МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Прогноз притока в Колымское водохранилище по материалам гидрометеорологических наблюдений**

Исполнитель Шевченко Роман Владимирович
(фамилия, имя, отчество)

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

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«1» июня 2026г.

Санкт–Петербург
2026

Оглавление

Введение....4
Глава 1. Физико-географическое описание района исследований....8
1.1. Климатические характеристики (осадки, температура, испарение и пр.)....8
1.2. Гидрологический режим притока в Колымское водохранилище....9
1.3. Уровенный режим Колымского водохранилища....11
1.4. Исходные данные для расчетов и прогнозов притока воды в водохранилище 13
Глава 2. Математический аппарат....16
2.1. Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдача из него....16
2.2. Математическая модель формирования стока....17
2.3. Методика прогноза притока воды в Колымское водохранилище....19
2.3.1. Общая схема параметризации моделей....19
2.3.2. Калибровка параметров модели формирования снегозапасов....20
2.3.3. Калибровка параметров модели склонового стока....21
2.3.4. Перенос параметров на неосвещенную наблюдениями площадь....22
2.3.5. Интеграция моделей и расчет суммарного притока....23
2.4. Оценка оправдываемости и эффективности гидрологических прогнозов…24
2.4.1. Общие принципы оценки качества прогнозов....24
2.4.2. Метод оценки эффективности ГГИ....25
2.4.3. Метод оценки эффективности ГМЦ (Гидрометцентра России)....26
2.4.4. Критерий эффективности Нэша–Сатклифа (NSE)....27
2.4.5. Обоснование выбранного критерия для настоящей работы....29
Глава 3. Математическое моделирование притока в Колымское водохранилище 30
3.1. Моделирование и прогнозирование снегозапасов и водоотдачи на водосборе Колымского водохранилища....30
3.2. Восстановление расходов воды на реке Кулу по функции $Q=f(H)$....32
3.2.1. Постановка задачи восстановления расходов воды....32
3.2.2. Источники исходных данных и построение кривой $Q=f(H)$....33
3.2.3. Восстановление ряда расходов воды за период 2014–2021 гг....34
3.2.4. Обоснование применимости зависимости $Q=f(H)$, построенной по данным 1988 года....34

3.2.5. Результаты восстановления расходов воды.....35
3.3. Моделирование и прогнозирование стока рек на водосборе Колымского водохранилища.....36
3.3.1. Исходные данные и общая схема расчета.....36
3.3.2. Калибровка параметров модели стока.....37
3.3.3. Результаты калибровки и осреднение параметров.....38
3.3.4. Расчет стока для неосвещенных территорий.....40
Глава 4. Прогноз притока в Колымское водохранилище.....41
4.1. Разработка алгоритма прогноза притока.....41
Глава 4.2. Апробация прогностической методики и оценка прогноза на независимом материале.....47
4.2.1. Общие принципы оценки качества прогнозов.....47
4.2.3. Оценка качества модели формирования склонового стока (пост на р. Детрин).....48
4.2.4. Оценка прогноза притока в Колымское водохранилище за 2016 год.....49
4.2.5. Общее заключение об эффективности методики.....51
Заключение.....52
Список использованных источников.....56
Приложения.....57

Введение

Актуальность темы исследования. Колымское водохранилище является ключевым элементом энергосистемы северо-востока России, обеспечивая работу Колымской ГЭС и выработку электроэнергии в условиях высокогорного субарктического региона. Водосборная площадь водохранилища составляет 61 500 км² и расположена в зоне многолетней мерзлоты, где гидрологический режим характеризуется крайней неравномерностью внутригодового распределения стока: 94–99% годового объёма воды проходит в тёплый период (май–октябрь), а зимние месяцы отличаются минимальным стоком. Весеннее половодье, формируемое преимущественно за счёт талых вод снежного покрова, и летние дождевые паводки определяют нагрузку на водохозяйственный комплекс и требуют заблаговременного и точного прогноза притока воды к створу гидроузла.

В последние десятилетия климат района Верхней Колымы претерпевает значительные изменения: фиксируется рост весенних температур, приводящий к более раннему началу снеготаяния и сдвигу пика половодья, а также увеличение сумм осадков в летне-осенний период, что повышает частоту и интенсивность дождевых паводков. Эти изменения усиливают неопределённость гидрологических прогнозов и требуют модернизации методик прогноза притока, адаптированных к современным климатическим условиям и специфике мерзлотных территорий.

Особую сложность представляет дефицит гидрометрических наблюдений на водосборе: из общей площади 61 500 км² непосредственными измерениями стока охвачены лишь реки Кулу (10 300 км²) и Детрин (3 400 км²). Остальная территория (47 800 км²) не имеет прямых наблюдений за расходами воды. Кроме того, на реке Кулу в период 2014–2021 гг. отсутствовали измерения расходов воды, имелись только данные об уровнях. В связи с этим разработка методики прогноза притока, основанной на параметрических моделях формирования снегозапасов и склонового стока, с учётом пространственной неоднородности

водосбора и дефицита наблюдательной сети, является актуальной научно-практической задачей.

Цель работы – разработка и реализация методики прогноза притока воды в Колымское водохранилище по материалам гидрометеорологических наблюдений, основанной на параметрических моделях формирования снегозапасов и склонового стока, с учётом специфики водосбора в зоне многолетней мерзлоты и дефицита гидрометрической информации.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

- Выполнить физико-географическую характеристику района исследований, включая климатические условия, гидрологический режим притока и уровенный режим Колымского водохранилища, а также оценить влияние климатических изменений на формирование стока.
- Разработать математический аппарат моделирования: параметрическую модель формирования запасов воды в снеге и водоотдачи, а также модель склонового стока для трансформации водоподачи в расход воды.
- Обосновать методику прогноза притока, включающую выделение зон водосбора, калибровку параметров моделей по реперным водосборам (Кулу и Детрин), перенос параметров на неосвещённую площадь по принципу гидрологического подобия и интеграцию моделей в единый алгоритм прогноза суммарного притока.
- Реализовать восстановление ряда расходов воды на реке Кулу по функции $Q=f(H)$ на основе данных гидрологического ежегодника за 1988 год для обеспечения калибровки модели стока в условиях отсутствия прямых измерений расходов в период 2014–2021 гг.
- Провести моделирование притока в Колымское водохранилище за 2016 год, реализовать алгоритм прогноза в двух вариантах параметризации (по коэффициентам 2016 г. и по осреднённым за 2014–2020 гг.) и получить гидрографы притока по всем четырем зонам водосбора.

Оценить оправдываемость и эффективность разработанной методики прогноза с использованием критерия ГМЦ (S/σ_{Δ}).

Объект исследования – приток воды в Колымское водохранилище каскада Колымской ГЭС.

Предмет исследования – методы и модели прогнозирования притока воды в Колымское водохранилище по данным гидрометеорологических наблюдений, включая модели формирования снегозапасов, склонового стока и их интеграцию в алгоритм оперативного прогноза.

Методы исследования. В работе использованы: физико-географический анализ территории; параметрическое водно-балансовое моделирование формирования снегозапасов и водоотдачи; моделирование склонового стока на основе линейного дифференциального уравнения с численной аппроксимацией по схеме Эйлера; методы решения обратных задач (калибровка параметров) путём минимизации погрешности прогноза; статистические методы оценки качества гидрологических прогнозов (критерий ГМЦ S/σ_{Δ}); методы восстановления рядов расходов воды по кривой $Q=f(H)$.

Исходные данные. Информационную базу составили: метеорологические данные (температура, осадки, запасы воды в снеге) по данным ВНИИГМИ-МЦД, RP5 и extremeclimate.ru (включая метеостанции Сусуман, Колымская водно-балансовая станция и Усть-Омчуг); гидрологические данные по рекам-притокам (Кулу, Детрин, Аян-Юрях, Берелёх, Омчук) из АИС ГМВО и гидрологических ежегодников РГГМУ/ГГИ; водохозяйственные данные по Колымскому водохранилищу (уровни, приток, сбросы) с сайта ПАО «РусГидро».

