнее, Среднее и Нижнее Куйто), а также озеро Нюк. По данным Атласа Республики Карелия (2021) [3], площадь водосбора Среднего Куйто составляет 9 470 км², Верхнего Куйто — 7 150 км², Нижнего Куйто — 10 200 км², Нюка — 3 090 км². Высокая озёрность (около 9% от площади бассейна) и наличие многочисленных порогов и перекатов обуславливают естественную зарегулированность стока и значительный гидроэнергетический потенциал реки.

Общее падение реки Кемь составляет 101 м, средний уклон — 0,529 ‰. В нижнем течении река разделяется на два протока — Правую и Кемляс — и впадает в пролив Кемская Салма Белого моря [22].

1.3.1 Основные притоки.

В реку Кемь впадает множество притоков. Крупнейшие из них, для которых имеются достоверные гидрологические данные, представлены в таблице 1.4. Суммарный вклад всех остальных (малых) притоков в водный баланс не превышает 5–7 % общего стока [12]. Помимо перечисленных в таблице, в бассейне насчитывается более 20 малых водотоков. Среди левосторонних: Варайоки (Янеайоки), Кела, Иляюпяуж, Алаюпяуж, руч. Нуояиоя, Верхняя Пашкаоя, Средняя Пашкаоя, Вискезон, руч. Мянтюоя, Кужатоя, руч. Шалояоя, руч. Лесной (Погашомба), руч. Комиссаров (Пюехтоя), руч. Лахнаручей (Лещев), руч. Нольручей, руч. Пастухручей, руч. Виткеручей, Пуэта. Среди правосторонних: Муштаоя, Сопа, Куйвашоя, Орчежоя, Ихазеноя, руч. Погонялочный, Авнерека, руч. Викей, Левис, руч. Ветонручей, Ужманга [22]

Таблица 1.4 Основные притоки реки Кемь

Приток	Расположение	Длина, км	Площадь водосбора, км ²	Среднегодовой расход воды (Q), м ³ /с
Чирка-Кемь	правый	221	8 270	81
Охта (Нижняя Охта)	правый	142	2 170	21,7
Кепа	левый	154	1 640	16
Шомба	левый	85	1 090	10,9
Поньгома	левый	86	1 220	11,8

Крупнейший приток — река Чирка-Кемь, по своим характеристикам сопоставимая с главной рекой: её длина превышает длину самой Кеми, а площадь водосбора составляет около 30 % от общей площади бассейна. Это позволяет рассматривать систему «Чирка-Кемь – Кемь» как единый сложный водоток с каскадным расположением озёрных плёсов [22].

1.3.2 Естественная зарегулированность стока.

Для бассейна р. Кемь характерна высокая степень естественной зарегулированности стока, обусловленная прежде всего высокой озёрностью. Озёра занимают около 11–12 % площади бассейна, а в верхней части (выше створа Юшкозерской ГЭС) коэффициент озёрности достигает 15–18 % [12].

Крупнейшие озёра бассейна — Верхнее Куйто (площадь зеркала 198 км², максимальная глубина 44 м), Среднее Куйто (257 км², глубина до 34 м) и Нижнее Куйто (141 км², глубина до 33 м) — расположены каскадом в верховьях реки и образуют единую озерную систему. Эта система контролирует сток с площади около 40 % всего водосбора. Среднее и Нижнее Куйто с 1956 года превращены в водохранилища, что ещё до строительства ГЭС усилило их регулирующую роль [3]. Помимо системы Куйто, в бассейне находится крупное озеро Лексозеро (площадь зеркала 166 км², наибольшая глубина 34,2 м), относящееся к бассейну Балтийского моря [17]. Однако его влияние на сток реки Кемь опосредованное, через систему притоков.

Озёра играют роль гигантских естественных водохранилищ. В период весеннего половодья они аккумулируют избыток талых вод, растягивая половодье во времени и снижая максимальные расходы. В меженный период, особенно в зимнюю межень, озёра постепенно отдают накопленную воду, поддерживая устойчивый уровень в реке. Механизм этого влияния настолько велик, что на реках с высокой озёрностью (более 10 %) весенний сток распределяется на 2–3 месяца, а доля стока за этот период снижается до 40–50 % от годового [12].

Благодаря такому регулированию река Кемь даже в естественном состоянии характеризовалась относительно выровненным гидрографом, что впоследствии создало благоприятные предпосылки для её гидроэнергетического освоения.

1.3.3 Водный баланс.

До начала активного гидротехнического строительства (до 1967 г.) водный режим р. Кемь формировался исключительно под влиянием природных факторов. Питание реки — смешанное, с преобладанием снегового [12].

Водный баланс бассейна в естественных условиях описывается уравнением $P = Y + E$, где P — атмосферные осадки, Y — речной сток, E — суммарное испарение (включая транспирацию и испарение с водной поверхности) [12]. Для многолетнего периода изменения запасов воды в бассейне (ΔU) принимаются равными нулю, что делает уравнение справедливым для расчёта осреднённых характеристик.

Выбор расчётного створа для характеристики стока. Для оценки речного стока всего бассейна р. Кемь в гидрологической практике используется створ, расположенный в 18 км от устья [4]. Этот створ является наиболее репрезентативным, так как находится ниже впадения всех крупных притоков (Чирка-Кемь, Кепа, Шомба, Охта) и выше зоны влияния приливов Белого моря, которые могут искажать естественный режим стока.

Средний многолетний речной сток. Согласно данным «Ресурсов поверхностных вод СССР» [12] и Государственному водному кадастру [4], средний многолетний расход воды реки Кемь в створе 18 км от устья за период до начала гидротехнического строительства (до 1967 г.) составляет 275 м³/с [ГВР]. В пересчёте на площадь водосбора (27 700 км²) это соответствует 313 мм/год или 8,67 км³/год.

Атмосферные осадки. По данным «Ресурсов поверхностных вод СССР» [12], средние многолетние атмосферные осадки для бассейна реки Кемь составляют 600 мм/год (16,62 км³/год). Эта величина представляет собой осреднение показателей с нескольких метеорологических станций, расположенных

в разных частях бассейна, и поэтому более репрезентативна для воднобалансовых расчётов, чем данные отдельной метеостанции.

Величина суммарного испарения получена расчётным путём из уравнения водного баланса ($E = P - Y$), так как прямые измерения испарения для всего бассейна реки отсутствуют. Для многолетнего периода это классический гидрологический метод, основанный на том, что изменения запасов воды в бассейне (ΔU) приближаются к нулю. В результате расчёта по формуле $E = P - Y$ получаем значение 287 мм/год (7,95 км³/год).

Таблица 1.5 – Средний многолетний водный баланс бассейна р. Кемь в естественных условиях

Элемент баланса	В слое, мм/год	В объёме, км ³ /год	Доля от осадков, %
Атмосферные осадки (P)	600	16,62	100
Речной сток (Y)	313	8,67	52,2
Суммарное испарение (E)	287	7,95	47,8

Как видно из таблицы 1.5, речной сток составляет 52,2% от суммы выпадающих атмосферных осадков, а испарение — 47,8 %. Такое соотношение, при котором сток незначительно превышает испарение, является классическим для территорий с избыточным увлажнением бореальной зоны и подтверждает высокую водность реки Кемь. Именно это свойство — устойчивый сток на протяжении большей части года — создало благоприятные предпосылки для гидроэнергетического освоения реки.

1.3.4 Внутригодовое распределение стока (гидрограф).

Для характеристики внутригодового распределения стока реки Кемь в естественных (незарегулированных) условиях использованы данные гидрологического поста «р. Кемь — ст. Подужемье» за период 1926–1963 гг. (Приложение Б). Этот пост находился у села Подужемье, которое впоследствии было затоплено при создании Подужемского водохранилища (1971 г.). До начала

гидротехнического строительства он являлся основным постом наблюдений в нижнем течении реки, а его данные легли в основу справочных гидрологических изданий [12]. На основе многолетних рядов наблюдений (38 лет) рассчитаны среднемесячные расходы воды, обобщённые в таблице 1.6. Полученные значения характеризуют типовой гидрограф — устойчивую, повторяющуюся из года в год последовательность фаз водного режима.

Таблица 1.6 – Среднемесячные расходы воды р. Кемь в естественных условиях (типовой гидрограф)

Месяц	Среднемесячный расход (Q), м³/с	Доля годового стока, %	Характеристика фазы водного режима
Январь	145	4,7	Устойчивая зимняя межень
Февраль	121	3,9	Устойчивая зимняя межень
Март	98	3,2	Минимум годового стока
Апрель	129	4,2	Начало половодья
Май	492	16,0	Активная фаза половодья
Июнь	496	16,1	Максимум (регулирующее влияние озёр)
Июль	367	11,9	Спад половодья
Август	274	8,9	Летняя межень
Сентябрь	257	8,4	Осенний подъём (дождевые паводки)
Октябрь	267	8,7	Осенняя межень
Ноябрь	242	7,9	Предзимнее снижение стока
Декабрь	182	5,9	Устойчивая зимняя межень
Среднегодовой	256	100	—

Анализ таблицы 1.6 позволяет выделить три ключевые особенности естественного гидрографа стока реки Кемь.

1. Растянутое и смещённое весеннее половодье. В отличие от большинства равнинных рек, где пик половодья приходится на конец мая, максимум стока на Кеме наблюдается в июне (496 м³/с). На долю мая–июля приходится 44,0% годового стока. При общей продолжительности половодья около четырёх месяцев это свидетельствует о высокой аккумулирующей способности озёрной системы Куйто, которая постепенно отдаёт воду, накопленную во время снеготаяния.

2. Устойчивая и относительно высокая зимняя межень. С декабря по март расходы колеблются в пределах 98–182 м³/с. Суммарная доля этих четырёх месяцев составляет 17,7% годового стока. Даже в марте, когда фиксируется минимум (98 м³/с), расход снижается лишь в 2,6 раза по сравнению со среднегодовым (256 м³/с). Для сравнения: на реках Карелии без озёрного регулирования (например, на малых водотоках) зимняя межень может быть в 5–10 раз ниже среднегодового расхода. Такая устойчивость обеспечивается подземным питанием и постепенной водоотдачей из торфяных и озерно-ледниковых отложений.

3. Летне-осенние дождевые паводки. В сентябре–октябре наблюдается небольшой подъём стока (до 257–267 м³/с), связанный с выпадением обильных осенних дождей. Доля сентября и октября составляет 17,1% годового стока. Эти паводки, однако, значительно уступают по высоте весеннему половодью (максимум 496 м³/с против 267 м³/с в октябре) и не нарушают общей картины выровненного режима

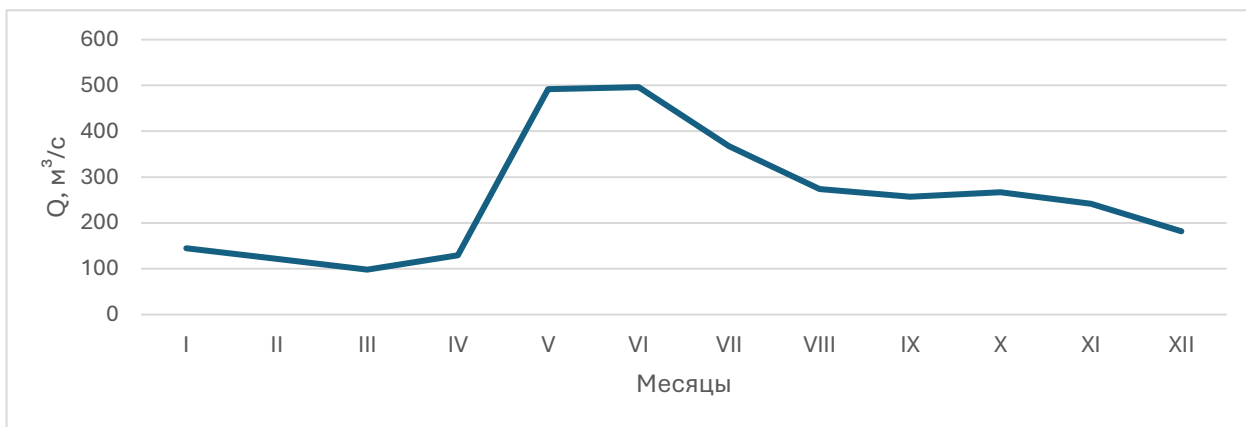


Рисунок 1.12 – Гидрограф реки Кемь в естественных условиях (до зарегулирования)

Графическая интерпретация типового гидрографа (рис. 1.12) подтверждает выводы, сделанные на основе таблицы. Кривая расходов имеет ярко выраженный подъём в мае–июне (с 98 $\text{м}^3/\text{с}$ в марте до 496 $\text{м}^3/\text{с}$ в июне), однако этот пик не является острым: высокие расходы сохраняются с мая по июль, а спад происходит постепенно. Отсутствие экстремально резкого паводочного пика и стабильно высокий (для северной реки) зимний уровень — две визуально очевидные черты, которые кардинально отличают Кемь от типичных равнинных рек без озёрного регулирования, где пик половодья может превышать зимнюю межень в десятки раз

Именно эта естественная зарегулированность стока — высокая зимняя межень, растянутое половодье и сглаженный гидрограф — создала идеальные предпосылки для гидроэнергетического освоения реки, позволив обеспечить устойчивую работу каскада ГЭС практически без сезонных перебоев.

1.3.5 Продольный профиль реки Кемь.

Продольный профиль реки Кемь отражает изменение её абсолютных отметок от истока (озеро Нижнее Куйто) до устья (Белое море). Для естественного, незарегулированного состояния (до 1967 г.) характерные отметки уров-

ней воды в ключевых створах определены по данным «Ресурсов поверхностных вод СССР» [12] и Государственного водного кадастра [4] и сведены в таблицу 1.7. Соответствующий продольный профиль показан на рисунке 1.13.

Таблица 1.7 — Продольный профиль реки Кемь (по характерным створам)

№	Створ	Расстояние от истока, км	Абсолютная отметка, м БС	Характеристика участка
1	Исток (оз. Нижнее Куйто)	0	101	Озёрный плёс, исток
2	Порог Кинтизьям	5	98	Падение 3,2 м на 100 м (уклон 32 ‰)
3	Порог Хеути	15	95	Падение 2,8 м на 100 м (уклон 28 ‰)
4	Створ Юшкозерской ГЭС (естеств.)	25	89	Плёс, створ будущей ГЭС
5	Порог Вочаж	60	70	Падение 4,5 м на 100 м (уклон 45 ‰), каскад
6	Створ Кривопорожской ГЭС (естеств.)	90	58	Плёс, створ будущей ГЭС
7	Порог Мальвика	115	46	Рассредоточенный порог
8	Створ Подужемской ГЭС (естеств.)	130	35	Нижнее течение, створ будущей ГЭС
9	Створ Путкинской ГЭС (естеств.)	165	25	Нижнее течение, створ будущей ГЭС
10	г. Кемь (устьевая часть)	185	1	Устьевая область (средний уровень)
11	Устье (Белое море)	191	0	Базис эрозии

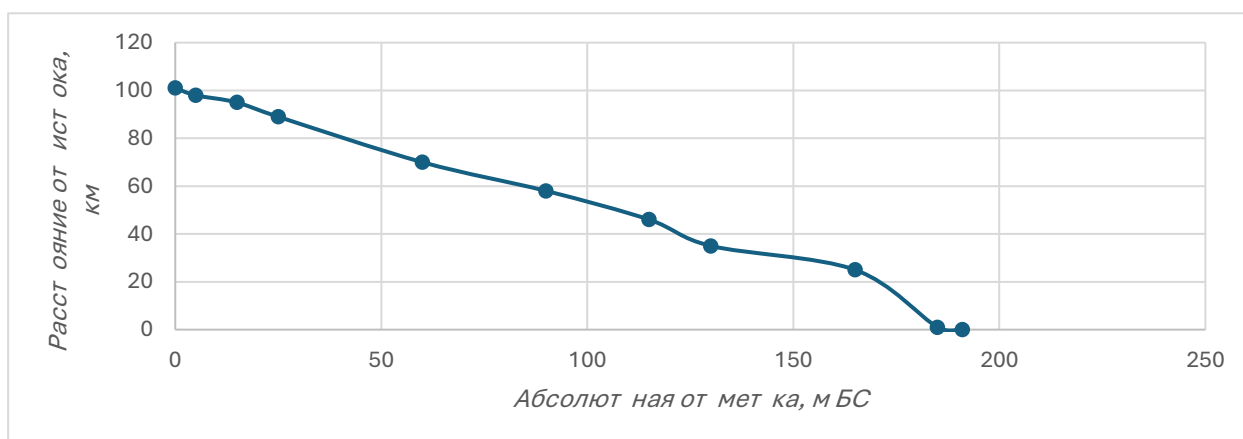


Рисунок 1.13 — Продольный профиль реки Кемь (до зарегулирования).

Анализ продольного профиля показывает, что он имеет чётко выраженный ступенчатый вид, обусловленный геологическим строением территории:

река прорезает кристаллические породы Балтийского щита (граниты, гнейсы, диабазы), устойчивые к размыву, вследствие чего пологие участки профиля (озёрные плёсы и спокойные плесы) чередуются с крутыми падениями на порогах. Наиболее значительные перепады приходятся на пороги в верхнем и среднем течении: на пороге Кинтизьям (5 км от истока) падение составляет 3,2 м на 100 м русла при уклоне 32 ‰, на пороге Хеути (15 км) — 2,8 м на 100 м (28 ‰), на самом мощном каскадном пороге Вочаж (60 км) падение достигает 4,5 м на 100 м (45 ‰), а на рассредоточенном пороге Мальвикия (115 км) — 1,5 м на 100 м (15 ‰). Уклоны на порогах сопоставимы с горными реками, что создаёт значительный гидроэнергетический потенциал. Между порогами расположены плёсовые участки с незначительными уклонами: от истока до порога Кинтизьям средний уклон составляет около 0,6 ‰, между порогами Хеути и Вочаж — около 0,5 ‰, ниже Кривопорожской ГЭС — около 0,4 ‰, а в нижнем течении (130–191 км) он снижается до 0,3 ‰, что объясняется приближением к базису эрозии — уровню Белого моря. Ступенчатый характер профиля имел ключевое значение для гидроэнергетического освоения: именно на участках сосредоточенных перепадов уровня были выбраны створы для строительства ГЭС Кемского каскада — Юшкозерская ГЭС в районе порога Хеути, Кривопорожская — в районе одноимённого порога, а Подужемская и Путкинская ГЭС — на участках с устойчивыми уклонами в нижнем течении. Таким образом, естественный продольный профиль реки Кемь, сформированный геологическим строением и тектоническими процессами, создал благоприятные условия для эффективного использования гидроэнергетического потенциала при создании каскада ГЭС. Таким образом, естественный продольный профиль реки Кемь, сформированный геологическим строением и тектоническими процессами, создал благоприятные условия для гидротехнического освоения: значительные сосредоточенные перепады уровня при общем относительно небольшом падении реки позволили эффективно использовать гидроэнергетический потенциал при создании каскада ГЭС.

1.3.6 Морфометрические характеристики реки Кемь

На основе анализа картографических и справочных материалов [2,12] получены основные количественные показатели реки Кемь (таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Морфометрические характеристики реки Кемь

Параметр	Значение	Пояснение / Источник
Длина реки	191 км	[Государственный водный реестр]
Площадь водосборного бассейна	27 700 км ²	Крупнейшая в бассейне Белого моря
Общее падение	101 м	От истока (оз. Нижнее Куйто, 101 м БС) до устья (0 м БС)
Средневзвешенный уклон	0,53 ‰	Рассчитан как отношение падения к длине (101 м / 191 км)
Ширина русла в среднем течении	100–150 м	Характерна для равнинных участков
Ширина русла в устье	более 200 м	Расширение перед впадением в море
Глубина на плёсовых участках	2–5 м	Достаточна для прохождения маломерных судов
Глубина на порогах	0,5–1,5 м	Препятствует судоходству
Скорость течения на плесах	0,4–0,6 м/с	Типично равнинная скорость
Скорость течения на порогах	1,5–3,0 м/с	Увеличение в 3–5 раз по сравнению с плесами
Густота речной сети	0,49 км/км ²	Близка к среднекарельскому показателю (0,53 км/км ²)
Озёрность бассейна	10–12 %	Значительно выше средней по России (1–2 %) и выше среднекарельской (8–10 %)
Заболоченность бассейна	до 30 %	Ключевой фактор естественной зарегулированности стока

Анализ таблицы 1.8. Длина реки (191 км) и площадь водосборного бассейна (27 700 км²) ставят Кемь в число крупнейших рек не только Карелии, но и всего бассейна Белого моря. По площади водосбора Кемь является крупнейшей в бассейне Белого моря. Общее падение реки (101 м) при средней длине даёт средневзвешенный уклон 0,53 ‰. Это значение является промежуточным между типично равнинными реками (уклон менее 0,2 ‰, например, Нева — 0,06 ‰) и полугорными реками (уклон более 1 ‰). Благодаря такому уклону река сохраняет достаточную энергию потока для транспорта наносов, но при этом не является бурной на всём протяжении.

Ширина русла изменяется от 100–150 м в среднем течении до более 200 м в устье, где река разделяется на два протока — Правую и Кемляс. Глубины на плёсовых участках (2–5 м) достаточны для прохождения маломерных судов, однако на порогах глубины уменьшаются до 0,5–1,5 м, что делает эти участки труднопроходимыми. Скорость течения на плесах (0,4–0,6 м/с) типична для равнинных рек, а на порогах (1,5–3,0 м/с) возрастает в 3–5 раз, что создаёт условия для эффективной работы гидротурбин.

Густота речной сети (0,49 км/км²) свидетельствует о хорошей дренированности территории и близка к среднекарельскому показателю (0,53 км/км²). Высокая густота объясняется близким залеганием кристаллического фундамента к поверхности и наличием многочисленных трещин и разломов, по которым проложены русла малых рек и ручьёв.

Озёрность бассейна (10–12 %) и заболоченность (до 30 %) являются ключевыми факторами, определяющими естественную зарегулированность стока. По степени естественной зарегулированности бассейн Кемь значительно превосходит большинство рек Европейской территории России (озёрность Волги — около 1 %, заболоченность — около 5 %). Именно эти свойства — способность аккумулировать влагу в многоводные периоды и постепенно отдавать её в межень — создали благоприятные предпосылки для гидроэнергетического освоения реки.

1.3.7 Пороги реки Кемь.

Характерной особенностью реки Кемь является её порожистость, что напрямую связано с геологическим строением территории. Река прорезает кристаллические породы Балтийского щита (граниты, гнейсы, диабазы), которые отличаются высокой устойчивостью к размыву. В местах пересечения рекой тектонических трещин и зон разломов, где коренные породы выходят на поверхность или залегают на небольшой глубине, сформировались пороги — участки с резким увеличением уклона и скорости течения [12].

На реке Кемь насчитывается более 20 крупных порогов и перекатов, не считая множества мелких. Наиболее значимые из них представлены в таблице 1.9. Эти пороги создают сосредоточенные перепады уровней (от 1,5 до 4,5 м на каждом пороге), что в сочетании с устойчивым водным режимом предопределило высокую гидроэнергетическую ценность реки и возможность создания на ней каскада ГЭС [11, 12].

Таблица 1.9 - Основные пороги реки Кемь (до зарегулирования)

Название порога	Расстояние от истока, км	Падение, м	Уклон, ‰	Характер порога
Кинтизьям	5	3,2	32	Порог-слив
Хеути	15	2,8	28	Рассредоточенный порог
Вочаж	60	4,5	45	Каскадный порог (водопад)
Мальвикия	115	1,5	15	Рассредоточенный порог
Путка	165	3,0	30	Порог-слив

Наиболее значительные перепады приходятся на пороги в верхнем и среднем течении: Порог Кинтизьям (5 км от истока): падение 3,2 м на 100 м русла (уклон 32 ‰), расположен там, где река только начинает набирать силу после выхода из озера Нижнее Куйто; Порог Хеути (15 км от истока): падение 2,8 м на 100 м русла (уклон 28 ‰), находится в районе современного расположения Юшкозерской ГЭС; Порог Вочаж (60 км от истока): падение 4,5 м на 100 м русла (уклон 45 ‰) — самый мощный порог, представляет собой каскад из нескольких последовательных ступеней падения, что создаёт особенно благоприятные условия для выработки электроэнергии [11].

В нижнем течении пороги менее мощные, но также играют важную роль в формировании гидрологического режима: Порог Мальвикия (115 км от истока): падение 1,5 м на 100 м русла (уклон 15 ‰), рассредоточенный порог, расположенный между Кривопорожской и Подужемской ГЭС; Порог

Путка (165 км от истока): падение 3,0 м на 100 м русла (уклон 30 ‰), расположен в 26 км от устья, что позволило построить здесь Путкинскую ГЭС — первую гидроэлектростанцию Кемского каскада.