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Разработана интегрированная параметрическая методика прогноза притока в Колымское водохранилище, объединяющая модель формирования снегозапасов и модель склонового стока в единый алгоритм, адаптированный к условиям дефицита гидрометрических наблюдений и пространственной неоднородности водосбора.

- Предложен подход к восстановлению ряда расходов воды на реке Кулу по функции $Q=f(H)$, построенной по данным гидрологического ежегодника за 1988 год, что позволило обеспечить калибровку модели стока в условиях отсутствия прямых измерений расходов в современный период.
- Реализован перенос параметров модели стока на неосвещённую наблюдениями территорию (47 800 км²) с стратификацией по левобережной и правобережной частям бассейна и использованием различных метеорологических рядов и наборов параметров для каждой зоны.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- Разработанная методика прогноза притока может быть использована диспетчерской службой Колымской ГЭС для оперативного планирования режимов работы гидроузла, обеспечения выработки электроэнергии и снижения рисков наводнений в нижнем бьефе.
- Полученные калиброванные параметры моделей (k_f, k_t, k, τ) для бассейнов рек Кулу и Детрин могут быть использованы в дальнейших исследованиях гидрологического режима Верхней Колымы и при моделировании стока в условиях многолетней мерзлоты.
- Восстановленный ряд расходов воды на реке Кулу за период 2014–2021 гг. дополняет гидрологическую информацию о водосборе и может быть использован в качестве основы для последующих исследований и прогнозов.
- Методика может быть адаптирована для других водохранилищ северо-востока России с аналогичными условиями (мерзлота, дефицит наблюдений, выраженное снеговое питание).

Глава 1. Физико-географическое описание района исследований

1.1. Климатические характеристики (осадки, температура, испарение и пр.)

Колымское водохранилище расположено на территории Магаданской области, в верхнем течении реки Колыма, в пределах субарктического климатического пояса, характеризующегося резко выраженной континентальностью, холодной продолжительной зимой и коротким умеренно тёплым летом. Водосборная площадь водохранилища составляет 61 500 км², и для этой области типичен холодный, сухой климат. Важнейшей особенностью района является повсеместное распространение многолетних мерзлых пород, играющих роль водоупора и определяющих специфику гидрологических процессов. Наличие сквозных талико в долинах водотоков создает условия для взаимодействия поверхностных и подземных вод.

Для характеристики климата были проанализированы данные многолетних наблюдений на метеостанции Сусуман, расположенной в бассейне водохранилища. Среднегодовая температура воздуха в районе бассейна Колымы за последние десятилетия составляет порядка −10…−12 °C, зимние месяцы сопровождаются сильными морозами, нередко доходящими до −40…−50 °C, а летний период характеризуется умеренными температурами и относительно небольшой продолжительностью. Важно отметить, что во второй половине XX и начале XXI века климат региона претерпевает значительные изменения, которые согласуются с общемировыми трендами потепления, особенно ярко проявляющимися в Арктике и Северо-Восточной Азии. Этот фактор оказывает прямое влияние на формирование стока. Инструментальные наблюдения фиксируют:

- **Рост температуры воздуха:** повышение весенних температур (что будет отображено в третьей главе) приводит к более раннему началу таяния снега и увеличению стока в мае.
- **Увеличение количества осадков:** зафиксировано увеличение сумм осадков в летне-осенний период, что напрямую сказывается на величине и частоте дождевых паводков.

Годовой ход осадков в бассейне Колымы носит преимущественно снеговой характер: основная масса осадков выпадает в виде снега в осенне-зимний период, а летние осадки представлены дождями, интенсивность которых в последние годы возрастает на фоне проявления климатических изменений. Общегодовое количество осадков в среднем составляет 300–400 мм, включая запасы воды в снеге, что обусловливает значительную роль снегового запаса в формировании речного стока. Испарение с поверхности рек и водоемов в летний период относительно невелико из-за низких температур и высокой влажности воздуха, поэтому увлажнённый режим и высокий снежный запас создают благоприятные условия для формирования высокого весеннего и летнего притока. Многолетние экспериментальные данные, полученные на Колымской водно-балансовой станции (1948–1997 гг.), включают наблюдения за испарением с почвы и снежного покрова и являются уникальной базой для анализа процессов в условиях горной мерзлоты.

1.2. Гидрологический режим притока в Колымское водохранилище

Гидрологический режим рек бассейна Верхней Колымы характеризуется крайне неравномерным внутригодовым распределением стока, что типично для территорий с муссонным климатом и многолетней мерзлотой. Приток в Колымское водохранилище формируется за счёт речного стока реки Колыма и её притоков, водосборная площадь которых составляет около 61 500 км², а среднемноголетний речной сток оценивается в 14,2 км³/год. Гидрологический режим реки Колыма и, как следствие, притока в Колымское водохранилище характеризуется выраженным снеготаянием и частично дождевым типом с доминирующим весенне-летним половодьем.

Основная масса воды (94–99%) проходит в теплую часть года (май–октябрь), в то время как в зимние месяцы сток минимален или отсутствует. Второй квартал года (апрель–июнь) является самым многоводным, давая 45% годового объема стока, главным образом за счет талых вод. Весеннее половодье начинается в первой половине мая и продолжается до конца июня – начала июля, при этом значительная часть годового стока проходит через водохранилище

именно в этот период. Гидрограф половодья часто имеет пилообразную форму и нередко сливается с последующими дождевыми паводками, что затрудняет прогнозирование. В летний период, в условиях интенсивного снеготаяния и дождевых паводков, фиксируются наиболее высокие расходы воды, которые могут резко возрастать при выпадении сильных осадков и требуют корректировки режима работы гидроузла. С середины июня по сентябрь проходят дождевые паводки, в среднем от одного до пяти за сезон. Они носят резкий, кратковременный характер и могут формировать экстремально высокие расходы воды. В осенне-зимний период сток существенно снижается и формируется в основном за счёт подземного питания и ледникового стока меньших речных систем, поэтому приток в водохранилище в этот период относительно стабилен и незначителен. Зимняя межень, когда реки переходят на грунтовое питание, длится со второй половины октября до начала мая.

Река Колыма формируется слиянием крупных истоков – рек Кулу и Аян-Юрях, берущих начало на склонах Халканского хребта и Охотско-Колымского нагорья, в условиях высокогорного и субарктического климата. В верхнем и среднем течении к основному руслу Колымы присоединяются крупные притоки, среди которых особое значение для формирования притока в Колымское водохранилище имеют реки Берелёх, Детрин и Омчук, вносящие существенный вклад в суммарный речной сток.

Река Берелёх является одним из крупных левых притоков Колымы с длиной около 239 км и площадью водосбора порядка 9810 км². Водосбор реки расположен в пределах горно-таёжной зоны с субарктическим климатом, характеризующейся значительными запасами снега и холодной продолжительной зимой, что обусловливает выраженный снеготающий и частично дождевой тип стока. Высокий удельный сток в период весеннего и летнего половодья делает Берелёх существенным фактором формирования притока в Колымское водохранилище, особенно при интенсивном снеготаянии и ливневых осадках.

Река Детрин относится к крупнейшим правым притокам Колымы, впадающим в её верхнее-среднее течение; её длина составляет около 222 км, площадь водосбора – порядка 6450 км². Территория водосбора представлена холмисто-горным рельефом с широким распространением многолетнемёрзлых пород, что обусловливает смешанный тип питания (снеговое, дождевое и подземное) и повышенную роль подземного компонента стока. Высокая изменчивость годового стока Детрина, обусловленная сочетанием снеготаяния и интенсивных осадков, приводит к значительному вкладу данной реки в общую вариабельность притока в Колымское водохранилище, особенно в периоды летних дождевых паводков.