Создание каскада водохранилищ привело к затоплению части порогов, особенно в верхнем течении, где уровни воды были подняты наиболее значительно (на 9–10 м). К затопленным или частично затопленным относятся пороги Кинтизьям и Хеути, которые сейчас находятся в зоне подпора Юшкозерского водохранилища. Однако наиболее мощные пороги — Вочаж и Путка — сохранились, так как створы ГЭС были выбраны выше или ниже их. В настоящее время они остаются важными гидрологическими объектами, влияющими на распределение скоростей течения и условия обитания гидробионтов [11].

Именно порожищность реки Кемь в сочетании с её устойчивым водным режимом (высокая естественная зарегулированность) создала уникальные предпосылки для гидроэнергетического освоения. Сосредоточенные перепады уровней на порогах позволили создать каскад ГЭС с суммарным напором около 75 м при относительно небольшой длине реки (191 км). Это один из самых эффективных примеров использования гидроэнергетического потенциала в условиях Карелии.

1.4 Почвенно-растительный покров и его влияние на водность

Почвенно-растительный покров является одним из ключевых факторов формирования водного режима реки Кемь, поскольку он определяет пути поступления атмосферных осадков в речную сеть, интенсивность испарения и аккумуляцию влаги на водосборе. Бассейн реки Кемь расположен в пределах северотаёжной подзоны, для которой характерны специфические сочетания почв и растительных сообществ, адаптированных к условиям избыточного увлажнения, низких температур и короткого вегетационного периода [2, 3].

1.4.1 Почвенный покров.

Почвообразование на территории бассейна протекает на кристаллических породах Балтийского щита, перекрытых чехлом четвертичных отложений различного генезиса и мощности. Преобладающими почвообразующими породами здесь являются моренные отложения (пески, супеси, суглинки с включением валунов), занимающие около 60–70% территории, флювиогляциальные песчано-галечные отложения, приуроченные к озовым грядам, озерно-ледниковые ленточные глины и суглинки в понижениях рельефа, а также биогенные торфяные отложения, мощность которых варьирует от 0,5 до 5–8 м, достигая в отдельных массивах 10–12 м [12]

В пределах бассейна р. Кемь выделяются две почвенные подзоны, граница между которыми проходит около 63° с.ш. Северная часть характеризуется маломощным почвенным профилем (30–45 см), преобладанием подзолов иллювиально-железисто-гумусовых и иллювиально-гумусовых и широким распространением поверхностного оглеения. Южная часть отличается большей мощностью профиля (60–85 см), наличием дерново-подзолистых почв с выраженным перегнойно-аккумулятивным горизонтом мощностью 5–10 см [2, 3]. Почвы бассейна р. Кемь характеризуются преимущественно кислой и сильнокислой реакцией среды, что типично для таёжных ландшафтов. Согласно исследованиям, проведённым на территории Карелии [7], значения pH органогенных горизонтов варьируют от 3–4 до 6. В подзоне северной тайги, к которой относится бассейн р. Кемь, почвы под таежными лесами имеют преимущественно кислую реакцию. По результатам многолетних наблюдений [10], кислотность почв Карелии варьирует в зависимости от типа растительности и почвообразующих пород. На сельскохозяйственных землях Карелии, где проводилось известкование, средневзвешенный показатель pH почвы составляет 5,2, что соответствует слабокислой реакции [6].

Разнообразие почвенного покрова бассейна отражено в таблице 1.10. На дренированных возвышенных участках с моренными холмами и грядами сформировались подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые – маломощные, кислые почвы с чётко выраженным элювиальным горизонтом. Именно эти почвы обеспечивают быструю фильтрацию талых и дождевых вод, способствуя формированию внутрипочвенного и грунтового стока. На слабодренированных равнинах и в межхолмных понижениях распространены подзолы торфянисто- и торфяно-глеевые – переувлажнённые почвы с признаками оглеения, которые замедляют инфильтрацию и способствуют накоплению влаги в верхних горизонтах, что приводит к развитию процессов заболачивания.

Наибольшей гидрологической значимостью обладают болотные торфяные и торфяно-глеевые почвы, занимающие замкнутые котловины, днища долин и плоские слабодренированные водоразделы. Мощность торфяной залежи здесь варьирует от 0,5 до 8 м (достигая в отдельных массивах 12 м), а реакция среды — сильноокислая. Эти почвы выполняют функцию природных аккумуляторов влаги: в многоводные периоды они накапливают избыточную воду, снижая пики половодий, а в межень период постепенно отдают накопленную влагу, поддерживая базисный сток реки. На поймах рек и ручьёв сформировались аллювиальные дерновые почвы с хорошо развитым гумусовым горизонтом (до 15–20 см) и более благоприятной реакцией среды (рН 5,0–6,0), которые обеспечивают связь реки с пойменными экосистемами. В устьевой части р. Кемь, на побережье Белого моря, распространены маршевые почвы, формирующиеся на морских глинах и суглинках; они имеют высокое содержание органического вещества (10–15%), нейтральную или слабощелочную реакцию (рН 5,5–7,0) и отличаются засоленностью, что обусловлено влиянием приливно-отливных процессов.

Таблица 1.10 - Основные типы почв бассейна реки Кемь

Тип почвы	Условия залегания	Характеристика	Гидрологическая роль
Подзолы иллювиально-железистые и иллювиально-гумусовые	Дренированные возвышенные участки, моренные холмы и гряды	Маломощные (30–45 см), кислые (рН 3,5–4,5), с чётко выраженным элювиальным горизонтом	Обеспечивают быструю фильтрацию талых и дождевых вод, способствуют формированию внутрипочвенного и грунтового стока
Подзолы торфянисто- и торфяно-глеевые	Слабодренированные равнины, межхолмные понижения	Переувлажнены, с признаками оглеения, часто сочетаются с торфяными отложениями	Замедляют инфильтрацию, способствуют накоплению влаги в верхних горизонтах и развитию процессов заболачивания
Болотные торфяные и торфяно-глеевые	Замкнутые котловины, днища долин, плоские слабодренированные водоразделы	Мощность торфяной залежи 0,5–8 м (до 12 м), сильнокислые	Выполняют функцию природных аккумуляторов влаги, регулируют питание рек в межень, снижают пики половодий
Аллювиальные (пойменные) дерновые	Поймы рек и ручьёв	Хорошо развитый гумусовый горизонт (до 15–20 см), рН 5,0–6,0	Участвуют в формировании руслового стока, обеспечивают связь реки с пойменными экосистемами
Маршевые	Побережье Белого моря, устьевая часть р. Кемь	Формируются на морских глинах и суглинках, содержание органического вещества 10–15%, рН 5,5–7,0, засолены	Влияют на гидрохимический режим устьевой области

1.4.2 Растительный покров.

Растительность бассейна р. Кемь относится к северотаёжной подзоне, где господствуют хвойные леса с преобладанием сосны обыкновенной и ели обыкновенной. Сосновые леса занимают преимущественно дренированные участки с песчаными и каменистыми почвами — моренные холмы, озовые гряды, флювиогляциальные равнины. Еловые леса тяготеют к более увлажнённым местообитаниям с суглинистыми и глинистыми почвами — понижениям рельефа, долинам рек и ручьёв, а также северным и восточным склонам возвышенностей [2]. Для бассейна р. Кемь характерны спелые и перестойные

леса со средним возрастом древостоев 120–160 лет на большей части минеральных земель. В сосняках скальных обычны 2–3 и более поколений деревьев с амплитудой возраста от 80 до 300 и более лет. Ельники отличаются широким спектром возраста отдельных деревьев [3].

Разнообразие растительных сообществ бассейна отражено в таблице 1.11. На вершинах и верхних частях склонов моренных холмов, а также на озовых грядах и песчаных флювиогляциальных равнинах распространены сосняки лишайниковые и зеленомошные. Под их пологом формируется минимальная задержка атмосферных осадков, высокая инфильтрационная способность подстилающих пород, что способствует формированию преимущественно подземного питания рек. На средних и нижних частях склонов холмов с хорошо дренированными супесчаными и суглинистыми почвами произрастают сосняки брусничные и черничные свежие, которые обеспечивают оптимальное сочетание снегонакопления и инфильтрации, обладая высокой водоохранной ролью.

На плоских слабодренированных водоразделах, по окраинам болот и в межхолмных понижениях сформировались сосняки сфагновые и кустарничково-сфагновые с угнетёнными формами сосны. Эти сообщества характеризуются высокой влагоёмкостью, замедлением поверхностного стока и аккумуляцией влаги в торфяном горизонте. В долинах рек и ручьёв, на хорошо дренированных участках с суглинистыми почвами господствуют ельники черничные и зеленомошные, которые играют важную роль в снегонакоплении, обеспечивают растянутое снеготаяние и формирование устойчивого грунтового питания. В ложбинах стока, по днищам ручьёв и в узких долинах распространены ельники приручьевые, логовые, травяно-сфагновые, регулирующие сток малых водотоков и участвующие в питании рек в межень.

Таблица 1.11 – Основные типы растительности бассейна реки Кемь

Тип растительности	Условия произрастания	Доминирующие виды	Гидрологическая роль
Сосняки лишайниково-зеленомошные	Вершины и верхние части склонов моренных холмов, озовые гряды, песчаные флювиогляциальные равнины	Сосна обыкновенная, в подлеске – можжевельник, в напочвенном покрове – кладония, плеуроциум, брусника	Минимальная задержка осадков, высокая инфильтрация, формирование преимущественно подземного питания рек
Сосняки сфагновые и кустарничково-сфагновые	Плоские слабодренированные водоразделы, окраины болот, межхолмные понижения	Сосна (угнетенная), багульник, кассандра, сфагновые мхи	Высокая влагоемкость, замедление стока, аккумуляция влаги в торфяном горизонте
Ельники черничные и зеленомошные	Средние и нижние части склонов, долины рек и ручьев, хорошо дренированные участки с суглинистыми почвами	Ель обыкновенная, в подлеске – рябина, крушина, в напочвенном покрове – черника, кислица, зеленые мхи	Снегонакопление, растянутое снеготаяние, высокая транспирация, формирование устойчивого грунтового питания
Болота верховые (олиготрофные)	Плоские водоразделы с песчаным подстилами	Сосна (редко), багульник, пушица, сфагновые мхи	Основные природные аккумуляторы влаги, регулирование межженного стока, снижение пиков половодий
Болота низинные (эвтрофные) и переходные (мезотрофные)	Днища озерных котловин, поймы рек, межхолмные понижения с богатым минеральным питанием	Береза пушистая, ивы, осоки, гипновые мхи, сфагновые мхи (на переходных)	Аккумуляция влаги, участие в подземном питании рек, особенно в засушливые периоды

Важной особенностью бассейна является значительная заболоченность территории. Болота и заболоченные земли занимают до 30 % площади водосбора, а в отдельных районах (например, в низовьях Кеми, в пределах Прибеломорской низменности) этот показатель достигает 40–50 %. Болотные массивы, особенно верховые, играют ключевую роль в формировании гидрологи-

ческого режима реки [3]. В периоды снеготаяния и выпадения обильных осадков они аккумулируют избыточную влагу, снижая пики половодий и предотвращая катастрофические наводнения. В меженный период, особенно в летне-осеннюю межень, болота постепенно отдают накопленную влагу, поддерживая базисный сток реки. Роль болот в питании рек Карелии в летнюю межень может достигать 25–35 %. На реках с высокой заболоченностью водосбора (более 20 %) коэффициент естественной зарегулированности стока в 1,5–2 раза выше, чем на реках с малой заболоченностью [12].

1.4.3 Влияние почвенно-растительных условий на водность притоков.

Для количественной оценки влияния почвенно-растительных условий на водность притоков р. Кемь были проанализированы данные по водосборам основных притоков (таблица 1.12). Модуль стока (л/с·км²) для каждого притока рассчитан как отношение среднегодового расхода воды (Q, м³/с) к площади водосбора (F, км²): $M = (Q \times 1000) / F$.

Таблица 1.12 – Влияние почвенно-растительных условий на водность притоков р. Кемь

Приток	Площадь водосбора, км ²	Заболоченность, %	Лесистость, %	Среднегодовой расход (Q), м ³ /с	Модуль стока (M), л/с·км ²	Особенности режима
Чирка-Кемь	8 270	12	85	81	9,8	Устойчивый сток, растянутое половодье (влияние озёр и лесов)
Кепа	1 640	18	80	16	9,8	Высокая доля болотного питания, устойчивая межень
Шомба	1 090	28	75	9,7	8,9	Сильно заболочен, сток растянут, пики половодий сглажены

Понь- гома	1 220	32	70	11,8	9,7	Преобладание бо- лотного питания, низкая интенсив- ность паводков
---------------	-------	----	----	------	-----	--

Анализ данных таблицы 1.12 позволяет проследить влияние заболоченности водосбора на величину модуля стока. Наименее заболоченные притоки — Чирка-Кемь (12 %) и Кепа (18 %) — имеют наибольший модуль стока (9,8 л/с·км²). Наиболее заболоченный приток — Шомба (28 %) — демонстрирует наименьший модуль стока (8,9 л/с·км²). Это объясняется тем, что болотные массивы аккумулируют значительную часть атмосферных осадков, увеличивая потери на испарение (до 25–35 % от суммы осадков на болотах) и замедляя водоотдачу в речную сеть. Вместе с тем высокая заболоченность обеспечивает более устойчивый сток в течение года, что подтверждается особенностями режима, отмеченными в таблице 1.12. Для Поньгомы, несмотря на максимальную заболоченность (32 %), модуль стока возрастает до 9,7 л/с·км². Это свидетельствует о влиянии других факторов — прежде всего, различной степени озёрности водосборов и особенностей геологического строения.

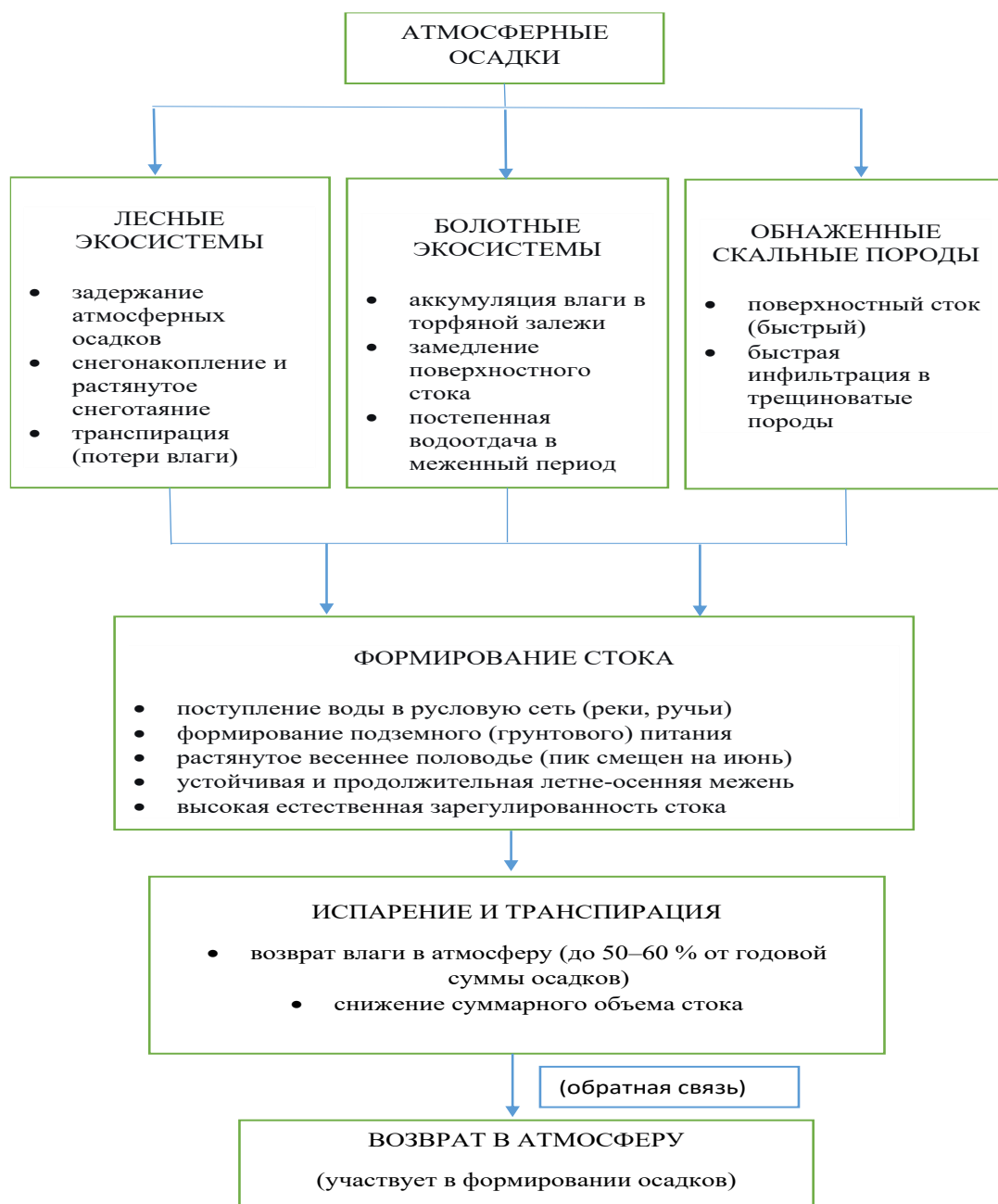


Рисунок 1.14 – Схема влияния почвенно-растительного покрова на формирование стока р. Кемь.

На рисунке 1.14 показано совокупное влияние почвенно-растительного покрова на гидрологический режим и иллюстрирует основные пути движения влаги от момента выпадения атмосферных осадков до поступления в русловую сеть. Показано, как лесные, болотные и скальные ландшафты по-разному распределяют поступающую влагу: леса задерживают и транспирируют, болота аккумулируют и замедляют сток, а на скальных выходах формируется быстрый поверхностный сток. Вся система замыкается возвратом испарившейся влаги в атмосферу.

Воздействие почв и растительности на гидрологический режим реки Кемь проявляется через несколько ключевых механизмов. 1. Перераспределение осадков. Хвойные леса, особенно ельники, задерживают до 30–50% зимних осадков в кронах, что способствует более растянутому снеготаянию и снижению интенсивности весеннего половодья. Летом лесной полог перехватывает до 15–25% дождевых осадков, часть которых испаряется, не достигая почвы [2, 3]. 2. Формирование внутрипочвенного и грунтового стока. На дренированных участках с песчаными подзолистыми почвами, занятых сосняками, происходит быстрая фильтрация талых и дождевых вод. Эти воды пополняют запасы грунтовых вод, которые впоследствии питают реку в течение всего года. На участках с глинистыми и торфяными почвами, напротив, преобладает поверхностный сток или сток по верхним горизонтам почвы, что создаёт условия для заболачивания [12]. 3. Аккумуляция влаги болотами. Болотные массивы выступают в роли природных водохранилищ. В многолетнем разрезе они накапливают влагу в многоводные периоды и отдают её в маловодные, сглаживая экстремальные значения стока. По данным натурных наблюдений, на реках с высокой заболоченностью водосбора (более 20%) коэффициент естественной зарегулированности стока в 1,5–2 раза выше, чем на реках с малой заболоченностью. Это прослеживается при сопоставлении картографических материалов [2, 3], которые наглядно демонстрируют обширные площади болот в центральной и южной частях бассейна. 4. Транспирация и испарение. Лесная растительность является активным потребителем влаги. Суммарное испарение (включая транспирацию) на лесных водосборах Карелии составляет, по разным оценкам, от 300 до 400 мм/год [12]. Вывод, что значительная часть выпадающих осадков возвращается в атмосферу, не достигая речной сети. Однако именно благодаря этому процессу формируется умеренный и устойчивый режим увлажнения территории.

Таким образом, почвенно-растительный покров бассейна реки Кемь выполняет сложную гидрологическую функцию. С одной стороны, леса и болота

выступают как мощные природные регуляторы стока: они аккумулируют влагу, растягивают половодье, поддерживают меженный уровень воды. С другой стороны, значительная часть выпадающих осадков (более 50%) расходуется на испарение и транспирацию, что снижает суммарный объём стока. Именно это сочетание – высокая влагоёмкость почв и растительности, значительная заболоченность и лесистость – способствует созданию уникальных условий естественной зарегулированности реки Кемь, что впоследствии определило успешность её гидроэнергетического освоения.

2. КЕМСКИЙ КАСКАД ГЭС: СОСТАВ ГИДРОУЗЛОВ И ХАРАКТЕРИСТИКА ВОДОХРАНИЛИЩ.

2.1. Этапы гидротехнического освоения. Состав и основные параметры ГЭС

Первым этапом для гидротехнического освоения бассейна реки Кемь можно считать зарождение идеи (1912–1961 гг.) использования гидроэнергетического потенциала реки Кемь, которая возникла задолго до начала строительства первых гидроэлектростанций. Ещё в 1912 году Управление водных путей и сообщений России начало первые изыскательские работы по оценке возможности строительства ГЭС на Кеми. Однако начавшиеся военные действия и последующие революционные события прервали эти исследования на долгие годы [11]. Возвращение к проекту произошло только в конце 1950-х годов, когда Карелия остро нуждалась в дешёвой электроэнергии для развития промышленности. В 1961 году Карельский совнархоз принял постановление «Об утверждении проектного задания и сметно-финансовых расчётов Путкинской ГЭС». Этот год официально считается годом основания Кемского каскада ГЭС [27].

Второй этап связан с пионерным строительством (1962–1971 гг.) первой ГЭС каскада – Путкинской, силами гидростроителей, ранее возводивших каскад Выгских ГЭС. 19 марта 1967 года станция была принята в промышленную

эксплуатацию, а уже 25 марта пущен первый гидроагрегат Путкинской ГЭС [27]. В 1968 году, началось строительство Подужемской ГЭС. Оба гидроагрегата Подужемской ГЭС были пущены в декабре 1971 года: 21 декабря — гидроагрегат № 1, и 29 декабря — гидроагрегат № 2 [25,27]. Станция была спроектирована институтом «Ленгидропроект» и построена с учётом необходимости сохранения естественных гидрологических условий Вочажского мыса, для чего берег был укреплён скальной отсыпкой [25].

Третий этап связан с созданием регулирующей ступени (1971–1980 гг.): подготовительные работы на строительстве Юшкозерской ГЭС начались в 1971 году, земляные работы на основных сооружениях стартовали в июне 1972 года. Гидроагрегат № 1 был введён в эксплуатацию 17 марта 1980 года, гидроагрегат № 2 — 24 августа 1980 года [27]. Юшкозерская ГЭС стала важнейшим элементом каскада, так как именно она осуществляет сезонное регулирование стока, аккумулируя воду в многоводные периоды и обеспечивая работу нижележащих ГЭС в межень [11].

Четвёртый этап — строительство самой мощной Кривопорожской ГЭС (1974–1991 гг.), подготовительные работы по возведению которой начались в 1974 году. Первый гидроагрегат был пущен 30 июня 1990 года, а последний — 27 сентября 1991 года. Кривопорожская ГЭС является крупнейшей в Кемском каскаде — её мощность превышает мощность всех остальных действующих станций каскада вместе взятых [27]. ГЭС обеспечивает энергоснабжение Костомукшского горно-обогатительного комбината.

Пятый этап – завершающий (2013–2024 гг.). В 2013 году Кемский каскад ГЭС вошёл в состав ПАО «ТГК-1», объединив все действующие станции под единым управлением. В 2023 и 2024 годах состоялся пуск Белопорожских ГЭС-1 и ГЭС-2. Их строительство велось с перерывами с 1990-х годов и было окончательно завершено в 2024 году, что ознаменовало 100-процентное использование гидроэнергетического потенциала реки Кемь.

Белопорожская ГЭС является самой молодой ступенью каскада, поэтому некоторые официальные морфометрические сведения в открытых источниках пока не опубликованы. В связи с отсутствием утверждённых данных, в ряде таблиц, а также в соответствующих расчётах Белопорожское водохранилище не рассматривается, либо рассматривается на основе проектных оценок.

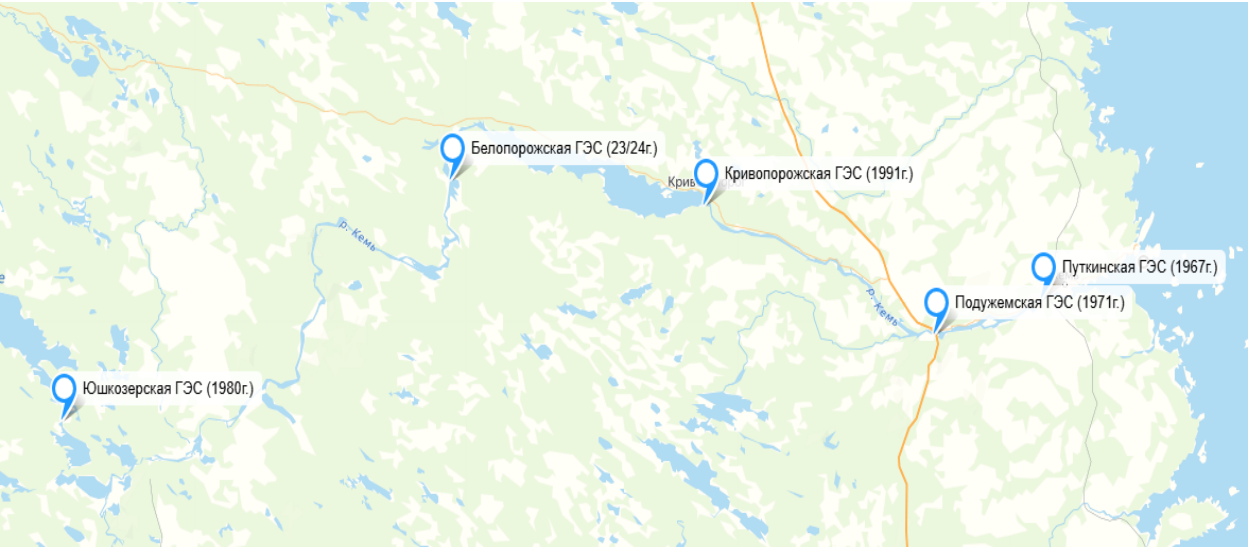


Рисунок 2.1. - Карта бассейна реки Кемь с расположением ГЭС Кемского каскада .