Река Омчук является одним из правых притоков Колымы, формирующих сток в верхней части бассейна, и также вносит заметный вклад в формирование общего речного стока, поступающего в Колымское водохранилище. Водосбор реки расположен в предгорных и горных районах с повышенной озёрностью и сильно выраженной мерзлотностью, что способствует усилению роли снеготаяния и подземного питания в водном балансе. Приток с бассейна Омчука проявляется особенно в весенне-летний период, когда сочетаются интенсивное таяние горного снега и периодические дождевые события, что обусловливает значимость реки как одного из элементов, влияющих на динамику и объём притока в Колымское водохранилище.

Таким образом, реки Колыма с её основными истоками (Кулу и Аян-Юрях) и крупными притоками (Берелёх, Детрин, Омчук) представляют собой ключевые элементы формирования притока в Колымское водохранилище, а их гидрологические характеристики и сезонный ход стока определяют необходимость их учёта при разработке прогнозных моделей притока по данным гидрометеорологических наблюдений.

1.3. Уровенный режим Колымского водохранилища

Уровенный режим Колымского водохранилища является полностью зарегулированным и определяется не только естественным притоком, но и режимом работы гидроузла. Колымское водохранилище является крупным регулирующим водохранилищем каскада Колымской ГЭС, где нормальный подпорный уровень (НПУ) установлен на отметке 450,6 м над уровнем моря, а минимально допустимый уровень в зимний период принят на отметке 432,0 м. После ввода в эксплуатацию Колымской ГЭС (с 1988 года) гидрологический режим как самого водохранилища, так и реки Колымы ниже плотины претерпел кардинальные изменения.

Управление уровенным режимом осуществляется в соответствии с «Правилами использования водных ресурсов» и указаниями Федерального агентства водных ресурсов (Росводресурсы). Регулирование направлено на решение комплекса задач, включая обеспечение выработки электроэнергии, защиту от наводнений и поддержание судоходных условий. В результате гидроэнергетического регулирования уровень водохранилища изменяется в течение года в пределах 12–18 м, что обеспечивает запас воды для круглогодичной выработки электроэнергии и регулирования сбросов в нижний бьеф.

Внутригодовой цикл колебаний уровня воды подчинен диспетчерскому графику и экономическим потребностям. Основные черты современного уровенного режима таковы:

Зимняя сработка: в холодное время года (ноябрь–апрель) при сокращении притока и увеличении ледовой задержки части стока уровень водохранилища последовательно снижается до минимально допустимых отметок. Для обеспечения стабильной работы ГЭС производятся попуски воды, что приводит к значительному увеличению зимнего стока ниже плотины.

Весенне-летнее наполнение: в период половодья и дождевых паводков (май–сентябрь) водохранилище аккумулирует избыток воды, что ведет к повышению его уровня. Наиболее высокие уровни воды наблюдаются именно в

этот период, когда интенсивный приток сочетается с ограничением сбросов во избежание затоплений нижележащих участков р. Колыма.

Снижение максимальных уровней в нижнем бьефе: за счет регулирования максимальные расходы воды и, соответственно, уровни весеннего половодья и сильных дождевых паводков ниже ГЭС статистически значимо снизились.

В период прохождения высоких паводков приоритет отдается борьбе с наводнениями. Хорошим примером является недавняя паводковая ситуация августа 2025 года, когда из-за обильных дождей приток в водохранилище за четверо суток вырос более чем в три раза. Для снижения уровня воды и минимизации рисков для населенных пунктов в Магаданской области и Якутии сбросные расходы были плавно увеличены до 7500 м³/с и выше, что позволило «срезать» пик паводка на 30% за счет аккумулирующей емкости водохранилища.

Таким образом, уровенный режим Колымского водохранилища носит выраженный сезонно-регулируемый характер и тесно связан с ходом притока и режимом работы гидроузла. Он является ключевым инструментом, с помощью которого естественный гидрограф притока трансформируется в искусственный гидрограф сбросов, отвечающий требованиям водохозяйственного комплекса и безопасности, что определяет важность анализа этой связи при построении прогнозных моделей притока.

1.4. Исходные данные для расчетов и прогнозов притока воды в водохранилище

Информационной базой для выполнения прогнозных расчетов послужили фондовые и оперативные материалы гидрометеорологических наблюдений, полученные из верифицированных государственных и корпоративных источников. Весь массив использованных данных можно условно разделить на три блока: метеорологический, гидрологический (по притокам) и водохозяйственный (по водохранилищу).

Метеорологические данные, характеризующие условия формирования стока на водосборе, были получены с сайта ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр

данных» (ВНИИГМИ-МЦД, http://meteo.ru) [1]. В их состав вошли ряды среднемесячных и экстремальных температур воздуха, суточные суммы атмосферных осадков, а также характеристики снежного покрова – высота и запасы воды в снеге – по материалам маршрутных снегосъёмок на опорных метеостанциях региона, в частности на метеостанции Сусуман.

В качестве дополнительного источника оперативной метеоинформации использовались данные, полученные с ресурса RP5 (https://rp5.ru), разработанного и поддерживаемого ООО «Расписание погоды» (г. Санкт-Петербург) [2]. С этого ресурса были выгружены архивы погоды, включая срочные данные о температуре и осадках, что позволило заполнить отдельные пропуски в основных рядах наблюдений. Особую ценность данный источник представил в части данных по двум метеостанциям, отсутствовавшим в открытом доступе на meteo.ru, а именно: метеостанции Колымская водно-балансовая и метеостанции Усть-Омчуг. Кроме того, ресурс Rp5 использовался для уточнения координат и высотных отметок указанных метеостанций.

Информация о географическом положении (координатах) метеостанций была верифицирована и дополнена по материалам специализированного ресурса «Климатические данные для климатического обслуживания» (http://extremeclimate.ru), разработанного и поддерживаемого ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [3]. Данный ресурс послужил справочным источником для уточнения точного местоположения, высот над уровнем моря и периодов действия гидрометеорологических постов, задействованных в анализе.

Гидрологические данные по рекам-притокам, формирующим сток в Колымское водохранилище, были получены из двух источников. Основу составили материалы Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) – официального веб-справочника, агрегирующего наблюдения на гидрологических постах и станциях, подведомственных Росгидромету [8]. Из этой системы были выгружены многолетние ряды среднемесячных и характерных расходов воды по замыкающим створам

основных притоков: Детрин, Кулу, Аян-Юрях, Берелёх и Омчук. Для верификации и углубления временных рядов, особенно за более ранние периоды (до 2000-х годов), привлекались фондовые материалы государственных гидрологических ежегодников, полученные в библиотеках Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) и Государственного гидрологического института (ГГИ).

Водохозяйственные данные по самому объекту исследования – Колымскому водохранилищу – были взяты с официального сайта энергетического холдинга РусГидро (https://www.rushydro.ru). В состав этой выборки вошли ежедневные и среднемесячные данные об уровнях воды в верхнем и нижнем бьефах гидроузла, суммарном притоке к створу ГЭС и общих сбросных расходах (включая расходы через гидроагрегаты и, при их открытии, через холостые водосбросы), отражающие фактический режим регулирования.

Совокупность полученных из перечисленных источников данных послужила основой для последующего статистического анализа и построения прогнозных моделей. Схема расположения используемых гидрометеорологических постов и створов в пределах водосбора Колымского водохранилища представлена на рисунке 1.4.1.

Глава 2. Математический аппарат

2.1. Модель формирования запасов воды в снеге и водоотдача из него

Для целей прогноза притока в Колымское водохранилище в период весеннего половодья ключевым звеном является оценка запасов воды в снежном покрове к моменту начала снеготаяния, а также интенсивности водоотдачи из снега. Бассейн Верхней Колымы характеризуется суровой многоснежной зимой (ноябрь – март) и дружным коротким весенним половодьем, когда температура воздуха резко переходит через 0°C. В таких условиях модели, основанные только на температуре и осадках, показывают высокую эффективность, поскольку испарением и жидкими осадками в период снегонакопления можно пренебречь либо учесть их интегрально.

Цель разработки модели. Предложена параметрическая модель формирования снегозапасов, предназначенная для расчета максимальных запасов воды в снеге и оценки водоотдачи при положительных температурах. Модель решает две основные задачи:

Накопление снега: в холодный период твердые осадки (снег) аккумулируются, формируя снежный покров, при этом часть их теряется (испарение, выдувание, сублимация), что учитывается коэффициентом потерь k_f.

Снеготаяние (водоотдача): в периоды оттепелей и весной при положительных температурах часть снежного покрова тает, что описывается произведением температурного коэффициента k_t на сумму положительных температур.

Таким образом, модель позволяет по ежедневным данным об осадках и температуре воздуха восстановить динамику снегозапасов и рассчитать водоотдачу – объем воды, поступающей в речную сеть при снеготаянии.

Математическая постановка. Согласно [2, 3], изменение запаса воды в снеге S (мм водного эквивалента) за каждый i-й день описывается линейным балансовым уравнением:

$$S_i = \sum_{i=1}^{m} (k_f \cdot X_i) - k_t \cdot t_i^{+¿,(2.1)¿}$$

где:

- S_i – запас воды в снежном покрове на i-й день (мм);
- X_i – количество твердых осадков, выпавших в i-й день (мм водного эквивалента);
- $t_i^{+¿¿}$ – положительная среднесуточная температура воздуха в i-й день ($t_i^{+¿=t_i¿}$ при $t_i>0$, и 0 при $t_i \leq 0$), °C;
- k_f – безразмерный коэффициент потерь при снегонакоплении (учитывает испарение, выдувание, сублимацию; $0<k_f \leq 1$);
- k_t – температурный коэффициент снеготаяния (водоотдачи), мм/°C (показывает, сколько миллиметров водного эквивалента тает при повышении температуры на 1°C за сутки).

Физический смысл уравнения (2.1): накопленный снегозапас на текущий день равен сумме всех твердых осадков за холодный период (с учетом потерь) минус объем воды, уже отдавшийся в реку за время оттепелей.

Численная аппроксимация (дискретная форма для расчетов). В ежедневном режиме, когда необходимо отслеживать динамику снегозапасов шаг за шагом, уравнение (2.1) удобно записать в рекуррентной (итерационной) форме. Пусть S_{i-1} – запас воды в снеге на конец предыдущего $(i-1)$ дня. Тогда на начало i-го дня к этому запасу добавляются выпавшие твердые осадки (с учетом потерь), а если температура положительная – происходит убыль за счет таяния:

$$S_i = S_{i-1} + k_f \cdot X_i - k_t \cdot t_i^{+¿.(2.1)¿}$$

2.2. Математическая модель формирования стока

Для решения задачи краткосрочного прогноза притока воды в Колымское водохранилище ключевым звеном является преобразование слоя выпавших осадков в объем воды, поступающий в речную сеть (склоновый сток). В гидрологии этот процесс часто описывается с помощью моделей "емкостного" типа, предполагающих, что водосборный бассейн рассматривается как единое целое

(сосредоточенные параметры), а запаздывание сигнала имитируется временем добегания.

Цель разработки модели. Уравнение, представленное в практикуме [1] и скорректированное согласно классическим представлениям (стр. 16), разработано для трансформации входного сигнала (интенсивности осадков $\dot{X}$) в выходной гидрограф (Q) с учетом двух ключевых эффектов:

Трансформация (фильтрация): Бассейн сглаживает пики осадков; мгновенный ливень дает растянутый во времени подъем воды.

Запаздывание (лаг): Пик стока наступает не сразу после дождя, а спустя некоторое время (τ), необходимое воде, чтобы дойти от самых удаленных точек склона до замыкающего створа.

Математическая постановка. С учетом того, что коэффициент стока k (безразмерная величина, $0<k<1$) применяется непосредственно к осадкам, а не к массе воды в бассейне, уравнение баланса массы "емкости" (склонового хранилища) записывается в виде линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dQ}{dt}=\frac{-Q}{\tau}+\frac{k\dot{X}}{\tau}, \quad (2.2)$$

где Q – расход воды в замыкающем створе ($м^3$/с); $\dot{X}$ – интенсивность осадков, формирующих сток (мм/сут или $м^3$/сут); k – коэффициент стока (доля осадков, идущая на формирование паводка); τ – время релаксации (добегания), характеризующее инерционность водосбора (сут).

Физический смысл уравнения (2.2): изменение расхода $\frac{dQ}{dt}$ – это разность между поступлением воды со склонов ($k\dot{X}/\tau$) и убыванием воды из русловой сети за счет спада (Q/τ).

Численная аппроксимация (конечно-разностная схема). Для реализации модели на ЭВМ и интеграции ее в систему прогноза притока к Колымскому водохранилищу необходимо перейти от непрерывной формы (1.1') к дискретной.

Используя простейшую явную схему Эйлера (производная dQ/dt заменяется конечными разностями), при шаге по времени Δt (например, 1 час) получаем:

$$\frac{Q_{i+1}-Q_i}{\Delta t}=\frac{-Q_i}{\tau}+\frac{k\,\dot{X}_i}{\tau}.$$

После приведения подобных членов расчетное уравнение для нахождения расхода на следующем шаге Q_{i+1} по известным значениям на текущем шаге Q_i и осадкам $\dot{X}_i$ принимает вид:

$$Q_{i+1}=Q_i\cdot\left(1-\frac{\Delta t}{\tau}\right)+\frac{k\,\Delta t}{\tau}\cdot\dot{X}_i. \quad (2.2)$$

Гидрологическая интерпретация для Колымского водохранилища. Для условий Верхней Колымы (бассейн с многолетней мерзлотой, быстрые дождевые паводки) параметры k и τ имеют решающее значение.

Параметр k (Коэффициент стока): в условиях малой испаряемости и слабой инфильтрации из-за вечной мерзлоты значения k для летне-осенних дождей близки к высоким значениям $(0.7-0.9)$ по сравнению с южными регионами.

Параметр τ (Время релаксации): характеризует скорость сработки склоновых запасов. Чем круче склоны и чем меньше залесенность бассейна, тем меньше τ и тем быстрее река откликается на осадки.

2.3. Методика прогноза притока воды в Колымское водохранилище

2.3.1. Общая схема параметризации моделей

Прогноз притока воды в Колымское водохранилище выполнялся на основе двух последовательно сопряженных моделей, описанных в главах 2.1 и 2.2:

Модель формирования снегозапасов (глава 2.1) – для расчета накопления снега за холодный период и водоотдачи при снеготаянии;

Модель склонового стока (глава 2.2) – для трансформации талых вод (и жидких осадков) в расход воды в замыкающих створах.

Обе модели являются параметрическими, т. е. требуют задания коэффициентов, характеризующих физические свойства водосбора: k_f и k_t (модель снегозапасов), k и τ (модель стока). Эти коэффициенты не могут быть измерены непосредственно и определяются путем решения обратной

задачи (калибровки) по данным гидрометеорологических наблюдений на реперных участках.

Площадь водосбора Колымского водохранилища составляет $F_{общ}=61500$ км². При этом непосредственными гидрометрическими наблюдениями освещена лишь часть бассейна, соответствующая замыкающим створам двух основных притоков – рек Кулу и Детрин. Остальная территория (неосвещенная площадь) не охвачена прямыми измерениями стока, что требует переноса калиброванных параметров с реперных водосборов по принципу гидрологического подобия.

2.3.2. Калибровка параметров модели формирования снегозапасов

Для определения коэффициентов k_f (потери при снегонакоплении) и k_t (температурный коэффициент снеготаяния) использовались данные метеорологических станций, расположенных в пределах бассейна или в гидрологически сходных условиях.

Решение обратной задачи выполнялось по следующему алгоритму:

Сбор исходных данных для каждого зимнего сезона:

ежедневные значения температуры воздуха t и твердых осадков X по данным метеостанции;

фактические запасы воды в снеге S по данным маршрутных снегосъемок (на конец февраля – март).

Численное моделирование снегозапасов по уравнению (2.2):

$$S_i = S_{i-1} + k_f \cdot X_i - k_t \cdot t_i^{+}$$

с начальным условием $S_0=0$ на дату устойчивого перехода температуры через 0°С к отрицательным значениям.