2.1.1 Состав и основные параметры ГЭС.

Кемский каскад в настоящее время включает шесть действующих гидроэлектростанций (таблица 2.1). Суммарная установленная мощность каскада составляет 378 МВт, среднегодовая выработка электроэнергии — около 1,3 млрд кВт·ч [27].

Таблица 2.1 - Основные параметры ГЭС Кемского каскада
Период: по годам ввода ГЭС (1967–2024 гг.).

Название ГЭС	Год ввода	Установленная мощность, МВт	Тип ГЭС	Расчетный напор, м	Количество гидроагрегатов
Путкинская	1967	84	деривационная	20,1	3
Подужемская	1971	48	русовая	10,7	2
Юшкoзерская	1980	18	русовая	8,5	2
Кривопорожская	1991	180	плотинная	26,0	4
Белопорожская-1	2023	24	русовая	12,0	2

Белопорожская-2	2024	24	русловая	12,0	2
Сумм. мощность		378			15

Для наглядного представления о вкладе каждой гидроэлектростанции в общую мощность каскада построена круговая диаграмма (рисунок 2.2). Как видно из рисунка, доминирующее положение занимает Кривопорожская ГЭС, на долю которой приходится около 48 % суммарной установленной мощности каскада (180 МВт из 378 МВт). Это объясняется тем, что Кривопорожская ГЭС работает в пиковом режиме, покрывая нагрузки в энергосистеме. Второй по значимости является Путкинская ГЭС (84 МВт, около 22 %). Примерно одинаковую долю (по 12–13 %) вносят Белопорожские ГЭС (48 МВт) и Подужемская ГЭС (48 МВт). Наименьший вклад — у Юшкозерской ГЭС (18 МВт, около 5 %), которая, тем не менее, выполняет ключевую роль регулятора стока для всего каскада [11, 27].

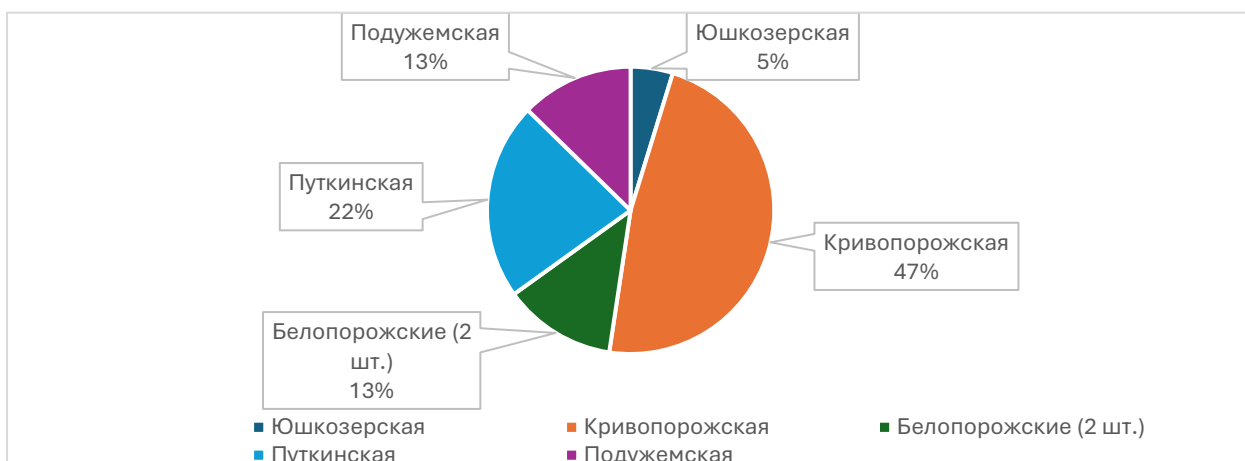


Рисунок 2.2 – Распределение установленной мощности между ГЭС Кемского каскада

2.2. Детальная характеристика водохранилищ Кемских ГЭС и их морфометрия.

Создание каскада гидроэлектростанций на реке Кемь привело к формированию цепочки водохранилищ, каждое из которых имеет свои уникальные морфометрические характеристики. В таблице 2.2 приведены основные параметры водохранилищ Кемского каскада. [5, 11, 27].

Таблица 2.2 – Морфометрические характеристики водохранилищ Кемского каскада

Водохранилище	Год заполнения	Площадь зеркала при НПУ, км ²	Полный объём, млн м ³	Полезный объём, млн м ³	Длина, км	Наибольшая ширина, км	Средняя глубина, м	Наибольшая глубина, м
Юшкозерское	1980	95,0	870	210	45	8,0	9,2	25
Кривопорожское	1991	104,8	590	180	60	4,5	5,6	35
Путкинское	1967	12,5	60	3,2	25	1,2	4,8	20
Подужемское	1971	12,0	23,8	11,0	8	1,0	4,2	15
Белопорожское (проект)	2023–2024	15	68	—	—	—	—	—

За пределами таблицы 2.2 отметим некоторые особенности морфометрии:

Юшкозерское водохранилище является самым крупным по объёму (870 млн м³) и вторым по площади зеркала (95 км²) после Кривопорожского. Оно образовано путём подпора озёр Верхнее, Среднее и Нижнее Куйто, которые и до строительства ГЭС представляли собой единую озерную систему. Особенность этого водохранилища — значительная изрезанность береговой линии, наличие многочисленных заливов и островов. Благодаря большим глубинам (средняя 9,2 м, максимальная 25 м) и значительному объёму, Юшкозерское водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока [11].

Кривопорожское водохранилище имеет наибольшую площадь зеркала (104,8 км²) и наибольшую длину (60 км). Несмотря на большую площадь, его полный объём (590 млн м³) уступает Юшкозерскому из-за меньших глубин (средняя 5,6 м, максимальная 35 м). Характерной чертой является вытянутая форма и наличие узких участков, где ширина не превышает 1–1,5 км. В широких местах ширина достигает 4,5 км.

Путкинское и Подужемское водохранилища относятся к категории малых водохранилищ [11]. Путкинское водохранилище имеет площадь 12,5 км² и полный объём 60 млн м³, из которых полезный объём составляет 3,2 млн м³. Подужемское водохранилище имеет площадь 12,0 км² и полный объём 23,8 млн м³, из которых полезный объём составляет 11,0 млн м³. Благодаря небольшому полезному объёму Путкинское водохранилище работает в режиме, близком к транзитному, с минимальной аккумуляцией. Подужемское водохранилище, несмотря на отнесение к категории суточного регулирования, имеет заметный полезный объём (11,0 млн м³), который позволяет осуществлять перераспределение стока в пределах суток

Белопорожское водохранилище (проект) по предварительным оценкам займёт промежуточное положение: его площадь составит около 15 км², а полный объём — около 68 млн м³ [27].

2.2.1 Уровенный режим водохранилищ.

Каждое водохранилище характеризуется определенными отметками уровней воды, установленными правилами эксплуатации. Контрольные точки наблюдения за уровнями расположены в створах гидроузлов каждой ГЭС [11].

Таблица 2.3 – Уровенный режим водохранилищ Кемского каскада

Водохранилище	НПУ, м БС	УМО, м БС	ФПУ, м БС	Амплитуда колебаний, м
Юшкозерское	112,0	107,0	113,5	5,0
Кривопорожское	84,5	74,5	86,0	10,0
Белопорожское 1,2	83,0	79,0	—	4,0
Путкинское	53,0	51,5	54,0	1,5
Подужемское	36,5	35,0	37,5	1,5

Примечание: НПУ — нормальный подпорный уровень; УМО — уровень мёртвого объёма; ФПУ — форсированный подпорный уровень [11].

Анализ таблицы 2.3 позволяет выявить две важные закономерности.

Во-первых, отметки НПУ водохранилищ последовательно снижаются от верхней ступени каскада к нижней: от 112,0 м БС (Юшкозерское) до 36,5 м БС (Подужемское). Это ступенчатое снижение обеспечивает суммарный напор каскада около 75 м, что является основой для эффективного использования гидроэнергетического потенциала реки Кемь. Перепад высот между соседними водохранилищами составляет: Юшкозерское – Кривопорожское около 27,5 м, Кривопорожское – Белопорожское около 1,5 м, Белопорожское – Путкинское около 30 м, Путкинское – Подужемское около 16,5 м. Наибольший перепад (около 30 м) приходится на участок между Белопорожским и Путкинским водохранилищами, где расположена одна из ключевых ступеней каскада.

Во-вторых, амплитуда колебаний уровня (разность между НПУ и УМО) отражает режим работы каждой ГЭС. Наибольшая амплитуда (10 м) характерна для Кривопорожского водохранилища, что связано с его работой в пиковом режиме — станция покрывает пики нагрузки в энергосистеме, что требует частых сработок и наполнений. Юшкозерское водохранилище имеет амплитуду 5 м, что обусловлено его функцией многолетнего регулятора стока. Малые водохранилища (Путкинское и Подужемское) работают в транзитном режиме с минимальными колебаниями уровня (1,5 м), практически не аккумулируя воду, а пропуская поступающий с вышележащих ступеней сток [11].

Белопорожское водохранилище по величине амплитуды (4,0 м) занимает промежуточное положение между Юшкозерским и транзитными водохранилищами, что соответствует его роли в каскаде как дополнительной регулирующей ступени.

2.3. Водный баланс и уровенный режим водохранилищ (с оценкой испарения и ледовой аккумуляции)

2.3.1 Притоки реки Кемь и их вклад в водный баланс.

Водный баланс водохранилищ Кемского каскада формируется за счёт стока самой реки Кемь, её крупных и малых притоков, а также боковой приточности с частных водосборов между гидроузлами. Для оценки вклада каждого притока в водный баланс необходимо знать не только их общие гидрологические характеристики, но и то, к какому именно водохранилищу они относятся. Ниже приведена детальная характеристика притоков, впадающих в каждое водохранилище каскада (табл. 2.4.).

Под «собственным водосбором водохранилища» понимается площадь водосбора, расположенная между створом вышележащей ГЭС (или истоком реки) и створом данной ГЭС, исключая площадь, аккумулированную в вышележащих водохранилищах. Доля притока от собственного водосбора в приходной части баланса каждого водохранилища не является постоянной величиной и зависит от водности года, режима сработки вышележащих водохранилищ и гидрологических особенностей каждого притока. Для Юшкозерского водохранилища доля собственного притока (включая р. Чирка-Кемь) составляет около 85–90 % от общего прихода, для Кривопорожского — около 10 %, для Подужемского — около 2 %, для Путкинского — около 1 % [11].

Таблица 2.4 - Крупные притоки водохранилищ Кемского каскада (длина > 50 км)

Водохранилище	Крупные притоки	Площадь собственного водосбора водохранилища, км ²
Юшкозерское	р. Кемь (от истока из оз. Нижнее Куйто), р. Чирка-Кемь (правый), р. Кепа (левый), р. Варайоки (левый), р. Иляюпяуж (левый), р. Алаюпяуж (левый)	15 500

Кривопорожское	р. Кемь (выше створа), р. Чирка-Кемь (сток трансформирован через Юшкозерское водохранилище), руч. Вике́й (правый), руч. Ветонручей (правый)	3 800
Белопорожское	р. Кемь (выше створа), руч. Верхняя Пашкаоя (левый), руч. Средняя Пашкаоя (левый), руч. Нуояиоя (левый)	—
Подужемское	р. Кемь (выше створа), р. Охта (Нижняя Охта) (правый), р. Шомба (левый), р. Авнерека (правый), руч. Лесной (Погашомба) (левый)	1 950
Путкинское	р. Кемь (выше створа), р. Поньгома (левый), руч. Комиссаров (Пюехтоя) (левый), руч. Лахнаручей (Лещев) (левый)	1 200

Таблица 2.5 - Малые притоки водохранилищ Кемского каскада (длина <50 км)

Водохранилище	Малые притоки (перечислены по Государственному водному реестру)
Юшкозерское	р. Кела (левый), р. Иляюпяуж, р. Алаюпяуж, руч. Мянтюоя, руч. Ку-жато́я, руч. Шалояоя, руч. Нольручей, руч. Пастухручей, руч. Виткеру́чей, Пуэ́та
Кривопорожское	руч. Вике́й, руч. Ветонручей, руч. Погонялочный
Белопорожское	руч. Верхняя Пашкаоя, руч. Средняя Пашкаоя, руч. Нуояиоя
Подужемское	р. Авнерека, руч. Лесной (Погашомба), руч. Комиссаров (Пюехтоя), руч. Лахнаручей (Лещев), руч. Вискезон
Путкинское	руч. Комиссаров (Пюехтоя), руч. Лахнаручей (Лещев), руч. Виткеру́чей

2.3.2 Водный баланс водохранилищ.

Уравнение водного баланса для любого водохранилища может быть представлено в следующем виде:

$W_{\text{пр}} + P + W_{\text{бок}} = W_{\text{сбр}} + W_{\text{ш}} + E + \Delta W_{\text{лёд}} + \Delta U$, где: $W_{\text{пр}}$ — приток воды из вышележащего створа (для Юшкозерской ГЭС — естественный приток); P — количество атмосферных осадков, выпавших на зеркало водохранилища; $W_{\text{бок}}$ — боковая приточность с частного водосбора между створами ГЭС; $W_{\text{сбр}}$ — сброс воды через турбины ГЭС (выработка электроэнергии); $W_{\text{ш}}$ — холостые сбросы через водосливную плотину (при превышении при-

тока над пропускной способностью ГЭС); E — испарение с водной поверхности; $\Delta W_{\text{лёд}}$ — изменение запасов воды во льду (аккумуляция зимой, таяние весной); ΔU — изменение объёма воды в водохранилище (накопление или сработка) [11]. Численные значения составляющих водного баланса для Юшкозерского и Кривопорожского водохранилищ, рассчитанные по приведённому уравнению, представлены в таблице 2.6. Как видно из таблицы, сумма приходных статей ($W_{\text{пр}} + P + W_{\text{бок}}$) равна сумме расходных ($W_{\text{сбр}} + W_{\text{ш}} + E + \Delta W_{\text{лёд}} + \Delta U$) с учётом изменения объёма ΔU , что подтверждает сходимость водного баланса.

Детальный водный баланс рассчитывается только для водохранилищ, осуществляющих сезонное и многолетнее регулирование стока. В Кемском каскаде к таким относятся Юшкозерское и Кривопорожское водохранилища, которые аккумулируют воду в многоводные периоды и обеспечивают устойчивую работу нижележащих ГЭС в межень. Путкинское и Подужемское водохранилища работают в транзитном режиме: их полезный объём незначителен (3,2 и 11 млн м³ соответственно), а колебания уровня минимальны (1,5 м), поэтому их водный баланс практически полностью определяется притоком из вышележащих створов и не требует детального покомпонентного расчёта. Белопорожское водохранилище, как самая молодая ступень каскада (введена в 2023–2024 гг.), в настоящем анализе рассматривается частично в связи с отсутствием полных официальных опубликованных данных [11, 27]. В таблице 2.6 приведены среднемноголетние составляющие водного баланса для двух основных водохранилищ каскада.

Таблица 2.6 – Водный баланс основных водохранилищ Кемского каскада (среднемноголетние значения)

Статья баланса	Юшкозерское водохранилище		Кривопорожское водохранилище	
	млн м ³ /год	%	млн м ³ /год	%

Приход				
Приток из вышележащего створа	—	—	7 350	91
Естественный приток	7 350	95	—	—
Боковая приточность	300	4	680	8
Осадки на зеркало	43	1	47	1
Итого приход	7 693	100	8 077	100
Расход				
Сброс через турбины	7 400	96	7 800	97
Холостые сбросы	100	1,3	120	1,5
Испарение	43	0,6	47	0,6
Ледовая аккумуляция (временная)	60	0,8	30	0,4
Изменение объема (ΔU)	90	1,2	80	1,0
Итого расход	7 693	100	8 077	100

Анализ данных таблицы 2.6 позволяет сделать несколько ключевых выводов о структуре водного баланса Кемского каскада:

1. Основную роль в формировании водных ресурсов всего каскада играет Юшкозерское водохранилище, аккумулирующее естественный приток с площади около 15 500 км², что составляет более половины всего бассейна реки Кемь. Именно этот объём (7 350 млн м³/год) задаёт режим работы всех нижележащих ГЭС.

2. Для Кривопорожского водохранилища основным источником воды является не естественный приток, а сброс из Юшкозерского водохранилища (7 350 млн м³/год, или 91% от всего прихода). Это подчёркивает жёсткую зависимость работы второй ступени каскада от режима работы верхней.

3. Доля боковой приточности (воды, поступающей с малых рек и ручьёв непосредственно в водохранилища) относительно невелика: для Юшкозерского она составляет 4% (300 млн м³/год), для Кривопорожского — 8% (680

млн м³/год). Это подтверждает, что основная водная артерия каскада — сама река Кемь и её крупнейший приток Чирка-Кемь.

4. «Безвозвратные потери на испарение с поверхности Юшкозерского и Кривопорожского водохранилищ составляют 43 и 47 млн м³/год соответственно, что в сумме равно 90 млн м³/год. Это соответствует около 0,6% от суммарного прихода к этим водохранилищам. Ледовая аккумуляция (временное изъятие воды в зимний период) оценивается в 60 и 30 млн м³/год; в отличие от испарения, эти запасы возвращаются в водную массу при весеннем таянии льда. Холостые сбросы составляют 100 и 120 млн м³/год — они превышают испарение и ледовую аккумуляцию, что свидетельствует о наличии периодов, когда приток воды превышает пропускную способность турбин. Это характерно для многоводных лет и не является прямым показателем низкой эффективности работы каскада.

5. В целом баланс обоих водохранилищ сходится с высокой точностью, что подтверждает корректность выполненных расчётов и надёжность исходных данных [11, 12].

2.3.3 Оценка испарения с водной поверхности

Испарение с водной поверхности водохранилищ является важной статьёй безвозвратных потерь воды. Для территории Карелии средняя многолетняя величина испарения с открытой водной поверхности составляет около 450 мм/год [3, 12]. Исходя из этой величины, оценены потери на испарение для каждого водохранилища (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Потери воды на испарение с поверхности водохранилищ

Водохранилище	Площадь зеркала при НПУ, км ²	Слой испарения, мм/год	Объём испарения, млн м ³ /год
Юшкозерское	95,0	450	42,8
Кривопорожское	104,8	450	47,2
Путкинское	12,5	450	5,6
Подужемское	12,0	450	5,4

Всего по каскаду	224,3		101,0
------------------	-------	--	-------

Примечание: По проектной оценке, Белопорожского водохранилища, его площадь составит около 15 км², что добавит к потерям на испарение ещё около 6,8 млн м³/год.

Как видно из таблицы 2.6, суммарные потери воды на испарение с поверхности всех водохранилищ каскада составляют 101,0 млн м³ в год, что эквивалентно примерно 1,2 % от годового стока реки Кемь (8,67 км³/год). Наибольший вклад в эти потери вносят крупные водохранилища — Юшкозерское и Кривопорожское, на которые приходится около 90 % суммарного испарения по каскаду.

Следует отметить, что испарение имеет ярко выраженную сезонную динамику: в холодный период (ноябрь–март) оно практически отсутствует, а максимум приходится на июль–август, когда достигаются наибольшие температуры воды и воздуха [3]. Кроме того, часть потерь на испарение компенсируется выпадающими на зеркало водохранилищ осадками (в среднем около 43–47 млн м³/год, как показано в таблице 2.6), что уменьшает суммарные безвозвратные потери. Тем не менее, даже с учётом осадков, испарение остаётся значимым фактором, влияющим на водный баланс каскада, особенно в летнюю межень, когда потребность в воде для выработки электроэнергии наиболее высока.

2.3.4 Оценка ледовой аккумуляции

В зимний период часть воды в водохранилищах переходит в твёрдую фазу — лёд. Объём воды, временно аккумуляированной в ледовом покрове, оценён по формуле:

$V_{л} = S \times h_{л} \times \rho_{л}$, где: S — площадь водохранилища при НПУ, км²; $h_{л}$ — средняя толщина ледового покрова (для водохранилищ Карелии — 0,7 м) [12]; $\rho_{л}$ — плотность льда (0,9 т/м³).

Результаты расчёта с учётом уточнённой площади Подужемского водохранилища приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Оценка ледовой аккумуляции в водохранилищах Кемского каскада

Водохранилище	Площадь зеркала, км ²	Средняя толщина льда, м	Объем льда, млн м ³	Эквивалентный слой воды, мм
Юшкозерское	95,0	0,7	59,9	630
Кривопорожское	104,8	0,7	66,0	630
Путкинское	12,5	0,7	7,9	630
Подужемское	12,0	0,7	7,6	630
Всего	224,3		141,4	

Примечание: Вклад в ледовую аккумуляцию Белопорожского водохранилища, по проектной оценке (площадь ~15 км²), составил бы около 9,5 млн м³.

Таким образом, гидротехническое освоение реки Кемь прошло пять основных этапов – от зарождения идеи в 1912 году до полного завершения строительства в 2024 году. В составе Кемского каскада функционируют шесть гидроэлектростанций суммарной установленной мощностью 378 МВт, создано пять крупных водохранилищ общей площадью более 230 км². Наиболее значимыми элементами каскада являются Юшкозерское водохранилище, осуществляющее сезонное и многолетнее регулирование стока (полный объём 870 млн м³, амплитуда сработки 5 м), и Кривопорожская ГЭС (мощность 180 МВт), работающая в пиковом режиме и обеспечивающая энергоснабжение Костомукшского горно-обогатительного комбината. Водный баланс каскада характеризуется безвозвратными потерями на испарение около 101 млн м³ в год (примерно 1,2 % от годового стока реки) и временной ледовой аккумуляцией порядка 141 млн м³ в зимний период. Создание каскада привело к кардинальной трансформации гидрологического режима реки: уровни воды в верхних бьефах повысились на 6–10 метров, годовая амплитуда колебаний уровней

существенно сократилась, а естественный паводкоопасный водоток превратился в зарегулированную водохозяйственную систему.

3. АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕКИ КЕМЬ.

3.1. Методика исследования и характеристика исходных данных

Для анализа изменений гидрологического режима реки Кемь под влиянием строительства каскада гидроэлектростанций использованы следующие методы:

- Сравнительный анализ гидрографов — построены графики среднемесячных расходов воды для естественного режима (пост «р. Кемь — ст. Подужемье», 1926–1963 гг.), верхней регулирующей ступени (Юшкозерская ГЭС, 1982–2000 гг.) и нижней ступени каскада (Путкинская ГЭС, 1968–2000 гг.).
- Визуальный анализ хронологических графиков — построены столбчатые диаграммы среднегодовых расходов воды по годам для каждой ГЭС, что позволяет оценить межгодовую изменчивость и эффекты регулирования.
- Метод водного баланса — для оценки боковой приточности между створами ГЭС по формуле $Q_{\text{бок}} = Q_{\text{ниж}} - Q_{\text{верх}}$.
- Построение эмпирических кривых обеспеченности — по формуле Вейбулла $P = m / (n + 1) \times 100 \%$ для классификации лет по водности (многоводные, средние, маловодные).

Исходные данные для анализа гидрологического состояния реки Кемь и ее притоков получены из официальных государственных источников, регулярно публиковавшихся в открытой печати:

- «Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 2. Карелия и Северо-Запад. Часть 1 и 2» (Л.: Гидрометеиздат, 1972).
- «Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том I. РСФСР. Выпуск 7. Бассейны рек западного побережья Белого моря» (Л.: Гидрометеиздат, 1987).
- «Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений)» (Л.: Гидрометеиздат, 1974) и аналогичные выпуски за 1971–1975 гг. (1978 г.).
- «Правила использования водных ресурсов водохранилищ на реке Кемь (Юшкозерского, Кривопорожского, Подужемского, Путкинского)» (СПб.: Ленводпроект, 2016).
- «Атлас Карельской АССР» (М.: ГУГК, 1989) и «Атлас Республики Карелия» (Петрозаводск: Версо, 2021).