Подбор параметров минимизацией среднеквадратического отклонения расчетных S_i от фактических снегосъемочных значений (например, методом наименьших квадратов или процедурой «поиск решения»).

В силу малого количества метеорологических станций в пределах водосбора Колымского водохранилища (особенно в его верховьях и горной части) **принимается допущение, что калиброванные значения k_f и k_t инвариантны по всей площади водосбора**. Данное допущение основано на относительной однородности ландшафтно-климатических условий бассейна (континентальный климат, многолетняя мерзлота, преимущественно лиственничные редколесья) и является стандартным в практике гидрологического прогнозирования для территорий с недостаточной наблюдательной сетью.

2.3.3. Калибровка параметров модели склонового стока

Для модели стока, изложенной в главе 2.2, определение параметров – коэффициента стока k и времени релаксации (добегания) τ – выполнялось по данным гидрологических постов в замыкающих створах рек Кулу и Детрин.

Реперный водосбор – река Кулу (створ гидропоста).

Площадь водосбора в замыкающем створе составляет $F_{\text{Кулу}} = 10300$ км². Для этого створа имеется многолетний ряд наблюдений за:

- расходами воды $Q(t)$ в период весеннего половодья;
- осадками $X(t)$ (по ближайшей метеостанции);
- восстановленной по модели (2.1) водоотдачей из снега.

Решение обратной задачи для уравнения модели стока (2.3) выполнялось путем варьирования параметров k и τ в заданных диапазонах с минимизацией выбранного критерия качества (например, отношения среднеквадратической погрешности модели к среднеквадратическому отклонению измерений S/σ, либо максимизацией числа оправдавшихся прогнозов P). В результате были получены оптимальные значения параметров для данного водосбора.

Реперный водосбор – река Детрин (створ гидропоста). Площадь водосбора составляет $F_{\text{Детрин}} = 3400$ км². Калибровка выполнялась аналогично, с использованием данных гидропоста и привязанной к нему метеостанции. Получены собственные оптимальные значения k и τ, отражающие

гидрологическую специфику этого бассейна (морфометрию, уклон склонов, залесенность и др.).

2.3.4. Перенос параметров на неосвещенную наблюдениями площадь

Общая площадь водосбора Колымского водохранилища ($F_{общ}=61500$ км²) складывается из:

$$F_{общ}=F_{Кулу}+F_{Детрин}+F_{неосв},$$

где:

- $F_{Кулу}=10300$ км² (освещена постом на р. Кулу);
- $F_{Детрин}=3400$ км² (освещена постом на р. Детрин);
- $F_{неосв}=61500-10300-3400=47800$ км² – площадь, не освещенная прямыми гидрометрическими наблюдениями.

Вся эта неосвещенная территория была разделена на две крупные части по принципу принадлежности к левобережной или правобережной части бассейна Колымы относительно основного русла:

Обоснование выбора метеостанций:

Для левобережной части (площадью 33296 км²) в качестве источника данных об осадках и температуре использовалась **метеостанция Сусуман (№ 24790)**.

Для правобережной части (14390 км²) использовалась та же метеостанция, что и для поста на р. Детрин.

Таким образом, **неосвещенная площадь не рассматривалась как единое целое, а была стратифицирована по гидрологическому подобию**, что позволило применить различные наборы параметров модели стока и, что важно, различные ряды метеорологических данных для расчета входного сигнала $\dot{X}(t)$.

2.3.5. Интеграция моделей и расчет суммарного притока

Прогноз притока в Колымское водохранилище выполнялся по следующей схеме:

Для **каждой выделенной зоны** (левый берег, правый берег, а также отдельно для освещенных постов Кулу и Детрин) рассчитывалась водоотдача из снега ΔW_i по модели главы 2.1 с едиными параметрами k_f и k_t, но с использованием **своих метеорологических данных** (температура, твердые осадки).

Полученная водоотдача (т. е. слой талой воды, поступившей со склонов) подавалась на вход модели склонового стока (глава 2.2) в качестве «эффективных осадков» $\dot{X}$. Для каждой зоны использовались **свои параметры** k и τ, определенные по соответствующему реперному водосбору (левый берег – параметры Кулу, правый берег – параметры Детрина).

Модель склонового стока давала расчетный гидрограф $Q(t)$ для каждой зоны, который затем суммировался с учетом времени добегания от зоны до створа водохранилища (поправка на расстояние).

Суммарный приток в водохранилище определялся как:

$$Q_{\text{сум}}(t) = Q_{\text{Кулу}}(t) + Q_{\text{Детрин}}(t) + Q_{\text{лев. берег}}(t) + Q_{\text{прав. берег}}(t).$$

Примечание: приток от самой реки Колымы выше водохранилища, если ее створ не охвачен наблюдениями, распределяется между левобережной и правобережной зонами пропорционально их площадям с соответствующей параметризацией.

Предложенная методика позволяет, несмотря на дефицит гидрометрической информации (лишь два гидрологических поста на площади 61500 км²), получить оперативный прогноз притока с учетом пространственной неоднородности бассейна как по климатическим условиям (разные метеостанции), так и по гидрологическим характеристикам стока (разные параметры моделей для левого и правого берегов).

2.4. Оценка оправдываемости и эффективности гидрологических прогнозов

2.4.1. Общие принципы оценки качества прогнозов

Любой прогноз, независимо от метода его получения, должен быть подвергнут объективной оценке на предмет его точности и надежности. В гидрологической практике сложилось два взаимосвязанных, но различных понятия: **оправдываемость отдельного прогноза** и **эффективность методики прогнозирования** в целом.

Под **оправдываемостью** понимается факт соответствия предсказанного значения фактически наблюденному в пределах некоторой допустимой погрешности $\delta_{\text{доп}}$. Прогноз считается оправдавшимся, если абсолютная величина его погрешности не превышает этой допустимой величины [источник: практикум «Гидрологические прогнозы», стр. 5–6].

Под **эффективностью методики** понимается способность метода обеспечивать достаточно точные прогнозы на репрезентативном материале поверочных расчетов. Эффективность оценивается статистическими критериями, среди которых наиболее распространенными являются критерии, разработанные в **Государственном гидрологическом институте (ГГИ)** и в **Гидрометцентре России (ГМЦ)**, а также широко используемый в международной практике **критерий Нэша–Сатклифа**.

Ниже рассматриваются эти три подхода.

2.4.2. Метод оценки эффективности ГГИ

В основе метода ГГИ лежит сравнение **обеспеченности методики** (P) с так называемой **природной обеспеченностью** ($P_{\text{прир}}$) [источник: практикум «Гидрологические прогнозы», стр. 7].

Расчетная амплитуда A_p определяется как сумма положительных и отрицательных изменений прогнозируемого элемента за период заблаговременности, имеющих 2,5%-ную и 97,5%-ную обеспеченность соответственно:

$$A_p = \Delta H_a + \Delta H_b,$$

где ΔH_a – изменение уровня воды, обеспеченность которого на 2,5% меньше максимальной (для положительных ΔH), а ΔH_b – то же для отрицательных изменений.

Допустимая погрешность по методу ГГИ принимается равной 20% от расчетной амплитуды:

$$\delta_{\text{доп}} = \frac{1}{5} A_p .$$

Обеспеченность методики P вычисляется как процент оправдавшихся прогнозов от общего числа выпущенных:

$$P = \frac{n_{\text{опр}}}{n} \cdot 100\,\%,$$

где $n_{\text{опр}}$ – число прогнозов, погрешность которых не превысила $\delta_{\text{доп}}$, а n – общее число прогнозов.

Природная обеспеченность $P_{\text{прир}}$ представляет собой обеспеченность так называемых «природных прогнозов» – гипотетических предсказаний, основанных на предположении о неизменности уровня воды в период заблаговременности (т. е. в качестве прогноза принимается значение уровня на дату выпуска). Эта величина служит своеобразным «естественным фоном», нижней границей, ниже которой методика заведомо неэффективна.

Критерий эффективности методики по ГГИ: методика считается эффективной, если обеспеченность методики превышает природную обеспеченность:

$$P > P_{\text{прир}} .$$

2.4.3. Метод оценки эффективности ГМЦ (Гидрометцентра России)

В отличие от подхода ГГИ, основанного на сравнении обеспеченностей, метод ГМЦ опирается на **сравнение средней квадратической погрешности прогнозов с изменчивостью прогнозируемой величины** за период заблаговременности [источник: практикум «Гидрологические прогнозы», стр. 6–7].

Средняя квадратическая погрешность поверочных прогнозов S вычисляется по формуле:

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{\phi,i}-Y_{\text{пр},i}\right)^2}{n-m}},$$

где:

- $Y_{\phi,i}$ и $Y_{\text{пр},i}$ – фактическое и предсказанное значения;
- n – число членов ряда (прогнозов);
- m – число параметров в прогностическом уравнении (при линейной зависимости $m=2$).

В качестве меры изменчивости прогнозируемой величины используется **среднее квадратическое отклонение ее изменений за период заблаговременности** (σ_Δ):

$$\sigma_\Delta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1}\left(\Delta H_i-\Delta' H\right)^2}{n-2}},$$

где ΔH_i – изменение уровня за период заблаговременности (например, суточное), а $\Delta' H$ – среднее значение этих изменений.

Основным критерием эффективности методики по ГМЦ служит **отношение** S/σ_Δ. Чем меньше это отношение, тем более точной является методика по сравнению с простым учетом естественной изменчивости процесса.

Критерий эффективности методики по ГМЦ (первый вариант):

$$\frac{S}{\sigma_\Delta} \le \text{пороговое значение}.$$

Пороговые значения зависят от объема выборки:

- при $n \le 15$: $S/\sigma_\Delta \le 0{,}70$;
- при $15 < n \le 25$: $S/\sigma_\Delta \le 0{,}75$;
- при $n > 25$: $S/\sigma_\Delta \le 0{,}80$.

Допустимая погрешность отдельного прогноза по методу ГМЦ определяется через среднеквадратическое отклонение изменений прогнозируемой величины:

$$\delta_{\text{доп}} = \pm 0{,}674\ \sigma_\Delta.$$

Коэффициент 0,674 соответствует вероятности 50% при нормальном распределении погрешностей.

2.4.4. Критерий эффективности Нэша–Сатклифа (NSE)

Наряду с традиционными подходами ГГИ и ГМЦ, в современной гидрологической практике широкое распространение получил **критерий эффективности Нэша–Сатклифа** (Nash–Sutcliffe Efficiency, NSE), предложенный в 1970 году. Данный критерий также основан на сравнении дисперсии ошибок прогноза с дисперсией наблюденных значений, но имеет более наглядную шкалу.

Формула критерия Нэша–Сатклифа:

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_{\mathrm{obs},i} - Q_{\mathrm{sim},i})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{\mathrm{obs},i} - \acute{Q}_{\mathrm{obs}})^2},$$

где:

$Q_{\mathrm{obs},i}$ – фактически наблюденный расход воды;

$Q_{\mathrm{sim},i}$ – рассчитанный (прогнозный) расход;

$\acute{Q}_{\mathrm{obs}}$ – средний наблюденный расход за период;

n – число временных шагов.

Интерпретация значений NSE :

NSE = 1 – идеальное совпадение модели и наблюдений (совершенный прогноз);

NSE > 0,8 – отличное качество модели (excellent);

0,6 < NSE ≤ 0,8 – очень хорошее качество (very good);

0,4 < NSE ≤ 0,6 – хорошее качество (good);

0,2 < NSE ≤ 0,4 – удовлетворительное качество (satisfactory);

NSE ≤ 0,2 – неудовлетворительное качество (insufficient);

NSE = 0 – модель дает прогноз не лучше, чем использование среднего значения;

NSE < 0 – модель хуже, чем простое осреднение (прогноз неприемлем).

Основным преимуществом критерия Нэша–Сатклифа является его наглядность и широкий диапазон применения в международных исследованиях. Недостатком можно считать повышенную чувствительность к выбросам (экстремальным значениям расхода), что иногда требует использования логарифмической версии критерия (NSE_{log}).

2.4.5. Обоснование выбранного критерия для настоящей работы

В настоящей работе для оценки эффективности разработанной методики прогноза притока в Колымское водохранилище используется **критерий ГМЦ**, а именно отношение S/σ_{Δ}. Данный выбор обусловлен следующими соображениями:

1. Критерий S/σ_{Δ} является регламентированным для оперативных гидрологических прогнозов на территории Российской Федерации и позволяет сопоставлять полученные результаты с нормативными требованиями.
2. В отличие от критерия ГГИ, требующего построения кривых обеспеченности и определения расчетной амплитуды A_p, метод ГМЦ более формализован и менее подвержен субъективизму при интерпретации.
3. По сравнению с критерием Нэша–Сатклифа, метод ГМЦ имеет четкие пороговые значения, учитывающие объем выборки, что особенно важно при ограниченных рядах наблюдений.
4. Отношение S/σ_{Δ} напрямую характеризует, во сколько раз средняя квадратическая погрешность прогноза меньше естественной изменчивости прогнозируемого процесса, что наглядно демонстрирует практическую ценность разработанной методики.

Таким образом, оценка эффективности прогностической методики в данной работе производится на основе расчета величины S/σ_{Δ} и последующего сравнения ее с нормативными порогами, установленными для соответствующего объема выборки.

Глава 3. Математическое моделирование притока в Колымское водохранилище

3.1. Моделирование и прогнозирование снегозапасов и водоотдачи на водосборе Колымского водохранилища

Для оценки притока талых вод в период весеннего половодья ключевым звеном является расчет водоотдачи из снежного покрова (снеготаяния) и водоподачи (суммарного поступления воды на водосбор). Верификация модели выполнялась по данным метеостанции Сусуман (№ 24790), репрезентирующей левобережную часть неосвещенной площади водосбора.

1. Определение периода устойчивой зимней аккумуляции

Первым этапом является фиксация дат устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °C. Согласно методике, описанной в работе Хаустова с соавторами [Хаустов и др., 2019], эти даты определяются по интегральной (кумулятивной) кривой температур (метод последовательного суммирования).

Дата устойчивого перехода к отрицательным температурам соответствует моменту, с которого начинается устойчивое накопление снежного покрова. До этой даты выпадающие осадки (в том числе твердые) не формируют стабильного снежного покрова, так как периоды оттепелей еще возможны. Дата устойчивого перехода к положительным температурам знаменует начало активного снеготаяния и водоотдачи.

Таким образом, период устойчивой зимней аккумуляции ограничен двумя датами перехода: от первого устойчивого минуса до первого устойчивого плюса.

2. Верификация модели накопления снегозапасов

Расчет динамики запасов воды в снеге (S_i) выполнен по уравнению, представленному в Главе 2.1 (Модель формирования снегозапасов):

$$S_i = S_{i-1} + k_f \cdot X_i - k_t \cdot t_i^{+¿¿}$$

Исходными данными для расчета послужили ежедневные значения температуры воздуха и твердых осадков, а также фактические снегосъемочные данные на метеостанции Сусуман.

Далее выполнялось сравнение расчетных кривых с фактическими данными маршрутных снегосъемок. Верификация модели показала, что подобранные параметрыk_f (коэффициент потерь) и k_t (температурный коэффициент снеготаяния) удовлетворительно описывают динамику накопления и убыли снежной массы на рассматриваемой территории (Рисунок 3.1).