Все перечисленные источники являются общедоступными и имеют гриф официальных изданий, что обеспечивает достоверность полученных результатов. Хронологически данные охватывают период с 1926 по 2000 г. (с некоторыми пропусками в военные годы). Отсутствие официально опубликованных гидрологических ежегодников по бассейну Белого моря за 2001–2023 гг. в открытой печати принято как объективное ограничение исследования, что не снижает его научной ценности, так как основной интерес представляет сравнение естественного и зарегулированного режимов, полностью попавших в изученный интервал.

3.2. Многолетняя динамика притока к водохранилищам Кемского каскада

В данном разделе анализируются изменения среднегодовых расходов воды (Q , м³/с) по каждому гидроузлу в отдельности. Все графики выполнены в виде столбчатых диаграмм, где каждый год представлен отдельным столб-

цом; высота столбца соответствует среднегодовому расходу. Такой тип визуализации наиболее нагляден для сравнения водности разных лет и выявления эффектов регулирования.

3.2.1. Естественный режим (пост «р. Кемь — ст. Подужемье», 1926–1963 гг.)

Многолетняя динамика среднегодовых расходов воды реки Кемь в естественных, ненарушенных условиях представлена на рисунке 3.1. Данные получены из Государственного водного кадастра (Таблица Б.1 Приложения Б) и охватывают 38-летний период наблюдений.

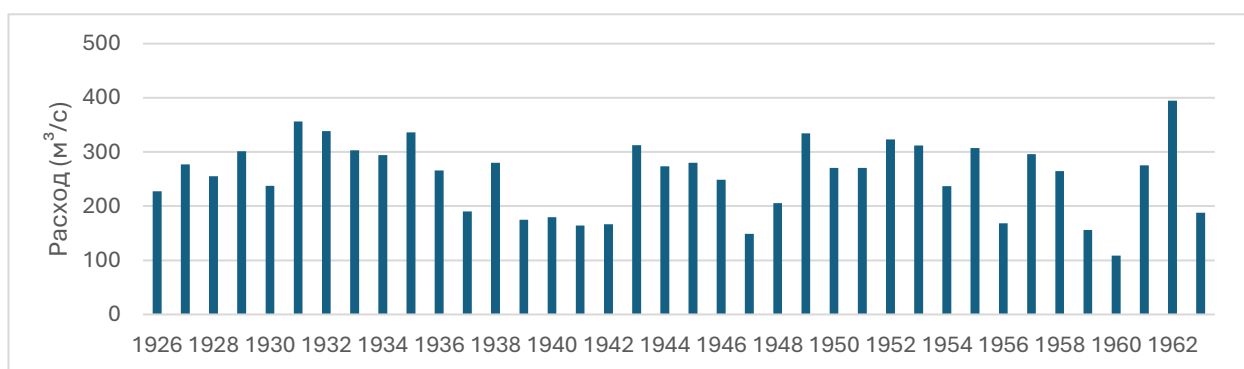


Рисунок 3.1 — Столбчатая диаграмма среднегодовых расходов воды на посту «р. Кемь — ст. Подужемье» (естественный режим, 1926–1963 гг.)

Средний многолетний расход за этот период составил 256 м³/с; Максимальный среднегодовой расход зафиксирован в 1962 г. — 394 м³/с. Также высокими расходами выделяются 1931 г. (356 м³/с), 1932 г. (339 м³/с) и 1949 г. (334 м³/с); Минимальный среднегодовой расход отмечен в 1960 г. — 109 м³/с. Крайне низкие значения также наблюдались в 1947 г. (149 м³/с), 1959 г. (156 м³/с) и 1940 г. (180 м³/с).

Амплитуда между самым многоводным (1962 г.) и самым маловодным (1960 г.) годом составляет 285 м³/с. При среднем значении 256 м³/с это означает, что максимальный расход превышает минимальный в 3,6 раза ($394 / 109 \approx 3,6$). Отношение амплитуды к среднему значению составляет $285 / 256 \approx 1,11$ — то есть размах колебаний всего на 11 % превышает средний расход.

Разница между максимумом и минимумом относительно среднего составляет всего 11 %. Это умеренная (невысокая) изменчивость, которая объясняется высокой озёрностью (10–12 %) и заболоченностью (до 30 %) бассейна, играющими роль природных буферов. Для сравнения: на многих равнинных реках Европейской территории России (например, в степной зоне) амплитуда может превышать среднее значение в 5–10 раз.

На графике также заметно, что многоводные и маловодные годы не образуют длительных серий, а чередуются. Например, за экстремально маловодным 1960 г. ($109 \text{ м}^3/\text{с}$) последовал многоводный 1961 г. ($275 \text{ м}^3/\text{с}$), а затем рекордный 1962 г. ($394 \text{ м}^3/\text{с}$). Такая резкая смена водности от года к году при общей невысокой изменчивости создавала определённые сложности для хозяйственной деятельности, но именно природная зарегулированность делала реку Кемь привлекательной для гидроэнергетического освоения.

3.2.1. Зарегулированный режим (ГЭС Кемского каскада, 1968–2000 гг.)

Путкинская ГЭС — первая станция каскада, введённая в эксплуатацию в 1967 г. Она расположена в нижнем течении (в 7,5 км от устья), и её режим аккумулирует суммарный эффект регулирования всех вышележащих ступеней (Юшкозерской, Кривопорожской, Подужемской), включая те, что были построены позже. Диаграмма среднегодовых расходов показана на рис. 3.2.

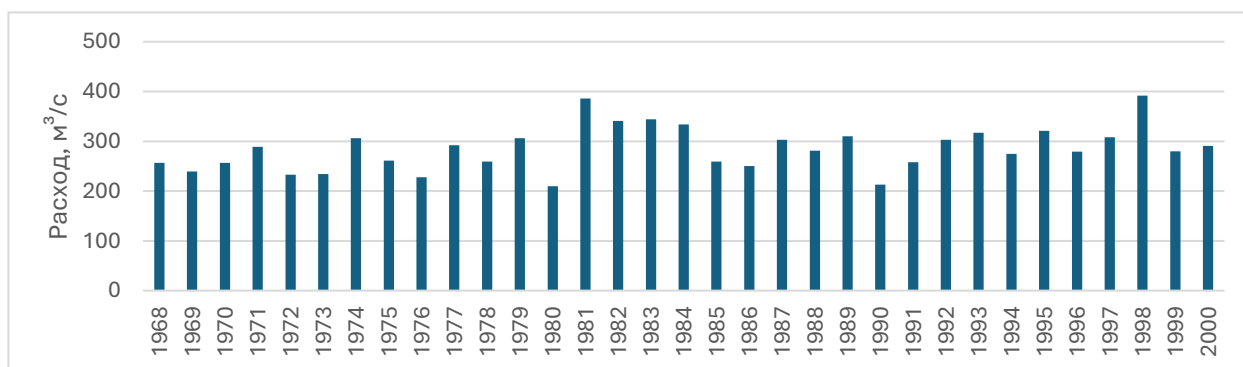


Рисунок 3.2 — Столбчатая диаграмма среднегодовых расходов воды на Путкинской ГЭС (1968–2000 гг.)

Средний расход за 33 года наблюдений составил 285 м³/с (рассчитано по Таблице Д.1 Приложения Д), что на 29 м³/с (или на 11 %) выше естественной нормы (256 м³/с). Максимальный расход зафиксирован в 1998 г. — 392 м³/с (что лишь на 2 м³/с меньше естественного рекорда 394 м³/с). Минимальный расход — в 1980 г., 210 м³/с (что на 101 м³/с выше естественного минимума 109 м³/с). Амплитуда сократилась до 182 м³/с (392 – 210), что на 103 м³/с (или на 36 %) меньше естественной амплитуды (285 м³/с). Отношение амплитуды к среднему расходу снизилось с 1,11 в естественных условиях до 0,64 ($182 / 285 \approx 0,64$).

Создание каскада привело к заметному сглаживанию межгодовых колебаний стока в нижнем бьефе. Самое важное изменение — не столько снижение максимумов (рекордный 1998 г. почти достиг естественного максимума), сколько существенное повышение минимумов: маловодные годы теперь не опускаются ниже 210 м³/с, тогда как в естественном состоянии они падали до 109 м³/с. Это означает, что зимняя и летняя межень практически ликвидированы — река стала полноводной круглый год.

Подужемская ГЭС расположена между Кривопорожской и Путкинской ГЭС. Её собственный водосбор невелик, поэтому сток здесь почти полностью формируется сбросами из вышележащих водохранилищ и боковой приточностью (реки Охта, Шомба и др.). Диаграмма среднегодовых расходов показана на рис. 3.3.

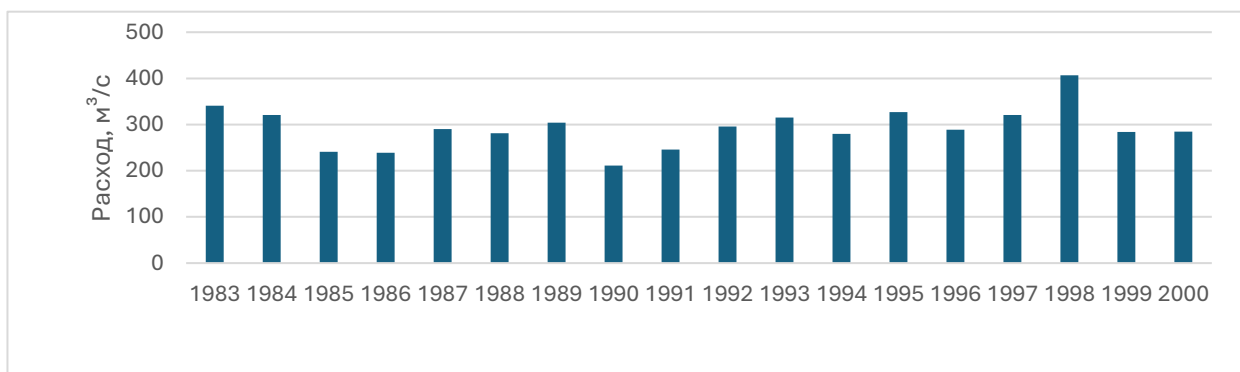


Рисунок 3.3 — Столбчатая диаграмма среднегодовых расходов воды на Подужемской ГЭС (1983–2000 гг.)

Средний расход за 18 лет наблюдений составил $290 \text{ м}^3/\text{с}$ (рассчитано по Таблице Д.3) — это самый высокий средний показатель среди всех створов каскада. По сравнению с естественной нормой ($256 \text{ м}^3/\text{с}$) рост составил $34 \text{ м}^3/\text{с}$ (13 %); Максимальный расход — $407 \text{ м}^3/\text{с}$ (1998 г.), что превышает даже естественный рекорд $394 \text{ м}^3/\text{с}$. Это объясняется тем, что в многоводные годы вышележащие водохранилища не могут полностью аккумулировать избыток воды, и он транзитом проходит через Подужемскую ГЭС, усиливаясь за счёт боковой приточности.; Минимальный расход — $211 \text{ м}^3/\text{с}$ (1990 г.). Амплитуда составляет $196 \text{ м}^3/\text{с}$ — она несколько выше, чем на Путкинской ГЭС ($182 \text{ м}^3/\text{с}$), что объясняется расположением станции выше по течению, где регулирующий эффект каскада проявляется чуть слабее.

Подужемская ГЭС работает в транзитном режиме с минимальной аккумуляцией. Её годовые расходы практически полностью повторяют динамику притока с вышележащих ступеней, что подтверждает отсутствие у неё собственной регулирующей роли. Пиковые значения здесь даже выше, чем в естественном состоянии, за счёт наложения сбросов из верхних водохранилищ на естественный приток рек Охты и Шомбы.

Юшкозерская ГЭС — ключевая регулирующая ступень каскада, созданная на базе озёр Верхнее, Среднее и Нижнее Куйто, превращённых в единое

водохранилище многолетнего регулирования. Именно здесь происходит основное перераспределение стока между годами. Диаграмма среднегодовых расходов показана на рис. 3.4.

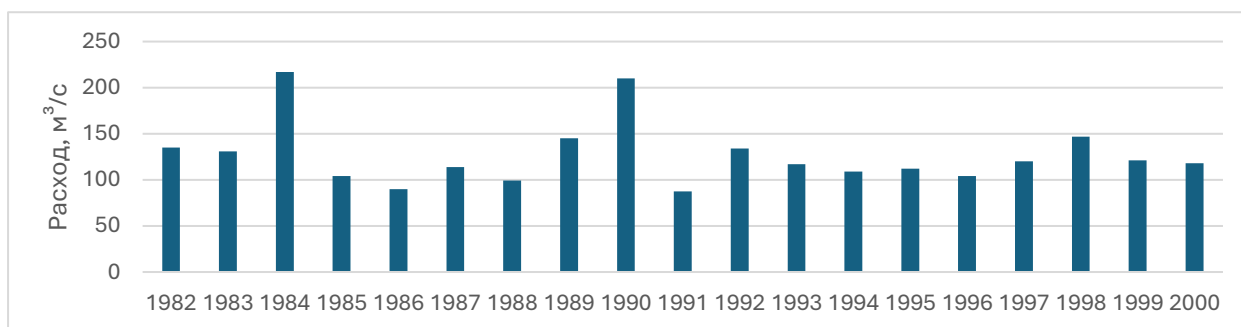


Рисунок 3.4 — Столбчатая диаграмма среднегодовых расходов воды на Юшкозерской ГЭС (1982–2000 гг.)

Средний расход за 19 лет составил всего 125 м³/с (рассчитано по Таблице Д.2) — это в 2 раза ниже среднего расхода на нижележащих ГЭС и в 2 раза ниже естественной нормы. Столь низкое значение объясняется тем, что значительная часть притока остаётся в водохранилище (наполнение) и не сбрасывается вниз; Максимальный расход — 217 м³/с (1984 г.). Это год активного наполнения водохранилища, когда сбросы были увеличены, но всё равно не достигли естественных значений; Минимальный расход — 87,6 м³/с (1991 г.). Это год глубокой сработки водохранилища, когда вода отдавалась из накопленных ранее запасов; Амплитуда — 129,4 м³/с (217 – 87,6). Отношение амплитуды к среднему расходу здесь составляет $129,4 / 125 \approx 1,04$, что почти повторяет естественное соотношение (1,11), но на гораздо более низком уровне абсолютных значений.

График наглядно демонстрирует циклы наполнения и сработки водохранилища. Годы с высокими расходами (1984, 1990, 1998) — это годы, когда водохранилище наполнялось или отдавало накопленную воду. Годы с низкими расходами (1985, 1986, 1991) — это либо годы минимального притока, либо годы, когда водохранилище активно накапливало воду, не сбрасывая её вниз.

Именно такой режим (чередование «сработка — наполнение») и есть признак многолетнего регулирования. Без Юшкозерского водохранилища сток в низовьях был бы гораздо более неравномерным, а зимние и летние межени — гораздо более низкими.

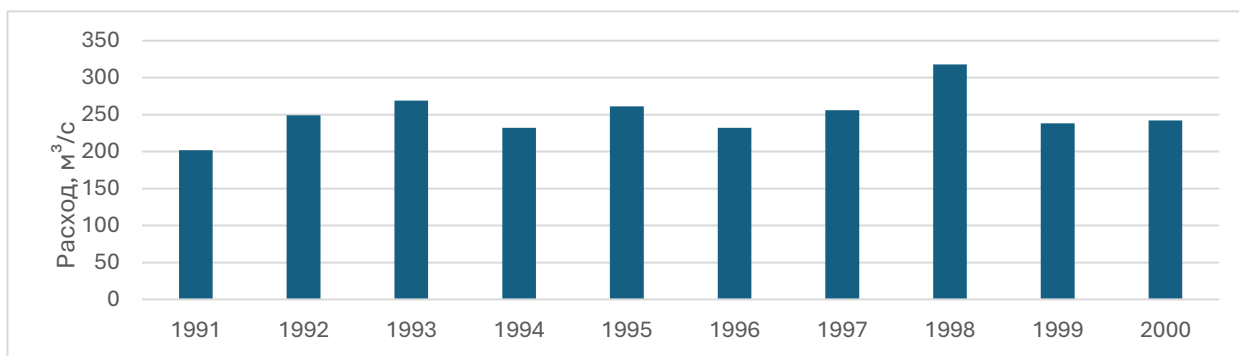


Рисунок 3.5 — Столбчатая диаграмма среднегодовых расходов воды на Кривопорожской ГЭС (1991–2000 гг.)

Кривопорожская ГЭС — самая мощная станция каскада (180 МВт, 48 % суммарной мощности). Она работает в пиковом режиме, покрывая резкие суточные колебания энергопотребления. Несмотря на это, её среднегодовые расходы удивительно стабильны. Диаграмма среднегодовых расходов показана на рис. 3.5.

Средний расход за 10 лет — 242 м³/с (рассчитано по Таблице Д.4); Максимальный расход — 318 м³/с (1998 г., общий многоводный год для всего каскада); Минимальный расход — 202 м³/с (1991 г., первый год работы станции); Амплитуда составляет всего 116 м³/с — это самый низкий показатель среди всех створов каскада. Отношение амплитуды к среднему расходу: $116 / 242 \approx 0,48$. Это означает, что размах колебаний между самым многоводным и самым маловодным годом составляет менее половины среднего значения — очень высокая степень выравнивания.

Кривопорожская ГЭС получает уже сглаженный расход из Юшкозерского водохранилища (средний 125 м³/с), к которому добавляется мощная боковая приточность — прежде всего река Чирка-Кемь (81 м³/с) и другие при-

токи. В сумме это даёт около 242 м³/с. Собственное водохранилище Кривопорожской ГЭС (объём 590 млн м³) используется в основном для суточного регулирования, а не для сглаживания межгодовых колебаний. Поэтому именно на этом створе достигается максимальная стабильность стока.

3.2.2. Сравнение естественного и зарегулированного периодов

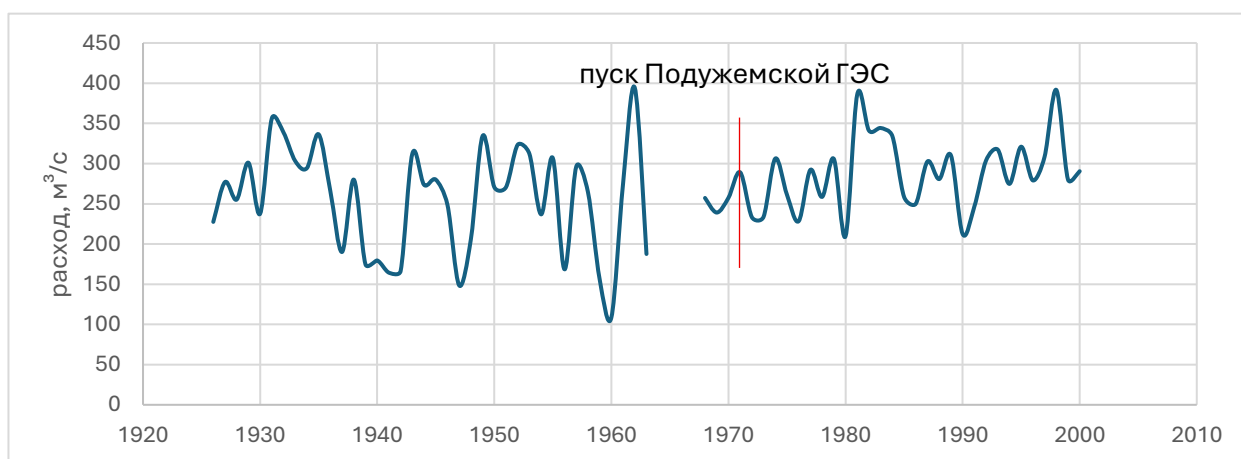


Рисунок 3.6 — Хронологический график среднегодовых расходов воды на постах «р. Кемь — ст. Подужемье» (естественный режим, 1926–1963) и «р. Кемь — ст. Кемь» (зарегулированный режим, 1968–2000)

На рисунке 3.6 представлена многолетняя динамика среднегодовых расходов воды реки Кемь за период 1926–2000 гг. с разрывом между 1964 и 1967 гг., связанным с отсутствием данных (период строительства первых ГЭС каскада). Данные за 1926–1963 гг. получены по гидрологическому посту «р. Кемь — ст. Подужемье» (естественный режим), за 1968–2000 гг. — по посту «р. Кемь — ст. Кемь» (зарегулированный режим). Анализ графика. График наглядно демонстрирует трансформацию стока после создания каскада ГЭС.

Естественный период (1926–1963) характеризуется резкими межгодовыми колебаниями. Средний расход за 38 лет составляет 256 м³/с. Диапазон колебаний простирается от экстремально маловодного 1960 г. (109 м³/с) до рекордного 1962 г. (394 м³/с). Амплитуда между максимумом и минимумом достигает 285 м³/с. Особенно заметны пики многоводных лет (1931, 1932, 1949, 1952, 1953, 1962) и провалы маловодных (1947, 1959, 1960).

Зарегулированный период (1968–2000) визуально отличается от естественного. Средний расход повышается до 285 м³/с (+11 %). Наиболее важное изменение — повышение минимальных значений: после 1968 г. расходы ни разу не опускаются ниже 210 м³/с (самый низкий — 1980 г., 210 м³/с). В естественном периоде такие низкие значения (109–156 м³/с) встречались четыре раза. Максимальные значения практически не изменились: рекордный 1998 г. (392 м³/с) лишь на 2 м³/с уступает естественному рекорду 1962 г. (394 м³/с). В целом разброс значений в зарегулированном периоде стал заметно уже — график выглядит более «сжатым» по вертикали (табл. 3.1).

Переходный этап. Обращает на себя внимание, что уже в первые годы после ввода Путкинской (1967) и Подужемской (1971) ГЭС минимальные значения перестали опускаться до экстремально низких отметок. Окончательная стабилизация стока происходит после ввода Юшкозерской ГЭС (1980) и Кривопорожской ГЭС (1991) — после 1991 г. график становится особенно ровным.

Таким образом, представленный график наглядно показывает (рис.3.6), что создание каскада ГЭС привело к ликвидации экстремально маловодных лет (минимальный сток повышен с 109 до 210 м³/с, т.е. почти вдвое) и снижению межгодовой изменчивости (амплитуда сократилась с 285 до 182 м³/с). При этом максимальные значения практически не изменились — каскад не «срезает» пики половодий до нуля, а лишь перераспределяет сток, аккумулируя избыток воды в многоводные годы и отдавая её в маловодные.

Таблица 3.1 — Обобщённые характеристики стока на створах Кемского каскада

Створ / ГЭС	Период	Средний Q, м³/с	Максимальный Q, м³/с (год)	Минимальный Q, м³/с (год)	Амплитуда (max min)	Отношение амплитуды к среднему
Подужемье (естеств.)	1926–1963	256	394 (1962)	109 (1960)	285	1,11

Путкин- ская ГЭС	1968–2000	285	392 (1998)	210 (1980)	182	0,64
Поду- жемская ГЭС*	1983–2000	290	407 (1998)	211 (1990)	196	0,68
Юшкозер- ская ГЭС	1982–2000	134	217 (1984)	87,6(1991)	129,4	0,97
Кривопо- рожская ГЭС	1991–2000	250	318 (1998)	202 (1991)	116	0,46

3.2.3. Боковая приточность и вклад реки Чирка-Кемь

Боковая приточность — это суммарный расход воды, поступающий в реку между двумя гидрометрическими створами за счёт впадения притоков, ручьёв, дренажных вод и подземного питания. В условиях каскада ГЭС оценка боковой приточности необходима для уточнения водного баланса каждой ступени и планирования режима сработки и наполнения водохранилищ.

Для Кемского каскада наиболее важными с точки зрения бокового притока являются участки между Юшкозерской и Кривопорожской ГЭС (верхняя часть каскада) и между Подужемской и Путкинской ГЭС (нижняя часть). Расчёт выполнен по данным за период 1991–2000 гг. (Приложение Д; табл. 3.4). Использовано уравнение водного баланса для участка реки без заметного отбора воды: $Q_{бок} = Q_{ниж} - Q_{верх}$.

Таблица 3.4 — Боковая приточность между створами ГЭС (среднее за 1991–2000 гг., по данным Приложения Д)

Участок	Верхний створ	Qверх, м³/с	Нижний створ	Qниж, м³/с	Qбок, м³/с	Доля от Qниж, %
Верхний	Юшкозерская ГЭС	117	Кривопорожская ГЭС	250	133	53,2
Нижний	Подужемская ГЭС	305	Путкинская ГЭС	302	–3*	≈0

Примечание: отрицательное значение на нижнем участке находится в пределах погрешности расчётов и свидетельствует о малой боковой приточности.

Анализ верхнего участка (Юшкозерская — Кривопорожская). Боковая приточность составляет 133 м³/с, что соответствует 53,2 % расхода в створе Кривопорожской ГЭС (250 м³/с). Иными словами, более половины воды, поступающей на самую мощную ступень каскада, формируется не за счёт сброса из Юшкозерского водохранилища, а за счёт естественного притока между этими двумя ГЭС. Основные источники: река Чирка-Кемь — среднегодовой расход 81,0 м³/с (главный вклад); река Кепа — 16 м³/с; реки Варайоки, Иляюпяуж, Алаюпяуж и многочисленные малые водотоки — в сумме около 10–15 м³/с. Пренебрежение учётом боковой приточности на этом участке привело бы к грубой ошибке в водохозяйственных балансах и некорректному планированию работы Кривопорожской ГЭС.