3. Расчет водоотдачи и водоподачи

Водоотдача ($W_{\text{тал}}$) представляет собой объем талой воды, поступающей из снежного покрова в почву и русловую сеть. Логика расчета водоотдачи основана на балансе запасов: в период устойчивого снеготаяния (при t>0) количество отдаваемой воды равно разности между снегозапасами предыдущего и текущего дня:

$$W_{\text{тал},i} = max\left(0, S_{i-1} - S_i\right)$$

Вспомогательным показателем, характеризующим общее поступление влаги на водосбор, является водоподача ($W_{\text{вод}}$). В отличие от водоотдачи, водоподача учитывает не только таяние накопленного снега, но и жидкие осадки ($X_{\text{жидк}}$), выпадающие в теплый период (которые сразу поступают в сток или инфильтрацию):

$$W_{\text{вод},i} = W_{\text{тал},i} + X_{\text{жидк},i}$$

Для наглядности процесса ниже приведен условный фрагмент расчета (см. Рисунок 3.1), иллюстрирующий взаимосвязь температуры, осадков и полученных характеристик.

Дата	t, °C	X, мм	Переход через 0	Фактический слой снега	Запасы воды в снеге			Водоотдача
					Фактические	Параметризация	Модель	
16.09.2013	-1.6	0	0	0	0	0	0	
17.09.2013	-1.4	1		1		0.9	1.0	0.0
18.09.2013	-1.2	1.8		0		2.6	2.8	0.0
19.09.2013	-1.2	1.7		2		4.1	4.5	0.0
20.09.2013	-0.7	0.2		2		4.3	4.7	0.0
21.09.2013	-0.3	0.6		2		4.8	5.3	0.0
22.09.2013	-0.3	0		0		4.8	5.3	0.0
23.09.2013	-1.1	0		0		4.8	5.3	0.0
24.09.2013	-7.4	0.3		0		5.1	5.6	0.0
25.09.2013	-3.8	2.6		1		7.5	8.2	0.0
26.09.2013	-3.4	1		2		8.4	9.2	0.0
27.09.2013	-2	0		2		8.4	9.2	0.0
28.09.2013								
29.09.2013								
30.09.2013								
01.10.2013								
02.10.2013								
03.10.2013								
04.10.2013								
05.10.2013								
06.10.2013								
07.10.2013								
08.10.2013								
09.10.2013								
10.10.2013								
11.10.2013								
12.10.2013								
13.10.2013								
14.10.2013								
15.10.2013								
16.10.2013								
17.10.2013								
18.10.2013								
19.10.2013								
20.10.2013								

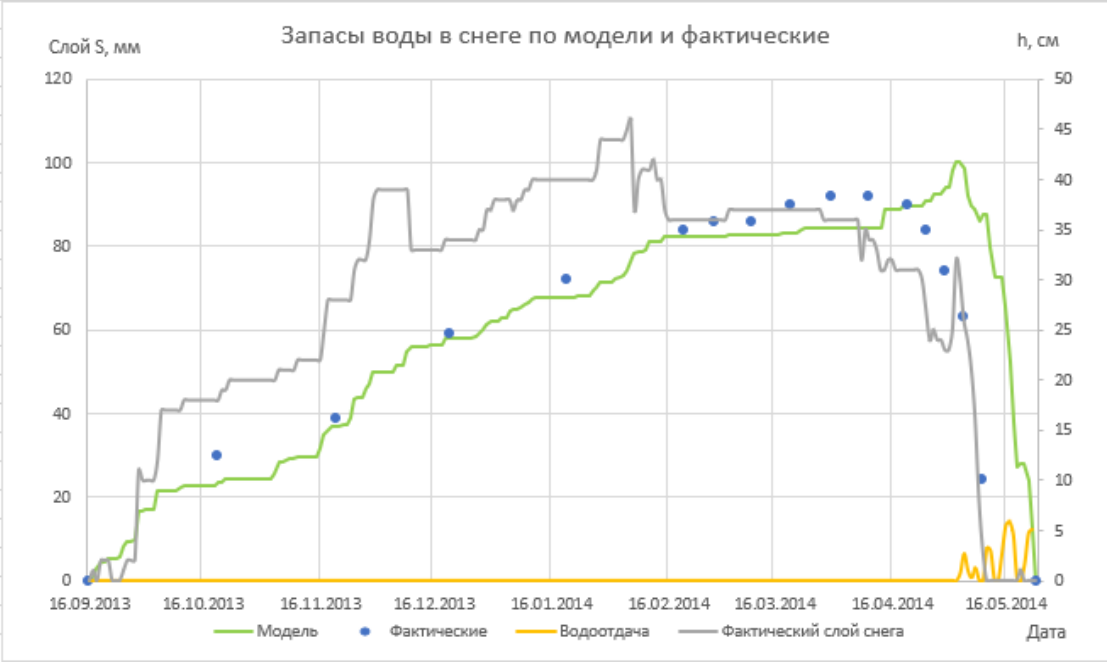


Рисунок 3.1 – Динамика фактического и расчетного запаса воды в снеге, а также водоотдачи.

3.2. Восстановление расходов воды на реке Кулу по функции $Q=f(H)$

3.2.1. Постановка задачи восстановления расходов воды

Одной из ключевых проблем при моделировании стока на водосборе Колымского водохранилища является дефицит прямых гидрометрических наблюдений за расходами воды на ряде реперных постов. В частности, для реки Кулу, которая является одним из основных реперных водосборов (площадь водосбора в замыкающем створе $F_{\text{Кулу}}=10\ 300$ км²), в период 2014–2021 гг. имелись данные только об уровнях, а прямые измерения расходов воды отсутствовали.

Для решения задачи краткосрочного прогноза притока в Колымское водохранилище необходимы ряды расходов на реперных водосборах, так как именно они используются:

- для калибровки параметров модели склонового стока (коэффициента стока k и времени релаксации τ);
- для оценки эффективности прогностической методики;
- для последующего переноса параметров на неосвещённую наблюдениями территорию.

В связи с этим была поставлена задача восстановить ряд расходов воды $Q(t)$ на реке Кулу по имеющимся данным об уровнях воды $H(t)$ за период 2014–2021 гг. с использованием установленной зависимости $Q=f(H)$.

3.2.2. Источники исходных данных и построение кривой $Q=f(H)$

Одним из источников исходных данных для построения зависимости $Q=f(H)$ послужили гидрологические ежегодники, хранящиеся в библиотеке РГГМУ. В частности, был найден гидрологический ежегодник за 1988 год, в котором для поста на реке Кулу были представлены одновременно:

- уровни воды H;
- расходы воды Q, измеренные прямыми гидрометрическими методами в тот период.

По этим данным была построена искомая функция $Q=f(H)$ – кривая расхода воды в зависимости от уровня. Функция аппроксимировала эмпирические точки (H_j, Q_j) и позволяла по известному уровню воды восстановить соответствующий расход.

Для построения зависимости использовались стандартные методы гидрологической практики:

- анализ эмпирических точек на графике $Q=f(H)$;
- выбор формы аппроксимирующей функции (полиномиальная);

В результате была получена функциональная зависимость вида:

$$Q = f(H) = 0.0073\,H^2 - 0.3988\,H - 25.393, \quad ¿\backslash(3.4\backslash)$$Полученная кривая $Q = f(H)$ использовалась для восстановления расходов воды по уровням, измеренным в период 2014–2021 гг.

3.2.3. Восстановление ряда расходов воды за период 2014–2021 гг.

После построения функции $Q = f(H)$ на основе данных ежегодника за 1988 год, эта зависимость была применена к ряду уровней воды $H(t)$, полученным с гидропоста на реке Кулу за период 2014–2021 гг. Для каждого значения уровня H_i в этот период рассчитывался восстановленный расход воды:

$$Q_i^{\text{восст}} = f(H_i). \quad ¿\backslash(3.5\backslash)$$

Таким образом был получен восстановленный ряд расходов воды $Q^{\text{восст}}(t)$ за период 2014–2021 гг., который в дальнейшем использовался:

- для калибровки параметров модели склонового стока на реке Кулу;
- для оценки эффективности прогностической методики;
- для последующего переноса параметров на неосвещённую наблюдениями левобережную часть водосбора.

Восстановленный ряд расходов позволил обеспечить непрерывность гидрологического ряда и использовать пост на реке Кулу в качестве полноценного реперного водосбора в рамках разработанной методики прогноза притока в Колымское водохранилище.