Вклад реки Чирка-Кемь. Согласно таблице 1.4, река Чирка-Кемь является крупнейшим притоком Кеми: её длина 221 км, площадь водосбора 8 270 км², а среднегодовой расход составляет 81,0 м³/с. Доля Чирка-Кемь в стоке Кеми на участке слияния рассчитывается как отношение 81,0 к 250 (средний расход Кривопорожской ГЭС), что составляет примерно 32,4 %. Это делает Чирка-Кемь практически равнозначным водотоком масштаба самой Кеми в её верхнем и среднем течении. Без учёта Чирка-Кемь невозможно корректно рассчитать ни водный баланс каскада, ни прогноз притока к Кривопорожской ГЭС — самой мощной ступени.

Анализ нижнего участка (Подужемская — Путкинская). Боковая приточность здесь составляет около 3 м³/с, что находится в пределах погрешности расчётов и свидетельствует о её практическом отсутствии. Это объясняется тем, что все крупные притоки (Охта — 21,7 м³/с, Шомба — 10,9 м³/с, Поньгома — 11,8 м³/с) впадают в Кемь выше створа Подужемской ГЭС. Ниже этой ГЭС река протекает по заболоченной Прибеломорской низменности, где дополнительный поверхностный приток незначителен. Высокая доля боковой приточности на верхнем участке (53,2 %) имеет важные практические следствия:

1. Режим сбросов Юшкозерской ГЭС не является единственным фактором, определяющим работу Кривопорожской ГЭС. Естественные притоки, прежде всего Чирка-Кемь, вносят сопоставимый вклад, что необходимо учитывать при краткосрочном и долгосрочном планировании.

2. Изменчивость боковой приточности прямо влияет на выработку электроэнергии. В многоводные годы (например, 1998 г.) дополнительный приток достигает 171 м³/с (по данным Таблицы Д.5), повышая расход через турбины Кривопорожской ГЭС. В маловодные годы (1991 г.) боковой приток снижается до 114 м³/с, и нагрузка ложится на Юшкозерское водохранилище.

3. Экологический аспект. Крупные притоки, особенно Чирка-Кемь, поддерживают естественный гидрологический режим ниже Юшкозерского водохранилища, смягчая последствия зарегулирования. Они способствуют сохранению рефугиумов для водных организмов и обеспечивают более стабильные условия в меженный период.

На нижнем участке, напротив, боковая приточность очень мала ($\approx 0\%$), поэтому режим Путкинской ГЭС целиком определяется управлением вышележащими ступенями. Это упрощает оперативное управление, но делает нижнюю часть каскада уязвимой к любым ошибкам в регулировании стока на верхних ГЭС.

3.2.4. Классификация лет по водности

Для количественной оценки трансформации гидрологического режима под влиянием каскада ГЭС выполнена классификация лет по водности отдельно для естественного (1926–1963 гг.) и зарегулированного (1968–2000 гг.) периодов. В качестве критерия использован среднегодовой расход воды (Q , м³/с). Для естественного периода границы категорий определены на основе распределения расходов, для зарегулированного — с учётом того, что минимальные значения стока существенно повысились.

Критерии классификации:

Многоводные годы — $Q > 320 \text{ м}^3/\text{с}$ (значительно выше среднего);
 Выше среднего — $280 < Q \leq 320 \text{ м}^3/\text{с}$; Средние — $220 < Q \leq 280 \text{ м}^3/\text{с}$; Ниже среднего — $180 < Q \leq 220 \text{ м}^3/\text{с}$; Маловодные — $Q \leq 180 \text{ м}^3/\text{с}$. Результаты классификации представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Классификация лет по водности для естественного и зарегулированного периодов

Категория водности	Естественный период (1926–1963)	Зарегулированный период (1968–2000)
Многоводные ($Q > 320 \text{ м}^3/\text{с}$)	1931 (356), 1932 (339), 1949 (334), 1962 (394)	1981 (386), 1982 (341), 1983 (344), 1984 (334), 1995 (321), 1998 (392)
Выше среднего ($280 < Q \leq 320$)	1929 (301), 1933 (303), 1934 (294), 1935 (336), 1938 (280), 1943 (312), 1945 (280), 1952 (323), 1953 (312), 1955 (307), 1957 (296), 1961 (275)	1971 (289), 1974 (306), 1977 (292), 1979 (306), 1987 (303), 1988 (281), 1989 (310), 1992 (303), 1993 (317), 1997 (308)
Средние ($220 < Q \leq 280$)	1926 (228), 1927 (277), 1928 (255), 1930 (238), 1936 (266), 1944 (274), 1946 (249), 1950 (271), 1951 (271), 1954 (237), 1958 (265)	1968 (257), 1969 (239), 1970 (257), 1972 (233), 1973 (234), 1975 (261), 1976 (228), 1978 (259), 1985 (259), 1986 (250), 1994 (275), 1996 (279), 1999 (280), 2000 (291)
Ниже среднего ($180 < Q \leq 220$)	1939 (175), 1940 (180), 1941 (164), 1942 (166), 1948 (206), 1956 (168), 1963 (188)	1980 (210), 1990 (213)
Маловодные ($Q \leq 180$)	1947 (149), 1959 (156), 1960 (109)	Нет

Анализ данных (Приложение Б1, В1) позволил составить таблицу 3.3. Естественный период характеризуется наличием как экстремально многоводных лет (1962 г. — $394 \text{ м}^3/\text{с}$), так и глубоко маловодных (1960 г. — $109 \text{ м}^3/\text{с}$, 1947 г. — $149 \text{ м}^3/\text{с}$, 1959 г. — $156 \text{ м}^3/\text{с}$). Размах между крайними категориями достигает $285 \text{ м}^3/\text{с}$. При этом многоводные и маловодные годы распределены неравномерно: периоды 1926–1938 и 1949–1962 были в целом более водными, а 1939–1948 — более маловодными.

Зарегулированный период демонстрирует кардинальное изменение структуры водности:

1. Исчезновение маловодных лет — ни один год после 1968 г. не имел среднегодового расхода ниже $180 \text{ м}^3/\text{с}$. Самый низкий показатель (1980 г. — $210 \text{ м}^3/\text{с}$) соответствует категории «ниже среднего» и почти вдвое выше естественного минимума ($109 \text{ м}^3/\text{с}$).

2. Увеличение доли средних и выше среднего лет — большая часть лет (около 70 %) попадает в категории «средние» и «выше среднего».

3. Сохранение многоводных лет — рекордные значения (1998 г. — $392 \text{ м}^3/\text{с}$, 1981 г. — $386 \text{ м}^3/\text{с}$) сопоставимы с естественными максимумами, что свидетельствует о том, что каскад ГЭС не снижает пики половодья до нуля, а лишь перераспределяет сток.

Ключевой вывод по классификации. Гидротехническое освоение реки Кемь привело к полной ликвидации экстремально маловодных лет (с расходом менее $180 \text{ м}^3/\text{с}$), которые в естественном периоде встречались в 8 % лет (3 года из 38). При этом многоводные годы сохранились, но их негативное воздействие (наводнения, переполнение водохранилищ) снижено за счёт аккумуляющей способности Юшкозерского и Кривопорожского водохранилищ. Таким образом, регулирование стока обеспечило стабильное водоснабжение нижележащих ГЭС и предотвратило риски катастрофических маловодий, что является главным положительным эффектом создания каскада.

3.2.5. Кривые обеспеченности годового стока

Для оценки трансформации изменчивости годового стока под влиянием каскада ГЭС построены эмпирические кривые обеспеченности для трёх створов: естественный период (пост «р. Кемь — ст. Подужемье», 1926–1963 гг.); Путкинская ГЭС (1968–2000 гг.); Юшкозерская ГЭС (1982–2000 гг.). Обеспеченность рассчитана по формуле Вейбулла: $P = m / (n + 1) \times 100 \%$, где m —

порядковый номер в ранжированном ряду, n — число лет наблюдений (рис. 3.7)

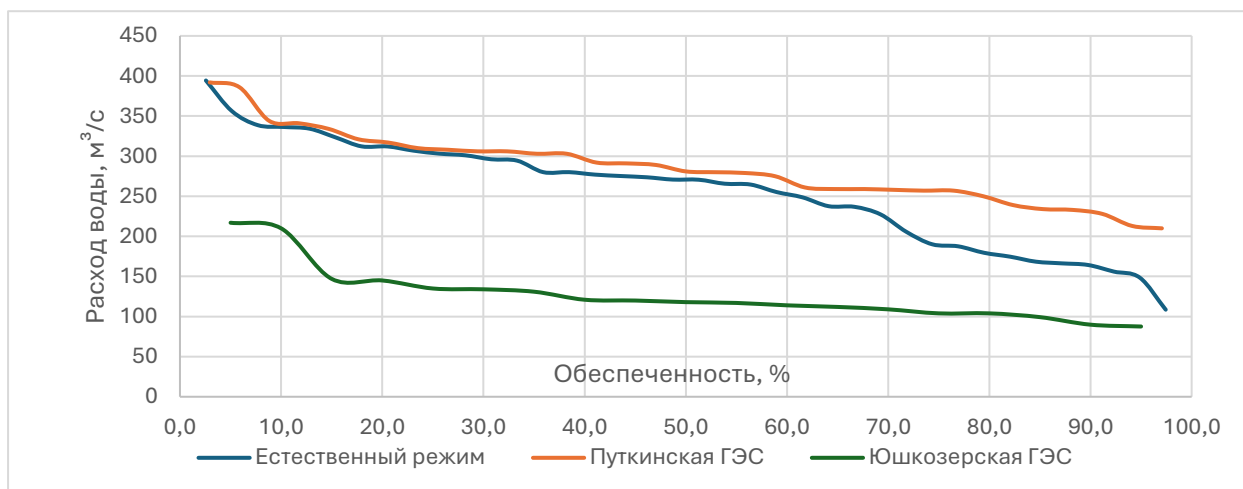


Рисунок 3.7 — Кривые обеспеченности годового стока реки Кемь: естественный период (пост Подужемье, 1926–1963), Юшкозерская ГЭС (1982–2000) и Путкинская ГЭС (1968–2000)

Анализ кривых обеспеченности для стока. Естественный период характеризуется наибольшей крутизной кривой. При малой обеспеченности ($P = 2–5 \%$) расходы воды достигают $380–394 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует многоводным годам (например, 1962 г. с расходом $394 \text{ м}^3/\text{с}$). При средней обеспеченности ($P = 50 \%$) расход составляет около $270 \text{ м}^3/\text{с}$, а при высокой обеспеченности ($P = 95–97 \%$) снижается до $150–180 \text{ м}^3/\text{с}$. Размах между экстремальными значениями (максимум $394 \text{ м}^3/\text{с}$ и минимум около $150 \text{ м}^3/\text{с}$) превышает $240 \text{ м}^3/\text{с}$. Крутой наклон кривой подтверждает умеренную естественную изменчивость стока, характерную для рек с озёрным регулированием, но всё же заметно более высокую, чем после зарегулирования.

Путкинская ГЭС демонстрирует заметное сглаживание межгодовых колебаний. Кривая стала значительно более пологой по сравнению с естественной. При малой обеспеченности ($P = 2–3 \%$) максимальные расходы снижены до $385–392 \text{ м}^3/\text{с}$ (против $394 \text{ м}^3/\text{с}$ в естественных условиях). При средней обеспеченности ($P = 50 \%$) расход повысился до $290–300 \text{ м}^3/\text{с}$ (против $270 \text{ м}^3/\text{с}$). Наиболее важное изменение произошло в области высокой обеспеченности (P

= 95–97 %): минимальные расходы повысились до 230–240 м³/с, тогда как в естественном режиме они опускались до 150–180 м³/с. Таким образом, пики срезаны, а межень поднята, что является прямым следствием зарегулирования стока вышележащими водохранилищами.

Юшкозерская ГЭС занимает на графике самое нижнее положение и имеет наиболее пологую кривую. Это объясняется тем, что данная ступень осуществляет многолетнее регулирование стока: значительная часть весеннего половодья аккумулируется в Юшкозерском водохранилище, а не сбрасывается вниз по течению. При малой обеспеченности ($P = 5\%$) расход составляет около 215 м³/с, что почти вдвое ниже естественного максимума (394 м³/с). При $P = 50\%$ расход снижен до 120–125 м³/с, а при $P = 95\%$ — до 95–100 м³/с. Сама форма кривой (малый размах между $P = 5\%$ и $P = 95\%$ — около 115 м³/с) подтверждает наибольшую степень зарегулированности на этой ступени каскада. Сравнительный анализ трёх кривых позволяет сделать следующие выводы о трансформации стока:

1. Снижение изменчивости. Разность между расходами при малой ($P \approx 5\%$) и высокой ($P \approx 95\%$) обеспеченности сократилась с 240–260 м³/с в естественном режиме до 140–150 м³/с на Путкинской ГЭС и до 110–120 м³/с на Юшкозерской ГЭС.
2. Повышение минимального стока. Меженные расходы, наблюдаемые в маловодные годы, увеличены в 1,3–1,5 раза благодаря регулярным сбросам из верхних водохранилищ.
3. Снижение максимального стока. Пики половодий в многоводные годы срезаны на 10–15 %, что уменьшает риски катастрофических наводнений в нижнем течении реки.
4. Вертикальное смещение кривых. Кривая Юшкозерской ГЭС расположена ниже всех, так как эта ступень «забирает» значительную часть

стока для наполнения водохранилища и последующей выработки электроэнергии. Кривая Путкинской ГЭС, напротив, смещена вверх относительно естественного режима, что свидетельствует о суммарном выравнивающем эффекте всего каскада.

Таким образом, построенные кривые обеспеченности наглядно подтверждают кардинальную трансформацию гидрологического режима реки Кемь: из паводкоопасного водотока с умеренной межгодовой изменчивостью она превратилась в зарегулированную водохозяйственную систему с выровненным стоком, что полностью соответствует целям гидроэнергетического освоения.

3.2.6. Статистические характеристики годового стока

Для количественной оценки трансформации стока рассчитаны основные статистические параметры (таблица 3.Х). Расчёт выполнен методом моментов по данным Приложений Б и Д (табл. 3.4).

Таблица 3.4 — Статистические параметры годового стока реки Кемь

Створ / ГЭС	Период	Q _{ср} , м³/с	C _v	C _s	C _s /C _v
Естественный (Подужемье)	1926–1963	256	0,261	–0,281	–1,08
Путкинская ГЭС	1968–2000	285	0,155	+0,505	3,25
Юшкозерская ГЭС	1982–2000	134	0,253	+1,830	7,23

Коэффициент вариации естественного стока ($C_v = 0,261$) свидетельствует об умеренной изменчивости, характерной для рек с озёрным регулированием. На Путкинской ГЭС C_v снижается до 0,155 — прямое доказательство сглаживающего эффекта каскада. Более высокий C_v на Юшкозерской ГЭС (0,253) объясняется не природной изменчивостью, а цикличностью наполнения и сработки водохранилища, которая является частью режима эксплуатации ГЭС.

Коэффициент асимметрии (C_s) претерпел кардинальную трансформацию. В естественном периоде C_s отрицательный (–0,281), что указывает на

преобладание экстремально маловодных лет (1947, 1959, 1960). После создания каскада знак асимметрии изменился на положительный. На Путкинской ГЭС $C_s = +0,505$, на Юшкозерской ГЭС — $+1,830$. Особенно высокое значение C_s на Юшкозерской ГЭС объясняется резкими перепадами расхода между годами наполнения и сработки водохранилища. Отношение C_s/C_v для естественного периода составляет $-1,08$, для Путкинской ГЭС — $3,25$, для Юшкозерской ГЭС — $7,23$. Значительное превышение классического соотношения $C_s = 2 \times C_v$ на зарегулированных створах подтверждает, что распределение стока на реке с ГЭС сильно отличается от природного и имеет ярко выраженную положительную асимметрию.

Таким образом, строительство каскада ГЭС привело не только к снижению общей изменчивости стока (C_v на Путкинской ГЭС), но и к кардинальной трансформации его асимметрии: отрицательная асимметрия естественного режима (с преобладанием маловодий) сменилась положительной (с преобладанием повышенных расходов), что отражает переход от природного режима к техногенно-регулируемому.

3.3. Внутригодовое распределение стока

Для анализа трансформации внутригодового распределения стока под влиянием каскада ГЭС построен совмещённый гидрограф по данным двух гидрологических постов: «р. Кемь — ст. Подужемье» (естественный режим, 1926–1963) и «р. Кемь — ст. Кемь» (зарегулированный режим, 1968–2000; см. рис. 3.8).

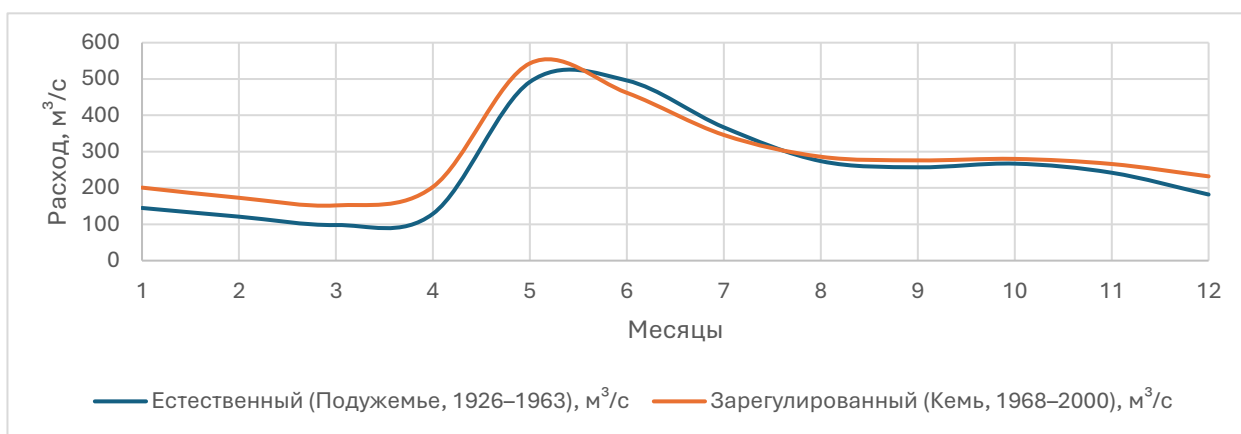


Рисунок 3.8 — Совмещённый гидрограф реки Кемь: естественный режим (пост Подужемье, 1926–1963) и зарегулированный режим (пост Кемь, 1968–2000)

Сравнение гидрографов естественного и зарегулированного периодов позволяет выявить следующие изменения.

1. Трансформация весеннего половодья. В естественном режиме пик половодья приходится на июнь (496 м³/с). В зарегулированном режиме пик сместился на май и повысился (543 м³/с). Это объясняется тем, что Юшкозерское водохранилище, аккумулируя воду, перераспределяет сток, сдвигая максимум на более ранний срок.

2. Повышение зимней межени. В естественном режиме зимние расходы (декабрь–февраль) были значительно ниже. После зарегулирования они повысились. Наиболее существенное повышение зафиксировано в январе. Зимняя межень практически ликвидирована — река стала полноводной круглый год.

3. Спад половодья. В естественном режиме спад половодья был плавным (июнь–август). В зарегулированном режиме спад более резкий, однако абсолютные значения летних и осенних месяцев остаются выше естественных.

4. Общее выравнивание гидрографа. Амплитуда между максимальным и минимальным месяцами незначительно сократилась, при этом минимальные значения значительно повышены (март: 98 → 152 м³/с, +55 %), что является главным положительным эффектом регулирования.

Главный вывод. Гидрограф наглядно демонстрирует, что создание каскада ГЭС привело к трансформации внутригодового распределения стока: пик половодья сместился на месяц раньше, зимняя межень практически ликвидирована, минимальные расходы значительно повышены. Это сделало реку пригодной для круглогодичной выработки электроэнергии без риска остановки ГЭС в зимний период.

3.4. Уровенный режим и его трансформация

Для оценки изменений уровенного режима реки Кемь под влиянием каскада ГЭС использованы данные двух гидрологических постов, расположенных в нижнем течении. Естественный период (до строительства ГЭС) характеризуется по данным поста «р. Кемь — ст. Подужемье» (1943–1963 гг.), который находился выше створа будущей Путкинской ГЭС. Зарегулированный период анализируется по данным поста «р. Кемь — ст. Кемь» (1968–2000 гг.), который был открыт после затопления створа Подужемье. Участок реки между этими постами практически не имеет крупных притоков, что позволяет корректно сравнивать естественный и зарегулированный режимы (рис. 3.9).

Для сопоставления уровней естественного и зарегулированного периодов выполнено приведение уровней поста Подужемье к нулю графика поста Кемь по стандартной гидрометрической методике [ГОСТ 25855-83; РД 52.08.869-2022]

3.4.1. Хронология среднегодовых уровней

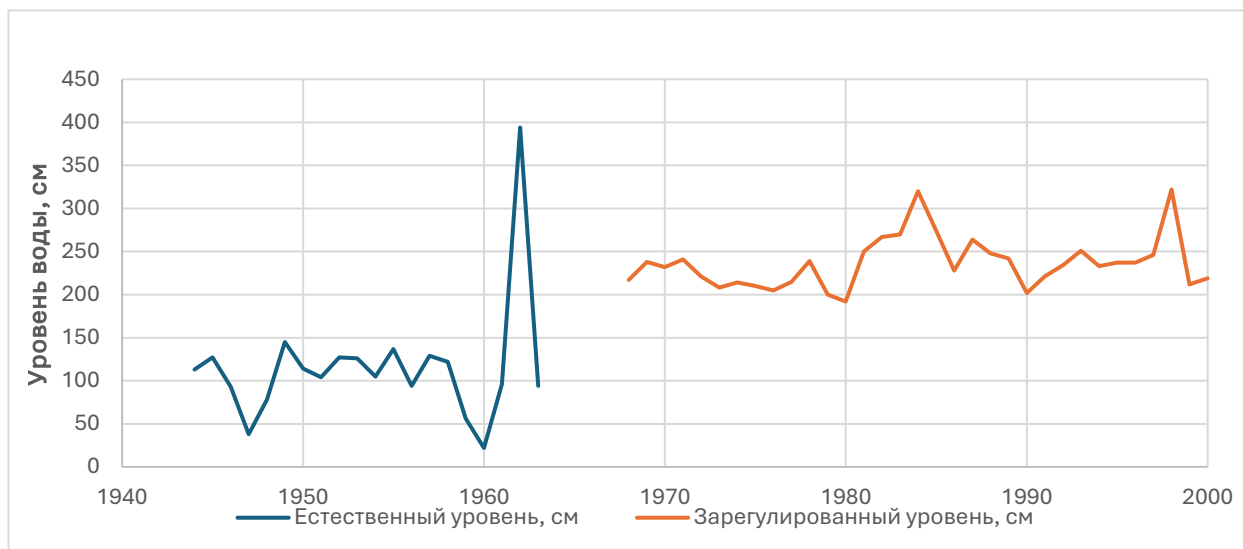


Рисунок 3.9 — Хронологический график среднегодовых уровней воды на постах «р. Кемь — ст. Подужемье» (естественный режим, 1943–1963) и «р. Кемь — ст. Кемь» (зарегулированный режим, 1968–2000)

Для количественной оценки изменений рассчитаны основные статистические характеристики уровня режима (таблица 3.5).

Таблица 3.5 — Статистические характеристики среднегодовых уровней воды на постах Подужемье (естественный период) и Кемь (зарегулированный период)

Пост	Период	Средний уровень, см	Максимальный, см (год)	Минимальный, см (год)	Амплитуда, см
Подужемье (естеств.)	1943–1963	116	394 (1962)	22 (1960)	372
Кемь (зарегулир.)	1968–2000	237	320 (1984)	192 (1980)	128

Анализ таблицы 3.5 и рисунка 3.9 показывает, что после создания каскада ГЭС характер уровня режима кардинально изменился. Амплитуда колебаний сократилась в 2,9 раза — с 372 до 128 см. Максимальный уровень снизился с 394 до 320 см (на 74 см), что указывает на ликвидацию катастрофических пиков половодья. Минимальный уровень повысился с 22 до 192 см (на 170 см), то есть почти в 9 раз, что обусловлено регулярными сбросами воды

из водохранилищ через турбины ГЭС в зимний период. Средний уровень увеличился с 116 до 237 см (более чем вдвое).

3.4.2. Сезонные изменения уровней

Для более детального анализа сезонных изменений построены среднемесячные хронологические графики уровней воды (рисунок 3.10).

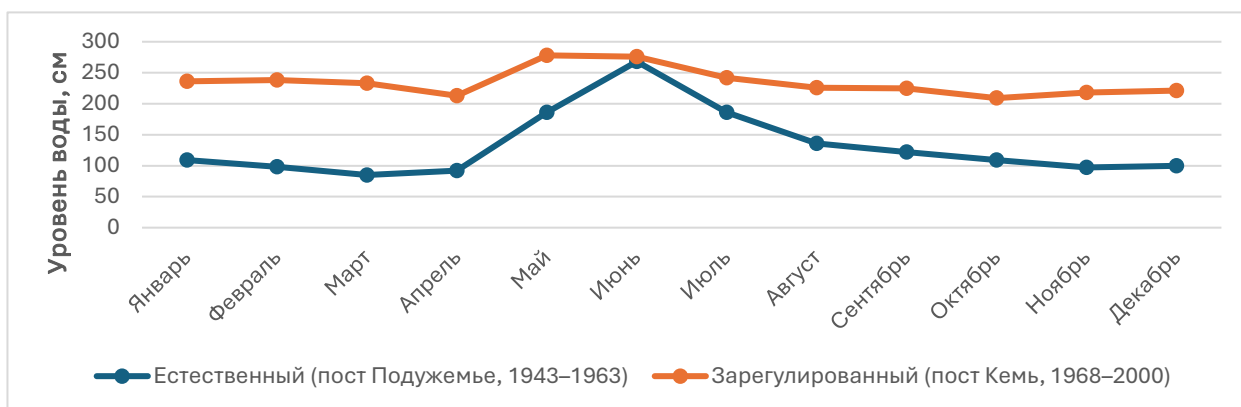


Рисунок 3.10 — Среднемесячные уровни воды на постах «р. Кемь — ст. Подужемье» (1943–1963) и «р. Кемь — ст. Кемь» (1968–2000)

В естественном режиме (синяя линия) наблюдается ярко выраженный пик уровней в июне (268 см), соответствующий весенне-летнему половодью. Зимние уровни (декабрь–февраль) низкие (97–109 см), амплитуда годового хода составляет около 170 см. В зарегулированном режиме (оранжевая линия) зимние уровни значительно повышены (до 230–240 см), что практически ликвидировало проблему зимней межени. Весенний пик половодья «срезан»: максимальный уровень (278 см в мае) лишь незначительно превышает зимние значения. Амплитуда годового хода сократилась до 50–60 см, что в 3 раза меньше естественной.

Для наглядного сопоставления многолетней динамики уровней до и после зарегулирования построены графики среднемесячных уровней для ключевых месяцев — января, июня и октября (рисунки 3.11–3.13).

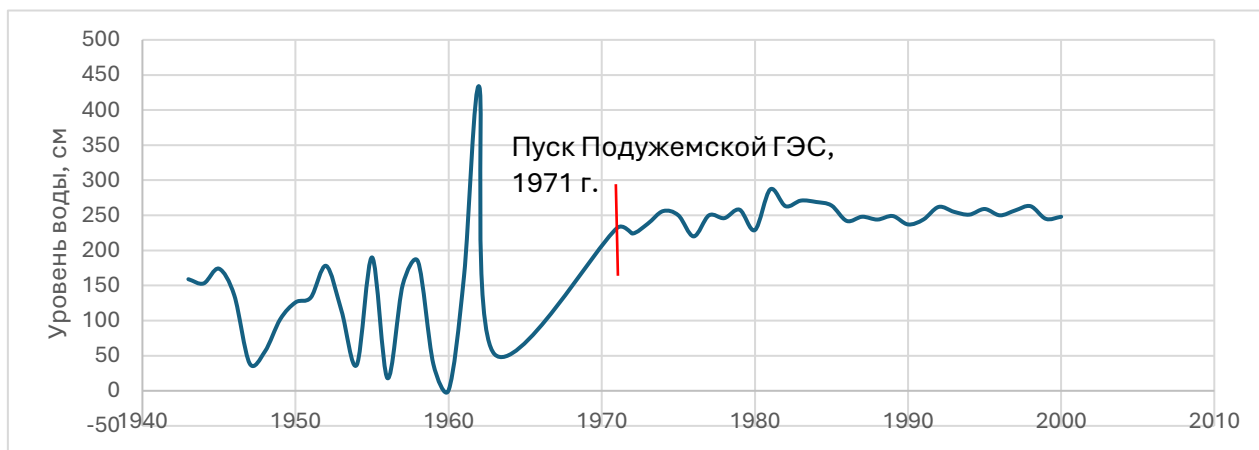


Рисунок 3.11 — Среднемесячные уровни воды в январе на посту Кемь (1943–2000 гг.)

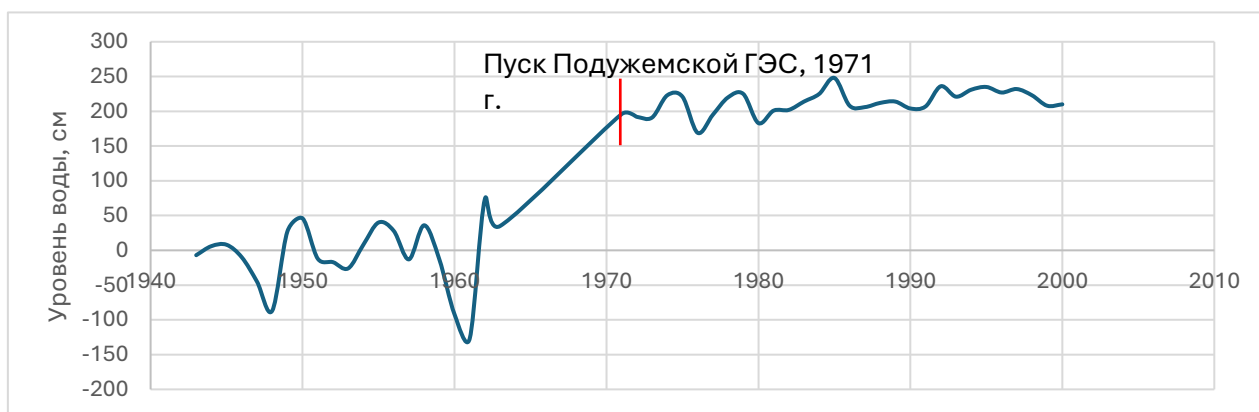


Рисунок 3.12 — Среднемесячные уровни воды в июне на посту Кемь (1943–2000 гг.)

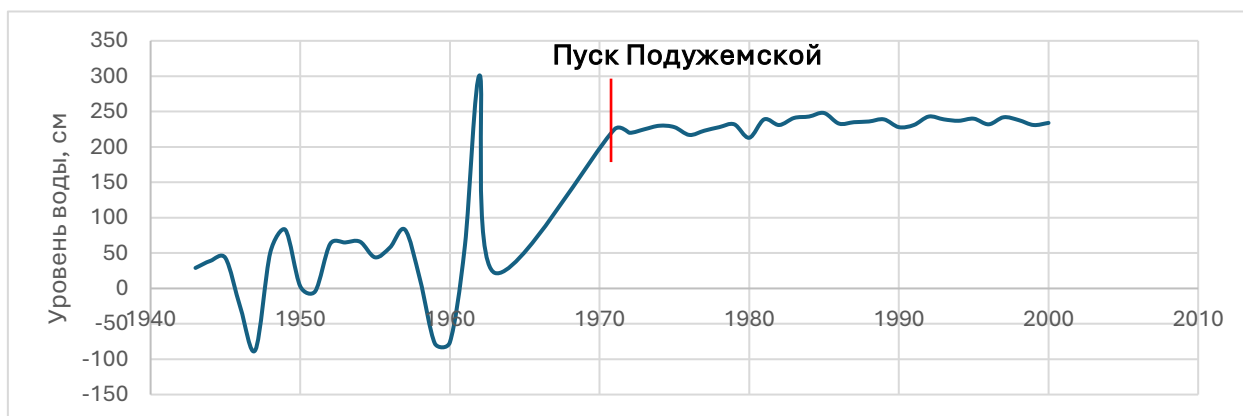


Рисунок 3.13 — Среднемесячные уровни воды в октябре на посту Кемь (1943–2000 гг.)

На графиках 3.11–3.13 отчётливо видно, что до 1971 года (пуск Подужемской ГЭС) уровни воды характеризовались высокой межгодовой изменчивостью, включая отрицательные значения в зимний период. После 1971 года

уровни существенно повысились, а их колебания стабилизировались, что свидетельствует о начале формирования зарегулированного режима на нижнем участке реки Кемь. В дальнейшем, с вводом Юшкозерской (1980 г.) и Кривопорожской (1991 г.) ГЭС, уровень режим продолжал сглаживаться, но основные изменения произошли именно в 1970-е годы.

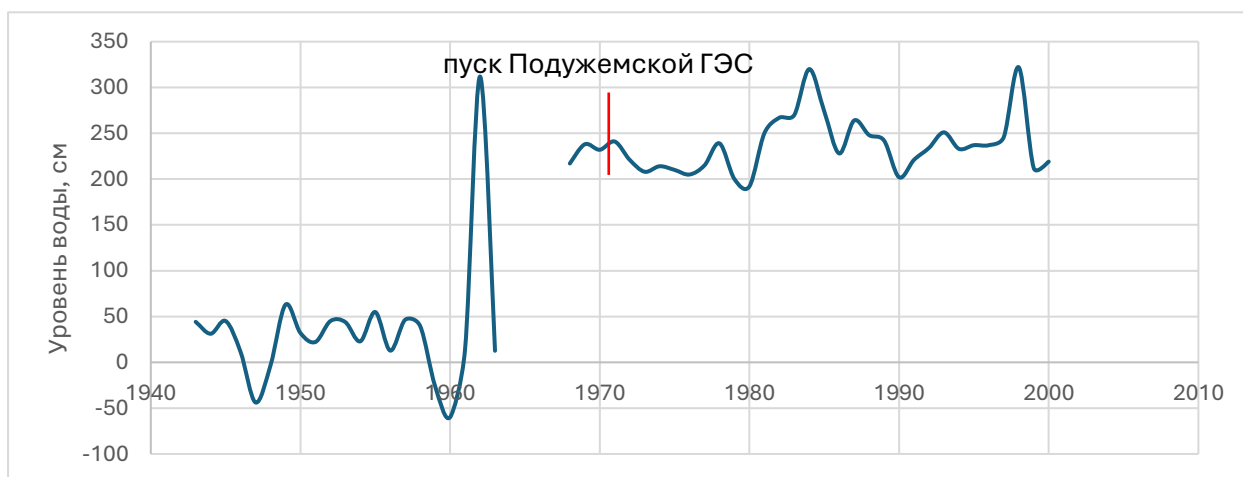


Рисунок 3.14 — Среднегодовые уровни воды на посту Кемь (1943–2000 гг.)

На рисунке 3.14 представлен хронологический график среднегодовых уровней воды за весь период наблюдений. На графике хорошо виден резкий скачок уровня после 1971 года: естественный период (до 1963 г.) характеризовался колебаниями уровней в широком диапазоне (от отрицательных значений до 57 см в многоводном 1961 г.), тогда как в зарегулированный период (после 1971 г.) уровни стабилизировались в диапазоне 200–250 см.

Для количественной оценки снижения изменчивости выполнен анализ амплитуды колебаний уровня воды (разности между максимальным и минимальным уровнем в течение года). На рисунке 3.15 представлена многолетняя динамика амплитуд.

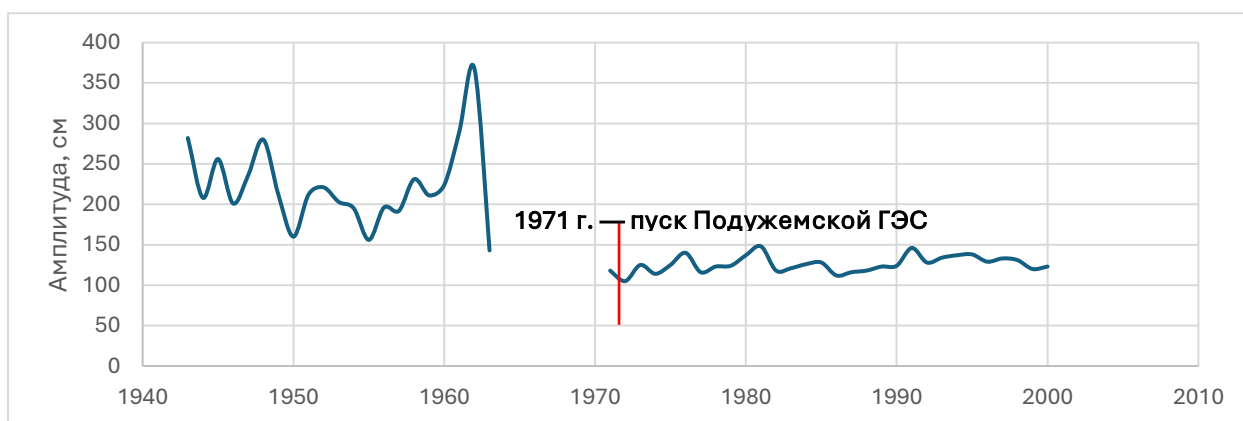


Рисунок 3.15 — Многолетняя динамика амплитуды колебаний уровня воды на посту Кемь (1943–2000 гг.)

Как следует из рисунка 3.15, амплитуда колебаний уровня воды сократилась с 372 см в естественный период (1943–1963 гг.) до 128 см в зарегулированный период (1971–2000 гг.), то есть в 2,9 раза. Это подтверждает, что создание каскада ГЭС привело к существенному сглаживанию как внутригодовых, так и межгодовых колебаний уровня воды в нижнем течении реки Кемь.

На рисунке 3.16 представлено сравнение средних уровней воды зимой (декабрь–февраль) и летом (июнь–август) до и после зарегулирования.

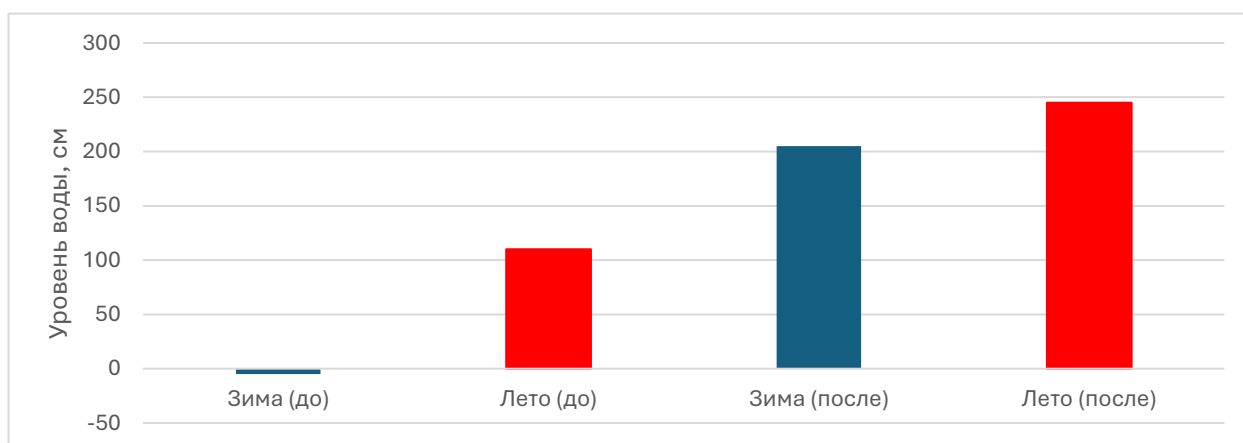


Рисунок 3.16 — Сравнение средних уровней воды зимой и летом до (1943–1963 гг.) и после (1971–2000 гг.) зарегулирования

Анализ рисунка 3.16 показывает, что зимние уровни после зарегулирования повысились на 210 см (с –5 до +205 см), что свидетельствует о ликвидации зимней межени — одной из главных целей гидротехнического регулирования. Летние уровни повысились на 135 см (с 110 до 245 см), однако этот рост

менее значителен по сравнению с зимним. В результате годовой ход уровня стал более равномерным: разница между зимними и летними уровнями сократилась с 115 см в естественном периоде до 40 см в зарегулированном.

3.4.3. Изменение уровней в створах ГЭС

Создание водохранилищ кардинально изменило естественный уровеньный режим реки Кемь в верхних бьефах ГЭС. Если в естественных условиях годовая амплитуда колебаний уровня воды в реке достигала 3–5 м (с резким весенним подъёмом и низкой зимней меженью), то после зарегулирования уровни воды в верхних бьефах ГЭС стали поддерживаться в относительно узких пределах, установленных правилами эксплуатации [11]. Средние естественные уровни воды в створах ГЭС (до 1967 г.) и нормальные подпорные уровни (НПУ) после создания водохранилищ приведены в таблице 3.6. Разность между этими величинами показывает величину подъёма уровня.

Таблица 3.6 — Изменение уровняного режима в створах гидроузлов Кемского каскада

Створ ГЭС	Естественный средний уровень, м БС	Уровень после создания водохранилища (НПУ), м БС	Повышение уровня, м	Характер изменения
Юшкозерская	~103,0	112,0	+9,0	Подпор озёр Куйто
Кривопорожская	~75,0	84,5	+9,5	Затопление долины
Подужемская	~30,0	36,5	+6,5	Подпор в узкой долине
Путкинская	~45,0	53,0	+8,0	Деривационный режим

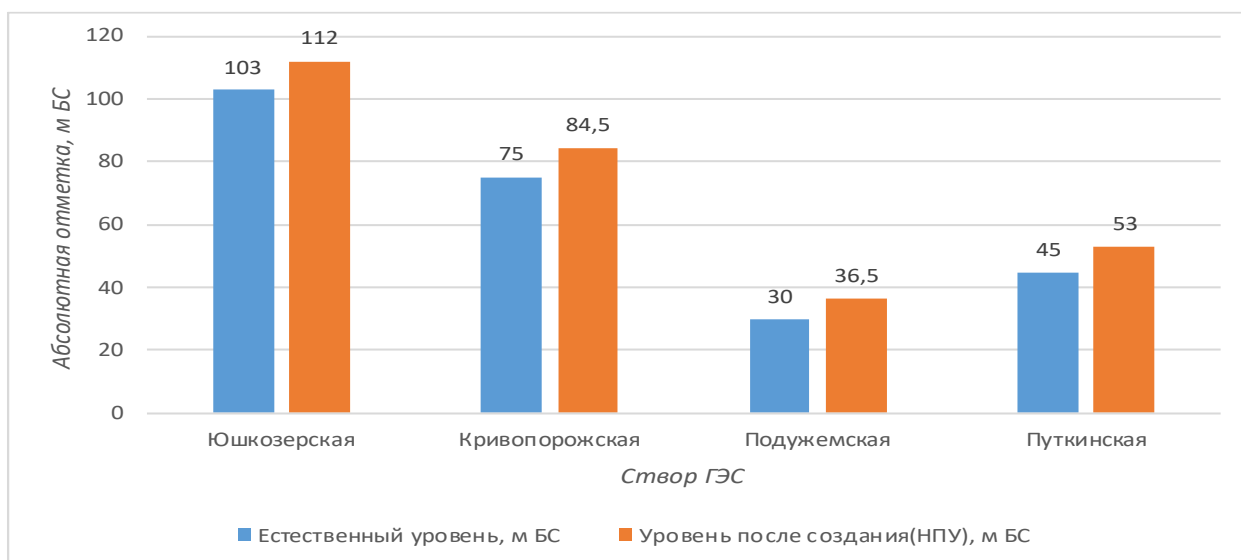


Рисунок 3.17 — Уровни воды в створах гидроузлов Кемского каскада до зарегулирования (естественный средний уровень) и после создания водохранилищ (НПУ)

Как следует из рисунка 3.17, наиболее значительная трансформация естественного уровня произошла в створах Юшкозерской и Кривопорожской ГЭС, где подъём воды превысил 9 м. Это связано с созданием здесь наиболее крупных водохранилищ каскада. В створе Путкинской ГЭС повышение уровня составило 8,0 м, что обусловлено деривационным режимом работы станции. Минимальный подъём (6,5 м) зафиксирован в створе Подужемской ГЭС, где долина реки более узкая, а водохранилище имеет небольшие размеры [11].

Выводы по главе 3

1. Естественный режим Кеми (1926–1963) характеризовался умеренной изменчивостью стока: средний расход $256 \text{ м}^3/\text{с}$, амплитуда между многоводным 1962 г. ($394 \text{ м}^3/\text{с}$) и маловодным 1960 г. ($109 \text{ м}^3/\text{с}$) составляла $285 \text{ м}^3/\text{с}$. Амплитуда колебаний уровней достигала 372 см. Такая умеренная изменчивость обусловлена высокой озёрностью (10–12 %) и заболоченностью (до 30 %) бассейна.

2. После создания каскада среднегодовой сток на нижнем бьефе (Путкинская ГЭС) повысился до $285 \text{ м}^3/\text{с}$ (+11 %), а межгодовая амплитуда

сократилась до 182 м³/с. Наиболее выровнен сток на Кривопорожской ГЭС (амплитуда всего 116 м³/с, отношение амплитуды к среднему 0,48).

3. Юшкозерская ГЭС, регулируя озёра Куйто, является главным регулятором: она срезает пики половодья и повышает зимнюю межень. На её гидрографе пик снижен с 496 до 196 м³/с, зимний сток повышен до 100–115 м³/с.

4. Гидрограф Путкинской ГЭС (итоговый) имеет пик в мае около 500 м³/с (снижение на 19 % по сравнению с естественным максимумом), зимние расходы повышены до 180–250 м³/с (в 3–4 раза выше естественных). Река превратилась из паводкоопасной в равномерно зарегулированный водоток.

5. Уровненный режим трансформирован аналогично: амплитуда колебаний уровней снизилась с 372 до 128 см (в 2,9 раза). Зимние уровни повысились на 210 см (ликвидация зимней межени), весенние пики снижены. Годовой ход уровня стал более равномерным: разница между зимними и летними уровнями сократилась со 115 до 40 см.

6. Боковая приточность наиболее значительна на участке между Юшкозерской и Кривопорожской ГЭС (около 48 % стока Кривопорожской ГЭС). Река Чирка-Кемь даёт около 34 % расхода Кеми на участке слияния, что делает её практически равнозначным притоком. На нижнем участке (Подужемская — Путкинская) боковая приточность очень мала (около 0 %).

7. Классификация лет по водности показала полное исчезновение маловодных лет ($Q \leq 180$ м³/с) в зарегулированный период. В естественном периоде такие годы составляли 8 % (3 года из 38). Это главный положительный эффект создания каскада — предотвращение рисков катастрофических маловодий.

8. Кривые обеспеченности подтверждают снижение изменчивости: кривые стали значительно более пологими, минимальные значения повышены, максимальные снижены. Разность между расходами при малой ($P \approx 5$

%) и высокой ($P \approx 95 \%$) обеспеченности сократилась с 240–260 м³/с в естественном режиме до 140–150 м³/с на Путкинской ГЭС.

9. Изменение уровней в створах ГЭС. Создание каскада привело к повышению уровней в верхних бьефах на 6,5–9,5 м. Наиболее значительный подъём (свыше 9 м) зафиксирован в створах Юшкозерской и Кривопорожской ГЭС, что обусловлено созданием здесь наиболее крупных водохранилищ.

10. Отношение C_s/C_v для естественного периода составляет –1,08, для Путкинской ГЭС — 3,25, для Юшкозерской — 7,23. Значительное превышение классического соотношения $C_s = 2 \times C_v$ на зарегулированных створах подтверждает, что распределение стока на реке с ГЭС сильно отличается от природного и имеет ярко выраженную положительную асимметрию.

Таким образом, строительство каскада ГЭС на реке Кемь привело к кардинальной трансформации гидрологического режима: естественный водоток с отрицательной асимметрией (преобладание маловодий) превратился в зарегулированную систему с положительной асимметрией (преобладание повышенных расходов) и значительно сниженной изменчивостью. Достигнуто 100-процентное использование гидроэнергетического потенциала реки — уникальный для Карелии случай.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В результате выполнения выпускной квалификационной работы на тему «Гидротехническое освоение реки Кемь и изучение её гидрологического режима» проведён комплексный анализ трансформации гидрологического режима реки под влиянием строительства каскада ГЭС и современных климатических изменений.

Физико-географическая характеристика бассейна показала, что высокие показатели озёрности (10–12 %) и заболоченности (до 30 %) территории создали уникальные условия естественной зарегулированности стока, что впоследствии определило успешность гидроэнергетического освоения. Анализ климатических данных метеостанции Кемь-порт за 1960–2025 гг. выявил устойчивый тренд потепления (рост среднегодовой температуры на 2,68 °C за 65 лет), причём наиболее интенсивно температуры растут в холодный период (0,0545 °C/год против 0,0315 °C/год летом). Осадки статистически значимых трендов не обнаружили, что позволяет рассматривать климатические изменения как дополнительный, но не определяющий фактор трансформации гидрологического режима.

Кемский каскад ГЭС включает шесть гидроэлектростанций суммарной мощностью 378 МВт и пять водохранилищ общей площадью более 230 км². Наиболее значимыми элементами каскада являются Юшкозерское водохранилище (объём 870 млн м³), осуществляющее многолетнее регулирование стока, и Кривопорожская ГЭС (180 МВт), работающая в пиковом режиме. Количественно оценены потери на испарение (101 млн м³/год, около 1,2 % годового стока) и ледовая аккумуляция (141 млн м³ в зимний период). На основе анализа многолетних рядов данных (1926–2000 гг.) установлено, что строительство каскада ГЭС привело к кардинальной трансформации гидрологического режима. Среднегодовой сток в нижнем бьефе повысился с 256 до 285 м³/с (+11

%), амплитуда колебаний стока сократилась с 285 до 182 м³/с, амплитуда уровней воды уменьшилась с 372 до 128 см (в 2,9 раза). Зимние уровни повысились на 210 см, что практически ликвидировало зимнюю межень.

Наиболее важным результатом статистического анализа стало выявление трансформации асимметрии распределения годового стока. В естественном режиме коэффициент асимметрии отрицательный ($C_s = -0,281$), что указывает на преобладание экстремально маловодных лет. После создания каскада знак асимметрии изменился на положительный: на Путкинской ГЭС $C_s = +0,505$, на Юшкозерской ГЭС $C_s = +1,830$. Особенно высокое значение C_s на Юшкозерской ГЭС объясняется резкими перепадами расхода между годами наполнения и сработки водохранилища. Отношение C_s/C_v для зарегулированных створов (3,25 и 7,23) значительно превышает классическое соотношение $C_s = 2 \times C_v$, что подтверждает техногенный характер распределения стока на реке с ГЭС.

Классификация лет по водности показала полное исчезновение маловодных лет ($Q \leq 180$ м³/с) в зарегулированный период — в естественном состоянии такие годы составляли 8 % от общего числа. Кривые обеспеченности подтвердили снижение изменчивости: разность между расходами при малой (5 %) и высокой (95 %) обеспеченности сократилась с 240–260 м³/с в естественном режиме до 140–150 м³/с на Путкинской ГЭС.

Практическая значимость работы заключается в том, что её результаты могут быть использованы для уточнения правил эксплуатации водохранилищ Кемского каскада, при планировании берегоукрепительных мероприятий (с учётом преобладающих западных и юго-западных ветров, усиливающих абразию восточных берегов), а также в учебном процессе при подготовке специалистов в области гидрологии и водного хозяйства. Выявленные тенденции роста зимних температур требуют дальнейшего мониторинга для своевременной корректировки режимов работы ГЭС в условиях меняющегося климата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агроклиматический справочник по Карельской АССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1959. — 183 с.
2. Атлас Карельской АССР / под ред. А.И. Крюкова. — М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1989. — 40 с.
3. Атлас Республики Карелия / под ред. В.В. Арсеньева. — Петрозаводск: Версо, 2021. — 48 с.
4. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том I. РСФСР. Выпуск 7. Бассейны рек западного побережья Белого моря. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 312 с.
5. Декларация безопасности гидротехнических сооружений Кемского каскада ГЭС. — СПб.: ПАО «ТГК-1», 2022. — 145 с.
6. Катричко О.А., Иванова Е.Н. Агрохимическая характеристика почв сельскохозяйственных земель Республики Карелия // Агрохимический вестник. — 2017. — № 4. — С. 23–27.
7. Красильников П.В., Платонова Е.А. Почвы Карелии: генезис, география, свойства. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. — 216 с.
8. Кратц К.О., Герасимовский В.И., Величко В.М. Геология Карельской АССР. — М.: Госгеолтехиздат, 1963. — 408 с.
9. Лукашов А.Д. Четвертичные отложения Карелии. — Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1980. — 192 с.
10. Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г. Кислотность почв таёжных экосистем северо-запада России // Почвоведение. — 2019. — № 5. — С. 567–580.

11. Правила использования водных ресурсов водохранилищ на реке Кемь (Юшкозерского, Кривопорожского, Подужемского, Путкинского). — СПб.: Ленводпроект, 2016. — 98 с.
12. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 2. Карелия и Северо-Запад. Часть 1 / под ред. В.А. Урываева. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 528 с.
13. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 2. Карелия и Северо-Запад. Часть 2 / под ред. В.А. Урываева. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 496 с.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики (за 1963–1970 гг. и весь период наблюдений). — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 380 с.
15. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики за 1971–1975 гг. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 412 с.
16. Свириденко Л.П. Протерозойский магматизм и металлогения Карельского региона. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. — 248 с.
17. Сводный том итогов по разработке СКИОВО бассейнов Балтийского моря. Книга 2. Ресурсы поверхностных и подземных вод. — М.: Росводресурсы, 2014. — 364 с.
18. Справочник по климату СССР. Выпуск 3. Карельская АССР. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — 256 с.
19. Сыстра Ю.Й. Геологическое строение и тектоника Карелии. — Л.: Наука, 1991. — 160 с.
20. Четвертичные образования Карелии (стратиграфия, палеогеография, геохронология) / под ред. Г.С. Бискэ. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. — 232 с.

Электронные ресурсы

21. Вода Magazine. В Карелии открыто новое месторождение питьевых подземных вод [Электронный ресурс] // Вода Magazine. — 2024. — Режим доступа: <https://voda-magazine.ru> (дата обращения: 20.05.2026).
22. Государственный водный реестр [Электронный ресурс] / Федеральное агентство водных ресурсов. — Режим доступа: <https://waterrf.ru> (дата обращения: 20.05.2026).
23. Петрозаводск ГОВОРИТ. В Карелии завершены поиски подземных вод для города Кемь [Электронный ресурс] // Петрозаводск ГОВОРИТ. — 2024. — Режим доступа: <https://ptzgovorit.ru> (дата обращения: 20.05.2026).
24. Погода и климат. Климатический мониторинг: метеостанция Кемь-Порт [Электронный ресурс] // Погода и климат. — Режим доступа: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 20.05.2026).
25. Подужемская ГЭС [Электронный ресурс] // ПАО «ТГК-1». — Режим доступа: <https://www.tgc1.ru/production/ges/poduzhetskaya-ges/> (дата обращения: 20.05.2026).
26. РБК Карелия. В Карелии нашли новое месторождение питьевой воды для Кеми [Электронный ресурс] // РБК Карелия. — 2024. — Режим доступа: <https://karelia.rbc.ru> (дата обращения: 20.05.2026).
27. ТГК-1. Кемский каскад ГЭС [Электронный ресурс] // ПАО «ТГК-1». — Режим доступа: <https://www.tgc1.ru/production/ges/kemskiy-kaskad-ges/> (дата обращения: 20.05.2026).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Исходные гидрометеорологические данные

Таблица А.1 — Среднегодовая и среднемесячная температура воздуха
на метеостанции Кемь-порт (1960–2025 гг.), °С

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год	холод- ный пе- риод	теп- лый пе- риод
1960	12,80	12,80	-6,50	0,80	5,10	9,90	7,10	3,80	8,30	-1,00	-4,20	5,20	1,00	-8,30	7,71
1961	7,40	-5,50	-3,50	-2,80	2,50	3,40	5,10	2,50	8,10	7,10	-2,00	8,40	2,40	-5,36	7,99
1962	7,70	-7,60	11,50	2,00	6,00	8,90	2,10	1,70	8,20	2,80	0,00	0,00	1,20	-7,36	7,39
1963	13,40	13,40	12,80	0,10	9,20	8,30	4,70	3,10	10,90	3,50	-3,10	8,20	0,70	10,18	8,54
1964	-6,30	10,80	-8,80	-2,00	4,50	1,60	5,10	3,20	7,80	4,40	-4,80	6,40	1,50	-7,42	7,80
1965	-8,90	13,00	-6,20	-0,80	2,40	2,10	2,90	2,40	9,60	2,20	-5,90	6,90	0,80	-8,18	7,26
1966	19,20	20,10	14,00	-5,00	4,70	9,40	4,10	2,00	6,10	0,60	-0,30	9,60	-1,80	12,64	5,99
1967	14,00	-8,80	-0,20	1,90	4,60	0,70	5,10	5,30	9,80	4,30	1,00	3,30	2,20	-7,06	8,81
1968	20,70	10,50	-4,50	-1,40	4,10	2,80	1,10	2,50	6,50	-1,40	-3,90	5,00	0,00	-8,92	6,31
1969	16,30	15,50	-8,70	-2,40	0,50	7,50	3,20	2,40	8,00	3,20	-2,10	9,40	-0,80	10,40	6,06
1970	10,80	15,90	-4,20	-2,00	3,30	3,50	5,70	3,50	9,20	2,90	-4,90	7,20	1,10	-8,60	8,01
1971	-6,70	12,20	-9,20	-2,40	3,10	7,60	3,40	3,50	7,40	0,30	-6,00	7,80	0,10	-8,38	6,13
1972	11,30	-9,00	-4,90	-0,60	3,30	1,10	7,20	6,10	8,10	3,00	-4,20	0,60	2,40	-6,00	8,31
1973	-9,10	-9,60	-5,50	0,60	6,50	3,80	5,60	3,40	5,90	-0,30	-6,40	0,20	1,20	-8,16	7,93
1974	10,70	-4,70	-2,70	-0,40	2,90	2,50	6,90	4,40	11,60	3,60	-2,90	1,30	3,30	-4,46	8,79
1975	-6,70	-7,80	-1,30	0,80	8,40	2,20	4,60	1,60	10,50	1,70	-1,60	7,20	2,90	-4,92	8,54
1976	14,40	11,70	-7,40	0,20	4,90	7,20	2,80	2,00	6,40	-1,40	-3,10	6,00	0,00	-8,52	6,01
1977	11,40	11,50	-6,00	0,00	5,90	2,30	4,70	2,10	7,40	0,60	-1,20	8,70	1,20	-7,76	7,57
1978	10,60	15,40	-5,80	-3,00	3,10	7,30	2,00	0,90	7,50	1,20	-2,80	6,60	-1,00	10,24	5,57
1979	13,20	13,00	-4,90	-5,00	7,80	0,80	2,90	3,00	8,70	0,70	-2,00	6,20	0,80	-7,86	6,99
1980	12,00	11,90	-8,30	-1,20	4,10	3,90	2,80	1,20	8,30	2,60	-7,60	0,30	0,10	10,02	7,39
1981	-7,10	11,40	-9,80	-2,10	4,60	0,90	5,20	2,60	8,20	4,80	-2,00	8,30	1,30	-7,72	7,74

1982	16,60	7,20	4,50	0,40	6,00	7,20	5,30	1,70	8,30	2,00	0,10	4,70	1,50	-6,58	7,27
1983	-6,60	10,60	-6,00	0,10	4,60	0,50	4,70	2,10	9,30	3,20	-6,90	9,00	1,30	-7,82	7,79
1984	9,80	-6,90	-6,10	0,60	8,80	2,10	4,40	1,70	8,10	2,80	-2,90	7,60	2,10	-6,66	8,36
1985	20,90	19,90	-4,80	-2,40	2,00	9,00	1,70	3,90	9,00	3,50	-4,20	4,80	-1,50	12,92	6,67
1986	14,60	14,20	-1,90	-0,40	5,20	3,40	3,90	0,90	5,70	3,40	0,60	2,40	0,80	-8,50	7,44
1987	16,50	12,80	-9,00	-1,90	4,40	9,60	2,10	9,90	8,00	6,00	-7,10	2,30	-0,80	11,54	6,87
1988	10,50	-9,30	-5,70	-2,80	5,00	0,30	5,80	3,30	9,60	3,20	-7,10	0,60	0,90	-8,64	7,77
1989	-7,00	-5,20	-0,80	1,70	9,00	5,00	5,60	3,30	9,50	1,70	-2,30	9,20	3,40	-4,90	9,40
1990	13,40	-0,90	-3,30	1,30	4,80	8,90	3,40	3,00	6,60	2,20	-6,80	4,60	1,80	-5,80	7,17
1991	10,30	10,00	-8,60	0,00	3,50	0,80	4,00	3,20	7,00	4,40	0,60	5,90	1,60	-6,84	7,56
1992	-7,80	-5,20	-1,40	-4,10	7,50	1,60	3,20	1,70	10,60	-3,30	-6,70	1,50	2,10	-4,52	6,74
1993	-7,30	-6,70	-3,80	-1,80	6,10	9,50	3,20	2,20	5,00	0,40	-6,90	9,40	0,90	-6,82	6,37
1994	10,70	13,00	-5,80	2,20	3,40	1,80	3,60	2,80	8,50	2,60	-4,20	5,00	1,40	-7,74	7,84
1995	-5,70	-6,00	-2,50	0,60	5,50	2,00	3,90	3,20	8,70	4,30	-6,20	1,90	2,20	-6,46	8,31
1996	-8,10	11,90	-5,80	-0,80	3,70	9,70	3,00	5,60	7,70	3,70	1,10	6,70	1,80	-6,28	7,51
1997	11,20	-8,80	-4,50	-2,40	3,40	1,30	4,00	5,00	9,10	1,00	-4,00	8,30	1,20	-7,36	7,34
1998	-8,40	18,10	-7,90	-3,70	4,50	9,50	3,80	1,70	8,40	3,60	-5,60	7,70	0,00	-9,54	6,83
1999	13,40	12,10	-6,00	1,30	0,30	3,30	5,50	2,10	10,20	5,00	-3,80	6,60	1,30	-8,38	8,24
2000	-8,80	-7,60	-4,00	1,90	6,50	2,40	5,00	3,10	8,70	6,60	-0,50	5,20	3,20	-5,22	9,17
2001	-4,90	11,40	10,20	1,10	4,20	0,90	6,60	2,60	10,00	2,40	-5,60	1,00	1,20	-8,62	8,26
2002	10,20	-6,00	-4,70	0,60	4,90	1,20	6,30	2,60	7,60	-0,20	-6,40	1,40	1,20	-7,74	7,57
2003	17,00	-6,20	-2,40	-1,20	7,00	7,10	6,80	4,30	10,00	3,10	-0,70	5,70	2,10	-6,40	8,16
2004	10,10	10,30	-4,60	-0,90	4,50	0,50	5,50	3,50	9,80	3,20	-3,80	5,40	1,80	-6,84	8,01
2005	-5,70	-9,10	-8,50	0,40	5,80	0,80	5,10	5,50	10,30	5,30	2,80	6,40	3,00	-5,38	9,03
2006	-9,50	13,50	-9,70	0,80	5,80	4,50	4,20	2,50	9,40	2,70	-2,60	1,90	1,90	-7,44	8,56
2007	-6,90	15,60	0,30	1,70	6,20	0,40	4,20	5,90	9,10	5,30	-2,50	1,20	3,10	-5,18	8,97
2008	-5,60	-4,80	-5,80	0,20	3,10	0,60	3,60	1,30	7,60	4,90	-0,30	2,10	2,70	-3,72	7,33
2009	-9,30	10,20	-5,40	-1,10	7,00	0,70	3,90	3,30	11,30	1,50	-0,90	8,30	1,90	-6,82	8,09
2010	14,00	12,80	-6,80	1,90	5,90	0,80	8,40	4,10	9,70	3,60	-4,50	2,90	1,10	10,20	9,20
2011	11,30	15,80	-4,10	2,70	7,20	2,90	6,20	3,40	10,10	5,30	-0,50	0,80	2,90	-6,50	9,69

2012	9,30	13,60	4,80	-0,30	8,00	1,10	5,50	2,90	9,60	3,50	-0,50	2,50	1,60	-8,14	8,61
2013	7,90	5,10	11,50	0,20	7,00	3,20	5,50	5,20	10,40	2,90	-0,60	3,70	3,00	-5,76	9,20
2014	9,30	3,30	1,00	1,40	5,90	9,60	5,40	5,60	10,50	1,20	-1,80	5,60	3,20	-4,20	8,51
2015	7,90	4,30	-0,20	1,20	8,10	1,90	1,30	3,60	11,40	3,70	-0,50	4,30	3,70	-3,44	8,74
2016	14,90	3,60	2,00	1,80	9,00	2,00	7,10	4,80	9,40	4,10	-3,10	4,50	3,30	-5,62	9,74
2017	6,10	7,30	2,10	-1,50	3,00	7,90	4,40	4,30	8,60	3,50	-0,20	3,60	2,60	-3,86	7,17
2018	5,80	9,50	9,40	0,70	9,10	1,50	6,10	5,80	10,60	3,40	0,80	6,10	3,10	-6,00	9,60
2019	10,00	6,40	3,90	2,60	5,80	2,50	1,40	2,50	9,10	1,90	-2,00	2,50	2,60	-4,96	7,97
2020	4,70	4,10	2,00	-0,10	5,70	3,70	5,30	3,70	10,50	5,30	1,00	3,80	4,20	-2,72	9,16
2021	9,70	16,00	4,90	2,50	6,50	5,50	6,70	3,70	7,80	4,60	-2,00	7,60	2,30	-8,04	9,61
2022	7,80	5,90	2,70	0,40	5,30	2,70	7,60	7,10	8,80	4,60	-2,00	5,60	3,50	-4,80	9,50
2023	4,40	6,90	6,00	-0,20	9,80	1,40	3,70	5,30	13,00	1,70	-4,60	8,50	2,90	-6,08	9,24
2024	11,60	8,40	1,90	-1,80	6,20	3,30	5,60	5,20	13,50	4,70	-0,50	5,00	3,30	-5,48	9,53
2025	7,90	5,40	2,30	1,20	6,20	1,30	5,20	4,70	12,40	5,80	-0,90	3,20	3,90	-3,94	9,54
сред.з нач	10,30	9,91	5,39	-0,31	5,35	1,12	4,58	3,29	8,95	2,87	-2,80	7,12	1,69	-7,10	7,98

Таблица А.2 — Среднегодовое и среднемесячное количество атмосферных осадков на метеостанции Кемь-порт (1960–2025 гг.), мм

год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	за год	хо- лод- ный пе- риод	теп- лый пе- риод
1960	29	27	3	1	22	106	43	17	97	20	30	9	404	20	44
1961	23	30	21	9	39	72	65	87	62	35	33	21	496	26	53
1962	23	13	11	55	29	71	84	52	36	36	29	21	459	19	52
1963	28	7	2	23	30	35	49	70	42	29	37	18	370	18	40
1964	17	15	2	18	39	48	53	36	49	16	28	22	343	17	37
1965	12	19	22	2	12	20	84	93	63	62	57	38	483	30	48
1966	15	26	34	35	37	50	62	103	52	50	38	30	531	29	56
1967	16	19	22	29	38	32	49	46	37	72	22	29	409	22	43
1968	13	18	25	25	27	73	53	71	45	60	26	25	459	21	51
1969	11	7	11	38	15	22	66	67	74	46	46	18	420	19	47
1970	26	19	5	60	29	27	53	67	138	50	21	29	523	20	61
1971	23	18	16	23	62	68	46	92	23	52	45	15	482	23	52
1972	8	14	15	41	30	67	56	67	51	45	47	20	459	21	51
1973	29	11	14	20	19	25	3	55	39	69	35	36	356	25	33

1974	30	29	8	5	28	75	24	59	46	50	54	36	443	31	41
1975	17	12	33	40	29	19	32	57	35	42	19	31	365	22	36
1976	27	4	20	18	23	109	68	89	82	21	64	49	572	33	59
1977	25	19	16	15	50	45	55	103	85	57	45	11	527	23	59
1978	24	10	39	38	7	13	80	80	68	61	60	28	507	32	50
1979	24	18	24	13	65	69	23	74	43	43	43	28	467	27	47
1980	23	19	11	30	15	21	8	44	27	43	55	37	331	29	27
1981	29	16	30	34	52	124	116	118	74	86	39	60	778	35	86
1982	19	10	20	31	35	70	27	64	30	41	66	23	436	28	43
1983	39	5	41	26	97	57	50	46	86	69	50	35	599	34	62
1984	40	6	45	19	28	21	87	82	20	91	25	17	478	27	50
1985	16	6	16	22	40	43	33	55	46	56	24	46	401	22	42
1986	19	5	9	23	41	12	30	68	105	39	54	17	422	21	45
1987	6	34	11	10	18	75	95	65	25	6	19	25	389	19	42
1988	11	30	23	47	44	29	51	87	42	27	28	53	472	29	47
1989	30	22	28	30	19	19	39	73	87	81	30	37	495	29	50
1990	43	26	24	22	19	57	100	28	21	35	41	33	448	33	40
1991	26	11	20	48	58	73	29	32	32	67	50	28	473	27	48
1992	10	21	34	46	31	25	69	64	65	51	34	18	467	23	50
1993	18	12	15	22	25	104	56	60	61	34	9	26	441	16	52
1994	31	9	25	47	85	56	12	52	111	67	51	28	573	29	61
1995	45	23	16	30	59	42	62	75	110	48	53	2	566	28	61
1996	8	13	8	20	63	54	101	15	17	29	48	72	448	30	43
1997	30	30	38	18	65	59	28	55	48	50	21	9	449	26	46
1998	36	35	22	10	53	92	63	51	63	74	43	21	562	31	58
1999	26	15	14	21	29	61	60	30	24	77	37	30	424	24	43
2000	37	21	28	22	24	51	45	39	41	47	30	23	406	28	38
2001	12	31	34	21	92	10	80	21	22	28	32	19	403	26	39
2002	37	37	20		68	44	55	44		42	42	32		34	51
2003	36	9	13	11	69	67	21	107	48	78	36	48	541	28	57
2004	30	20	23	8	50	52	28	91	52	24	27	19	424	24	44
2005	19	5	5	39	48	18	21	82	31	23	76	43	409	30	37
2006	22	7	31	26	44	71	58	61	124	68	63	42	614	33	65
2007	21	14	25	31	54	104	107	115	66	9	43	34	623	27	69
2008	43	29	17	28	63	50	105	137	23	83	73	25	675	37	70
2009	34	26	17	17	16	75	124	46	21	57	40	50	521	33	51
2010	11	28	38	22	39	68	31	32	81	59	46	29	483	30	47
2011	26	27	12	20	41	47	63	65	43	52	17	32	446	23	47
2012	28	25	16	43	84	91	150	190	48	90	43	30	836	28	99
2013	19	27	22	23	24	45	55	57	35	58	32	43	438	29	42
2014	30	28	34	14	56	43	76	40	57	40	45	51	513	38	47
2015	41	35	12	44	38	52	88	75	26	66	30	34	539	30	56
2016	31	28	16	30	8	49	119	90	34	18	49	36	509	32	50
2017	20	9	16	49	30	79	53	99	85	64	35	40	579	24	66
2018	38	15	19	26	13	104	21	69	95	62	14	25	501	22	56
2019	36	39	32	9	85	87	166	58	40	171	39	38	799	37	88

2020	27	39	31	37	11	34	67	105	58	87	45	29	570	34	57
2021	50	15	18	34	43	61	26	64	43	54	55	73	536	42	46
2022	43	43	23	26	40	56	35	40	60	24	32	45	465	37	40
2023	39	18	43	37	28	26	121	60	53	51	56	34	565	38	54
2024	23	28	15	94	21	43	55	34	11	36	46	33	438	29	42
2025	48	14	32	13	90	69	81	54	63	30	37	71	601	40	57
ср.зн ач	26	20	21	28	41	55	61	67	54	52	40	32	494, 8	28	51

Приложение Б. Гидрологические данные по реке Кемь (естественный режим)

Таблица Б.1 — Среднегодовые и среднемесячные расходы воды на посту «р. Кемь — ст. Подужемье» (1926–1963 гг.), м³/с

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднегодовой
1926	127	108	81	76	440	436	468	266	219	191	170	148	228
1927	158	112	94	83	483	766	461	296	286	243	193	149	277
1928	114	100	90	89	575	371	258	283	290	264	371	258	255
1929	206	172	121	93	509	565	311	245	371	389	362	269	301
1930	251	275	178	205	376	370	215	171	206	202	224	179	238
1931	145	110	69	68	580	745	639	437	472	392	357	261	356
1932	211	144	115	155	668	514	373	265	310	523	433	353	339
1933	229	172	138	146	476	526	500	420	254	238	308	231	303
1934	149	118	97	95	779	519	378	263	199	285	368	283	294
1935	189	141	107	118	427	714	345	249	274	558	545	370	336
1936	264	239	176	152	699	480	320	249	193	156	150	110	266
1937	95	85	84	168	428	403	220	158	133	189	185	132	190
1938	108	88	83	109	582	634	661	307	205	179	193	213	280
1939	148	122	107	91	267	282	230	198	170	174	160	147	175
1940	113	103	74	52	258	246	238	250	319	278	127	96	180
1941	107	81	69	60	202	438	271	173	191	168	119	94	164
1942	79	58	44	90	268	330	225	167	152	194	211	178	166
1943	145	126	108	196	943	670	350	269	234	254	248	204	312
1944	149	137	123	111	508	647	369	243	278	277	249	193	274
1945	155	147	128	117	490	726	583	280	282	272	26	155	280
1946	143	118	104	107	699	583	370	239	186	168	146	121	249
1947	102	90	80	110	412	280	186	141	117	107	92	65	149
1948	61	56	51	151	429	319	210	151	176	306	296	263	206
1949	183	133	112	223	561	462	403	430	410	399	432	263	334
1950	189	129	102	286	561	550	429	251	178	207	196	172	271
1951	140	116	86	220	644	583	468	292	201	196	159	142	271
1952	160	152	131	156	695	746	420	317	360	343	227	174	323
1953	132	109	97	243	600	504	329	514	425	344	260	189	312
1954	155	95	77	101	327	275	266	245	257	354	409	282	237
1955	220	166	130	112	587	789	458	289	219	241	303	169	307
1956	123	71	24	46	258	215	235	232	260	293	192	72	168
1957	82	84	66	76	577	592	505	324	363	407	316	162	296
1958	105	125	122	101	397	734	497	340	224	198	188	144	265
1959	145	128	101	76	382	269	220	147	128	124	91	63	156
1960	68	39	35	110	179	198	218	158	115	85	53	45	109
1961	32	39	46	49	418	609	470	430	469	337	278	127	275
1962	156	171	157	346	667	515	647	589	512	383	354	236	394
1963	157	159	119	117	349	253	207	126	138	228	200	198	188
ср.знач	145	121	98	129	492	496	367	274	257	267	242	182	256

Таблица Б.2 – Среднегодовые и среднемесячные уровни воды на посту
«р. Кемь – ст. Подужемье» (1943–1963 гг.), см

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Уро- вень, см
1943	75	55	36	76	318	241	149	118	101	111	108	126	126
1944	88	59	42	27	180	235	155	105	121	121	110	113	113
1945	88	87	49	36	192	256	217	122	124	125	131	98	127
1946	72	39	20	17	256	218	154	102	72	55	54	61	93
1947	37	25	12	24	171	121	71	28	16	-5	-24	-17	38
1948	-5	-11	-24	64	174	138	85	39	67	133	142	142	79
1949	109	86	52	99	212	184	166	173	168	165	178	147	145
1950	128	72	43	117	212	208	174	108	64	85	83	74	114
1951	70	42	21	77	232	215	183	125	82	78	64	61	104
1952	65	56	44	60	246	260	168	135	150	145	109	86	127
1953	56	43	19	87	222	196	142	198	173	147	120	108	126
1954	90	63	37	21	133	119	115	106	111	148	178	138	105
1955	122	91	67	43	207	272	180	124	96	126	151	164	137
1956	110	82	39	-1	111	100	105	105	116	140	139	91	95
1957	69	47	9	0	229	233	195	138	151	165	152	154	129
1958	118	88	64	31	150	266	207	152	102	95	95	91	122
1959	69	46	17	-8	164	120	101	63	61	4	30	4	56
1960	-10	-45	-42	15	76	83	99	80	65	6	-24	-38	22
1961	-45	-43	-42	-39	141	245	207	184	185	142	131	92	97
1962	156	171	157	346	667	515	647	589	512	383	354	236	394
1963	117	78	53	49	158	134	110	50	59	104	113	110	95
ср.знач	75	54	32	54	212	208	173	135	124	118	114	97	116

Таблица Б.3 – Амплитуда колебаний уровней воды на посту «р. Кемь
– ст. Подужемье» (1943–1963 гг.), см

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год	Max	Min	Ам- пли- туда
1943	75	55	36	76	318	241	149	118	101	111	108	127	126	318	36	282
1944	88	59	42	27	180	235	155	105	121	121	110	115	113	235	27	208
1945	88	87	49	36	192	256	217	122	124	125	131	98	127	256	36	220
1946	72	39	20	17	256	218	154	102	72	55	54	61	93	256	17	239
1947	37	25	12	24	171	121	71	28	16	-5	-24	-17	38	171	-24	195
1948	-5	-11	-24	64	174	138	85	39	67	133	142	142	79	174	-24	198
1949	109	86	52	99	212	184	166	173	168	165	178	147	145	212	52	160
1950	128	72	43	117	212	208	174	108	64	85	83	74	114	212	43	169
1951	70	42	21	77	232	215	183	125	82	78	64	61	104	232	21	211
1952	65	56	44	60	246	260	168	135	150	145	109	86	127	260	44	216
1953	56	43	19	87	222	196	142	198	173	147	120	108	126	222	19	203
1954	90	63	37	21	133	119	115	106	111	148	178	138	105	178	21	157
1955	122	91	67	43	207	272	180	124	96	126	151	164	137	272	43	229

1956	110	82	39	-1	111	100	105	105	116	140	139	91	95	140	-1	141
1957	69	47	9	0	229	233	195	138	151	165	152	154	129	233	0	233
1958	118	88	64	31	150	266	207	152	102	95	95	91	122	266	31	235
1959	69	46	17	-8	164	120	101	63	61	4	30	4	56	164	-8	172
1960	-10	-45	-42	15	76	83	99	80	65	6	-24	-38	22	99	-45	144
1961	-45	-43	-42	-39	141	245	207	184	185	142	131	92	97	245	-45	290
1962	156	171	157	346	667	515	647	589	512	383	354	236	394	667	156	511
1963	117	78	53	49	158	134	110	50	59	104	113	110	95	158	49	109

Приложение В. Гидрологические данные по реке Кемь (зарегулированный режим, пост Кемь)

Таблица В.1 – Среднемесячные и среднегодовые расходы воды на посту «р. Кемь – ст. Кемь» (1968–2000 гг.), м³/с

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1968	182	120	102	94	507	469	421	364	270	236	194	128	257
1969	141	121	97	101	448	408	262	203	229	366	283	210	239
1970	169	136	115	90	647	617	325	231	210	227	155	167	257
1971	152	115	116	146	668	585	355	275	221	277	315	245	289
1972	199	144	111	129	424	460	283	234	197	198	186	235	233
1973	204	181	133	162	590	546	294	168	149	141	121	117	234
1974	102	97	94	97	445	582	533	474	401	335	269	246	306
1975	236	199	166	176	797	481	257	182	156	187	166	131	261
1976	126	104	91	141	263	380	422	325	297	252	178	162	228
1977	146	130	115	160	533	483	310	339	312	333	379	267	292
1978	214	153	125	118	315	339	275	257	346	362	339	260	259
1979	202	159	136	118	626	526	399	322	281	314	348	240	306
1980	170	139	136	216	520	371	229	198	208	119	105	105	210
1981	109	109	91	103	459	720	748	588	623	511	327	244	386
1982	230	222	164	221	866	654	379	286	322	232	210	307	341
1983	206	207	174	357	676	783	406	255	238	276	295	258	344
1984	226	245	211	326	689	340	268	316	293	359	398	339	334
1985	259	215	170	161	473	359	267	252	250	267	232	198	259
1986	170	157	156	173	373	334	245	232	285	287	321	267	250
1987	232	208	186	162	331	301	441	487	489	347	238	210	303
1988	180	165	140	149	532	423	287	305	290	356	290	252	281
1989	206	179	200	386	866	449	286	173	195	251	294	238	310
1990	199	167	150	322	341	250	242	241	203	138	164	133	213
1991	115	93	69	254	390	375	380	301	221	228	265	266	246
1992	255	244	263	265	543	363	255	244	333	309	279	292	303
1993	263	212	174	190	575	460	379	332	420	303	263	238	317
1994	223	187	161	311	491	391	289	210	199	306	267	262	275
1995	238	237	203	317	567	515	370	253	289	328	301	234	321
1996	230	188	178	130	482	452	468	291	183	178	262	307	279
1997	264	227	249	195	720	490	357	248	216	270	244	221	308
1998	215	189	147	116	706	577	425	405	424	553	590	353	392
1999	327	268	227	385	413	379	282	185	160	227	246	263	280
2000	229	209	182	440	646	372	280	246	211	176	241	254	291
ср. знач	201	173	152	203	543	462	346	286	276	280	266	232	285

Таблица В.2 – Среднемесячные и среднегодовые уровни воды на посту «р. Кемь – ст. Кемь» (1968–2000 гг.), см

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1968								243	207	192	205	237	217
1969	335	288	229	205	280	253	205	173	191	256	218	226	238
1970	285	275	213	168	318	318	236	198	180	207	169	217	232
1971	237	206	220	206	326	319	248	210	184	224	268	247	241
1972	318	282	200	156	268	280	210	190	171	186	175	214	221
1973	255	270	223	154	313	302	214	159	137	134	141	189	208
1974	160	149	135	102	242	294	289	279	256	240	218	204	214
1975													
1976	259	184	165	160	205	260	264	229	212	191	167	162	205
1977													
1978	325	318	211	137	210	232	203	194	233	236	257	309	239
1979													
1980	210	264	220	229	288	238	180	164	168	95	107	144	192
1981	141	157	145	131	249	351	356	320	338	304	239	263	250
1982	321	312	239	236	397	342	257	221	239	198	182	260	267
1983	254	294	244	255	354	381	270	210	202	224	261	295	270
1984	355	345	289	278							326	327	320
1985	380	409	320	270	337	242	213	199	201	208	219	294	274
1986	306	240	227	200	245	223	191	184	216	216	230	253	228
1987	333	358	311	200	225	214	266	285	286	239	220	229	264
1988	295	285	239	174	294	265	212	224	218	241	246	277	248
1989	314	241	208	248	379	279	215	166	172	198	228	255	242
1990	283	215	179	224	232	201	195	193	179	161	174	190	202
1991	204	207	162	229	258	252	243	218	199	194	234	248	221
1992	285	244	229	211	303	238	198	196	220	220	222	245	234
1993	274	276	214	182	338	271	244	228	262	221	251	255	251
1994	274	321	254	246	281	247	211	176	168	193	212	213	233
1995	222	261	184	218	312	265	248	194	207	226	244	262	237
1996	268	275	271	180	284	278	278	211	167	172	198	263	237
1997	318	335	268	201	319	265	238	197	179	203	201	227	246
1998	215	259	212	166	322	288	254	251	269	304	304	266	259
1999	255	263	238	242	246	232	201	165	153	167	172	207	212
2000	234	244	205	263	353	235	198	175	161	154	186	224	219

Таблица В.3 – Амплитуда колебаний уровней воды на посту «р. Кемь – ст. Кемь» (1968–2000 гг.), см

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год	Max	Min	Ам-плитуда
1968								243	207	192	205	237	216,8	243	192	51
1969	335	288	229	205	280	253	205	173	191	256	218	226	238	335	173	162
1970	285	275	213	168	318	318	236	198	180	207	169	217	232	318	168	150

1971	237	206	220	206	326	319	248	210	184	224	268	247	241	326	184	142
1972	318	282	200	156	268	280	210	190	171	186	175	214	221	318	156	162
1973	255	270	223	154	313	302	214	159	137	134	141	189	208	313	134	179
1974	160	149	135	102	242	294	289	279	256	240	218	204	214	294	102	192
1975																
1976	259	184	165	160	205	260	264	229	212	191	167	162	205	264	160	104
1977																
1978	325	318	211	137	210	232	203	194	233	236	257	309	239	325	137	188
1979																
1980	210	264	220	229	288	238	180	164	168	95	107	144	192	288	95	193
1981	141	157	145	131	249	351	356	320	338	304	239	263	250	356	131	225
1982	321	312	239	236	397	342	257	221	239	198	182	260	267	397	182	215
1983	254	294	244	255	354	381	270	210	202	224	261	295	270	381	202	179
1984	355	345	289	278							326	327	320	355	278	77
1985	380	409	320	270	337	242	213	199	201	208	219	294	274	409	199	210
1986	306	240	227	200	245	223	191	184	216	216	230	253	228	306	184	122
1987	333	358	311	200	225	214	266	285	286	239	220	229	264	358	200	158
1988	295	285	239	174	294	265	212	224	218	241	246	277	248	295	174	121
1989	314	241	208	248	379	279	215	166	172	198	228	255	242	379	166	213
1990	283	215	179	224	232	201	195	193	179	161	174	190	202	283	161	122
1991	204	207	162	229	258	252	243	218	199	194	234	248	221	258	162	96
1992	285	244	229	211	303	238	198	196	220	220	222	245	234	303	196	107
1993	274	276	214	182	338	271	244	228	262	221	251	255	251	338	182	156
1994	274	321	254	246	281	247	211	176	168	193	212	213	233	321	168	153
1995	222	261	184	218	312	265	248	194	207	226	244	262	237	312	184	128
1996	268	275	271	180	284	278	278	211	167	172	198	263	237	284	167	117
1997	318	335	268	201	319	265	238	197	179	203	201	227	246	335	179	156
1998	215	259	212	166	322	288	254	251	269	304	304	266	259	322	166	156
1999	255	263	238	242	246	232	201	165	153	167	172	207	212	263	153	110
2000	234	244	205	263	353	235	198	175	161	154	186	224	219	353	154	199

Приложение Г. Приведение уровней поста Подужемье к «0» графика поста Кемь

Таблица Г.1 – Приведение среднегодовых уровней воды поста Подужемье к «0» графика поста Кемь (1943–1963 гг.), см

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год	мБС ст. Подужемье	мБС ст. Кемь	над "0" ст. Кемь
1943	75	55	36	76	318	241	149	118	101	111	108	127	126	20,30	1,44	44
1944	88	59	42	27	180	235	155	105	121	121	110	115	113	20,10	1,31	31
1945	88	87	49	36	192	256	217	122	124	125	131	98	127	20,30	1,45	45
1946	72	39	20	17	256	218	154	102	72	55	54	61	93	19,90	1,11	11
1947	37	25	12	24	171	121	71	28	16	-5	-24	-17	38	19,40	0,56	-44
1948	-5	-11	-24	64	174	138	85	39	67	133	142	142	79	19,80	0,97	-3
1949	109	86	52	99	212	184	166	173	168	165	178	147	145	20,40	1,63	63
1950	128	72	43	117	212	208	174	108	64	85	83	74	114	20,10	1,32	32
1951	70	42	21	77	232	215	183	125	82	78	64	61	104	20,00	1,22	22
1952	65	56	44	60	246	260	168	135	150	145	109	86	127	20,30	1,45	45
1953	56	43	19	87	222	196	142	198	173	147	120	108	126	20,20	1,44	44
1954	90	63	37	21	133	119	115	106	111	148	178	138	105	20,00	1,23	23
1955	122	91	67	43	207	272	180	124	96	126	151	164	137	20,40	1,55	55
1956	110	82	39	-1	111	100	105	105	116	140	139	91	95	19,90	1,13	13
1957	69	47	9	0	229	233	195	138	151	165	152	154	129	20,30	1,47	47
1958	118	88	64	31	150	266	207	152	102	95	95	91	122	20,20	1,40	40
1959	69	46	17	-8	164	120	101	63	61	4	30	4	56	19,50	0,74	-26
1960	-10	-45	-42	15	76	83	99	80	65	6	-24	-38	22	19,20	0,40	60
1961	-45	-43	-42	-39	141	245	207	184	185	142	131	92	97	20,00	1,15	15
1962	156	171	157	346	667	515	647	589	512	383	354	236	394	22,90	4,12	312
1963	117	78	53	49	158	134	110	50	59	104	113	110	95	19,90	1,13	13

Таблица Г 2 – Приведенные уровни воды за январь месяц ст. Подужемье к «0» графика ст. Кемь

Год	Месяц	мБС ст. Подужемье	мБС ст. Кемь	над "0" ст. Кемь
1943	75	19,70	0,93	-7
1944	88	19,90	1,06	6
1945	88	19,90	1,06	6
1946	72	19,70	0,90	-10
1947	37	19,40	0,55	-45
1948	-5	18,90	0,13	-87
1949	109	20,10	1,27	27
1950	128	20,30	1,46	46
1951	70	19,70	0,88	-12
1952	65	19,60	0,83	-17

1953	56	19,60	0,74	-26
1954	90	19,90	1,08	8
1955	122	20,20	1,40	40
1956	110	20,10	1,28	28
1957	69	19,70	0,87	-13
1958	118	20,20	1,36	36
1959	69	19,70	0,87	-13
1960	-10	18,90	0,08	-92
1961	-45	18,50	-0,27	-127
1962	156	20,60	1,74	74
1963	117	20,20	1,35	35

Таблица Г 3 – Приведенные уровни воды за июнь месяц ст. Подужемье к «0» графика ст. Кемь

Год	Месяц	мБС ст. Подужемье	мБС ст. Кемь	над "0" ст. Кемь
1943	241	21,4	2,59	159
1944	235	21,3	2,53	153
1945	256	21,6	2,74	174
1946	218	21,2	2,36	136
1947	121	20,2	1,39	39
1948	138	20,4	1,56	56
1949	184	20,8	2,02	102
1950	208	21,1	2,26	126
1951	215	21,1	2,33	133
1952	260	21,6	2,78	178
1953	196	21,0	2,14	114
1954	119	20,2	1,37	37
1955	272	21,7	2,90	190
1956	100	20,0	1,18	18
1957	233	21,3	2,51	151
1958	266	21,7	2,84	184
1959	120	20,2	1,38	38
1960	83	19,8	1,01	1
1961	245	21,4	2,63	163
1962	515	24,1	5,33	433
1963	134	20,3	1,52	52

Таблица Г 4 – Приведенные уровни воды за октябрь месяц ст. Подужемье к «0» графика ст. Кемь

Год	Месяц	мБС ст. Подужемье	мБС ст. Кемь	над "0" ст. Кемь
1943	111	20,10	1,29	29

1944	121	20,20	1,39	39
1945	125	20,20	1,43	43
1946	55	19,50	0,73	-27
1947	-5	18,90	0,13	-87
1948	133	20,30	1,51	51
1949	165	20,60	1,83	83
1950	85	19,80	1,03	3
1951	78	19,80	0,96	-4
1952	145	20,40	1,63	63
1953	147	20,50	1,65	65
1954	148	20,50	1,66	66
1955	126	20,30	1,44	44
1956	140	20,40	1,58	58
1957	165	20,60	1,83	83
1958	95	19,90	1,13	13
1959	4	19,00	0,22	-78
1960	6	19,10	0,24	-76
1961	142	20,40	1,60	60
1962	383	22,80	4,01	301
1963	104	20,00	1,22	22

Приложение Д. Гидрологические данные по ГЭС Кемского каскада
(зарегулированный период)

Таблица Д.1 – Среднегодовые расходы воды на Путкинской ГЭС
(1968–2000 гг.), м³/с

№	Год	Q, м³/с	№	Год	Q, м³/с
1	1968	257	18	1985	259
2	1969	239	19	1986	250
3	1970	257	20	1987	303
4	1971	289	21	1988	281
5	1972	233	22	1989	310
6	1973	234	23	1990	213
7	1974	306	24	1991	258
8	1975	261	25	1992	303
9	1976	228	26	1993	317
10	1977	292	27	1994	275
11	1978	259	28	1995	321
12	1979	306	29	1996	279
13	1980	210	30	1997	308
14	1981	386	31	1998	392
15	1982	341	32	1999	280
16	1983	344	33	2000	291
17	1984	334			

Таблица Д.2 – Среднегодовые расходы воды на Юшкозерской ГЭС
(1982–2000 гг.), м³/с

№	Год	Q м³/с	№	Год	Q м³/с
1	1982	135	11	1992	134
2	1983	131	12	1993	117
3	1984	217	13	1994	109
4	1985	104	14	1995	112
5	1986	89.9	15	1996	104
6	1987	114	16	1997	120
7	1988	99.3	17	1998	147
8	1989	145	18	1999	121

9	1990	210	19	2000	118
10	1991	87.6			

Таблица Д.3 – Среднегодовые расходы воды на Подужемской ГЭС
(1983–2000 гг.), м³/с

№	Год	Q м³/с	№	Год	Q м³/с
1	1983	341	10	1992	296
2	1984	321	11	1993	315
3	1985	241	12	1994	280
4	1986	239	13	1995	327
5	1987	290	14	1996	289
6	1988	281	15	1997	321
7	1989	304	16	1998	407
8	1990	211	17	1999	284
9	1991	246	18	2000	285

Таблица Д.4 – Среднегодовые расходы воды на Кривопорожской
ГЭС (1991–2000 гг.), м³/с

№	Год	Q м³/с
1	1991	202
2	1992	249
3	1993	269
4	1994	232
5	1995	261
6	1996	232
7	1997	256
8	1998	318
9	1999	238
10	2000	242

Таблица Д.5 – Боковая приточность между створами Юшкозерской и Кривопорожской ГЭС (1991–2000 гг.)

Год	Расход Юшкозерской ГЭС (Qверх), м³/с	Расход Кривопорожской ГЭС (Qниж), м³/с	Боковая приточность (Qбок = Qниж – Qверх), м³/с
1991	87,6	202	114
1992	134	249	115
1993	117	269	152
1994	109	232	123
1995	112	261	149
1996	104	232	128
1997	120	256	136
1998	147	318	171
1999	121	238	117
2000	118	242	124
Среднее	117	250	133

Приложение Е - Условные обозначения

Е1. - Тектоническая карта Карелии



Приложение Е2.- Геологическая карта Карелии

ФАНЕРОЗОЙ (< 0,54)			
Палеозой	Карбон (0,36–0,3)	1	Песчаники, глины, доломиты, известняки
	Девон (0,48–0,36)	2	Песчаники, конгломераты, глины
ПРОТЕРОЗОЙ (2,5–0,54)			
Неопротерозой	Венд (0,64–0,54)	3	Песчаники, глины, алевролиты, аргиллиты, туффиты, конгломераты
	Верхний и средний рифей (1,35–0,64)	4 ☆ 4i	Аргиллиты, песчаники Импактиты (1,08)
Мезопротерозой	Нижний рифей (1,65–1,35)	5 5v ☆ 5i	Аркозовые песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты, базальты, андезибазальты (1,45) Габбродолериты, монзониты, сиениты, аплиты, базальты (1,46) Граниты рапакиви (1,63–1,55), литий-фтористые граниты, анортозиты
Палеопротерозой	Вепсий (1,8–1,65)	6 6v 6av	Красноцветные и сероцветные кварцитопесчаники, конгломераты, аргиллиты Габбродолериты, долериты (1,77–1,75) Монцогаббро, сиениты, калиевые граниты (1,81–1,77) 6y Граниты (1,79)
	Калевий (1,92–1,8)	7 7m 7g 7v 7y	Песчаники, алевролиты, кварциты, аргиллиты, углеродистые сланцы Кристаллические сланцы, биотитовые гнейсы 7E Эклогиты Гранулиты, энтербиты, чарнокиты (1,88) 7v Пироксениты, габбро, монзониты (1,89–1,88) Диориты, тоналиты 7y Монцодиориты, гранодиориты, граниты (1,87) Калиевые граниты, граниты, пегматиты (1,86–1,8)
	Людиковий (2,1–1,92)	8 8mv	Базальты, пикриты, андезибазальты, габбродолериты, шунгиты, песчаники, сланцы, конгломераты, доломиты 8av Перидотиты, габбро (1,98–1,96) Феррогаббро, пироксениты, оливиниты, нефелиновые сиениты, карбонатиты (2,0)
	Ятулий (2,3–2,1)	9	Кварцитопесчаники, кварциты, конгломераты, доломиты, соли, базальты, габбродолериты
	Сариолий + Сумий (2,5–2,3)	10 10v 10y 11	Конгломераты, песчаники, кварциты, аркозы, сланцы, коматитовые базальты (2,41), андезибазальты, дациты, риолиты (2,44) Расслоенные интрузивы (2,51–2,40), перидотиты, пироксениты, нориты, габбро, диориты Чарнокиты, граниты (2,43–2,42) Архейские образования, интенсивно переработанные в палеопротерозое
АРХЕЙ (3,8–2,5)			
Неоархей	(2,7–2,6)	12y	Гранодиориты, граниты (2,69–2,67)
	(2,8–2,7)	13g	Гранулиты
		13	Метаосадки, железистые кварциты и метавулканы разного состава
		13y	Санукитоиды (2,75–2,72)
Мезоархей	(3,0–2,8)	13y	Нерасчлененные гранитоиды 13E Эклогитсодержащие комплексы
		13py	Нерасчлененные тоналиты, трондьемиты, гранодиориты архея (3,0–2,75)
		14	Метаосадки, вулканы (коматиты, базальты, андезиты, дациты, риолиты) (2,88–2,83 и 2,99–2,92) и частично интрузивы перидотитов и габброидов
		14	Парагнейсы 14y Граниты, палеограниты
Палеоархей	(3,2–2,8)	15va 15py	Интрузивы ультрамафитов и мафитов, диориты (2,99–2,85) Древнейшие ТТГ и амфиболиты (3,3–2,9)
Палеоархей		☆ 16	Неоконтурные участки ТТГ, содержащие цирконы с возрастом >3,2

ПРИМЕЧАНИЕ

Цифры в скобках — возраст пород в млрд лет

Контурные геологических образований под водоемами показаны штриховой



Палеопротерозойские (итатюль) строматолиты *Paralellophyton raigubicum* Mak., 1983 на спиле (оз. Сундозеро). Фото П. В. Медведева



Архейские шаровые базальты (район г. Костомукша). Фото А. И. Слабунова



Древнейшие (палеоархейские) мигматизированные ТТГ-гнейсы Карелии (д. Водла). Фото А. И. Слабунова

Приложение ЕЗ.- Карта четвертичных отложений Карелии