3.2.4. Обоснование применимости зависимости $Q = f(H)$, построенной по данным 1988 года

Применение зависимости $Q = f(H)$, построенной по данным 1988 года, к уровням воды, измеренным в период 2014–2021 гг., связано с определёнными допущениями. В частности, за промежуток времени более 25 лет в створе поста могли произойти русловые деформации, изменения рельефа дна, заиливание или размыв русла, что теоретически способно изменить кривую $Q = f(H)$.

Вместе с тем, в условиях Верхней Колымы с её суровым климатом, многолетней мерзлотой и относительно слабой антропогенной нагрузкой на водосбор, изменения русла в створе поста происходят преимущественно под воздействием

природных процессов и, как правило, имеют ограниченную амплитуду. В таких условиях применение исторической кривой $Q=f(H)$ является общепринятой практикой в гидрологии при отсутствии более современных прямых измерений расходов.

Более того, альтернативный подход – восстановление стока на всей площади водосбора исключительно по модели склонового стока без использования реперного гидропоста – привёл бы к существенно большей ошибке, так как:

- модель стока требует калибровки параметров, которая без прямых измерений Q невозможна;
- перенос параметров с других водосборов без локальной калибровки увеличивает неопределённость прогноза;
- использование восстановленного ряда $Q^{\text{восст}}(t)$ на реке Кулу позволяет сохранить хотя бы одну локально калиброванную точку на левобережной части водосбора.

Таким образом, ошибка расхода при восстановлении по функции $Q=f(H)$, построенной по данным 1988 года, была оценена как меньшая по сравнению с ошибкой, которая возникла бы при полном отказе от прямых (хотя и исторических) измерений и попытке восстановить всю площадь водосбора исключительно по модели.

В качестве меры дополнительной проверки применимости кривой $Q=f(H)$ использовалось сравнение характерных значений расходов (максимумов половодья, средних значений за период) с ожидаемыми по независимым оценкам (например, по удельному стоку на соседних водосборах).Совпадение полученных значений подтвердила адекватность выбранного подхода для целей настоящей работы.

3.2.5. Результаты восстановления расходов воды

В результате восстановления ряда расходов воды на реке Кулу по функции $Q=f(H)$ за период 2014–2021 гг. были получены:

- непрерывный ряд расходов воды $Q^{\text{восст}}$ с суточным шагом;

- характеристики стока (максимальные расходы половодья, средние месячные расходы, годовые объёмы стока);
- база для калибровки параметров модели склонового стока на данном реперном водосборе.

Полученный восстановленный ряд расходов позволил использовать пост на реке Кулу в качестве полноценного реперного водосбора в рамках разработанной методики прогноза притока в Колымское водохранилище, что обеспечило возможность калибровки параметров модели и последующего переноса их на неосвещённую наблюдениями левобережную часть водосбора [Рисунок 3.2.1 – график: уровни и восстановленные расходы воды на реке Кулу, 2014–2021 гг.].

3.3. Моделирование и прогнозирование стока рек на водосборе Колымского водохранилища

3.3.1. Исходные данные и общая схема расчета

Для моделирования склонового стока использовались данные о водоподаче (суммарном поступлении влаги на водосбор), полученные по метеостанциям, репрезентирующим соответствующие зоны водосбора:

Зона	Метеостанция	Реперный гидрологический пост
Бассейн р. Кулу	Колымская водно-балансовая станция (КВБС)	р. Кулу
Неосвещенная наблюдениями территория левого берега	Сусуман (№ 24790)	р. Кулу (параметры переносятся)
Бассейн р. Детрин	Усть-Омчуг	р. Детрин
Неосвещенная наблюдениями территория правого берега	Усть-Омчуг	р. Детрин (параметры переносятся)

Общая схема расчета включала следующие этапы:

Калибровка параметров модели на реперных водосборах (реки Кулу и Детрин) по данным за 2014–2020 гг.

Перенос полученных параметров на соответствующие неосвещенные территории (левый и правый берега).

Расчет стока для всех зон с использованием калиброванных параметров.

Оценка эффективности прогностической методики путем сравнения расчетных и фактических расходов.

3.3.2. Калибровка параметров модели стока

Калибровка параметров модели стока (коэффициента стока k и времени релаксации τ) выполнялась на реперных водосборах рек Кулу и Детрин. Временной интервал для калибровки охватывал период с 2014 по 2020 год. Для повышения точности учета сезонной изменчивости гидрологических характеристик каждый месяц был разделен на две половины (1–15 и 16–28/30/31 числа), для каждой из которых определялись свои оптимальные значения параметров.

Алгоритм калибровки:

Для каждой половины месяца задавались начальные приближения параметров k и τ.

По модели (1.1') рассчитывался прогнозный расход воды $Q_{\text{пр}}$ на каждом шаге.

Вычислялась абсолютная погрешность прогноза:

$$\delta_i = | Q_{\phi,i} - Q_{\text{пр},i} |$$

Определялась суммарная погрешность за период калибровки:

$$\Sigma\delta = \sum_{i=1}^{n} \delta_i$$

С помощью процедуры «Поиск решения» в MS Excel выполнялась минимизация $\Sigma\delta$ путем варьирования k и τ.

Таким образом были получены оптимальные значения параметров для каждого полумесяца каждого года (2014–2020). Иллюстрация процесса калибровки представлена на рисунках 3.3.1–3.3.2.

3.3.3. Результаты калибровки и осреднение параметров

Для каждой половины месяца были рассчитаны средние значения коэффициента стока $\acute{k}$ и времени релаксации $\acute{\tau}$ за период 2014–2020 гг. Пример результатов калибровки для реки Кулу представлен в таблице 3.3.1-3.3.2.

Таблица 3.3.1. Коэффициенты стока по реке Кулу.

Мес\Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Среднее	2021
1.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
1.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
2.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
2.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
3.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
3.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
4.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
4.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
5.1	0.8	0.8	1.03	0.8	0.8	0.8	0.8	0.83	0.8
5.2	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.80	1.19
6.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.80	0.8
6.2	1.24	1.36	0.89	1.14	1.32	0.58	0.8	1.05	2.01
7.1	0.28	0.03	0.74	0.94	0.8	0.53	0.8	0.59	-0.46
7.2	0.7	1.14	0.81	1.01	1.01	1.23	1.19	1.01	1.09
8.1	1.5	1.11	1.4	0.55	1.16	0.8	1.23	1.11	0.59
8.2	0.8	0.81	1.3	1.41	0.9	0.88	2	1.16	1.63
9.1	0.2	0.8	0.14	2.04	0.8	0	0.31	0.61	0.32
9.2	0.85	0.8	0.04	1.53	0.4	0.15	0.8	0.65	1.66
10.1	0.03	0.8	0.1	0.85	0.11	0.11	0.29	0.33	0.22
10.2	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.04	0.33	0.13	0.11
11.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
11.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
12.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
12.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0

Таблица 3.3.2. Время релаксации по реке Кулу.

Мес\Год	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Среднее	2021
1.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
1.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
2.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
2.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
3.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
3.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
4.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
4.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
5.1	40	38	37.3	40	34	40	40	38.47	28
5.2	40	40	38	40	36	40	40	39.14	40
6.1	35	40	34.1	40	40	40	40	38.44	40
6.2	21.2	5.97	11.7	3.91	88.8	43	49.9	32.07	8.53
7.1	17.9	53.1	6.83	14.5	103	34	20	35.62	252
7.2	32.7	23.9	7.81	38.9	23.8	54.6	21.5	29.03	29.1
8.1	8.07	8.37	31.7	9.48	17.4	5.15	53.3	19.07	11.4
8.2	26.7	18	10.1	10.4	40	47.1	7.96	22.89	104.2
9.1	138	40	8.55	24.1	35.5	28	17.7	41.69	21
9.2	28.3	46.5	17.34	30.8	21.5	43	43	32.92	30.8
10.1	35.7	48.1	21.1	9.09	40	53.9	11.8	31.38	25.9
10.2	18.6	60.2	35	19.7	36.2	147	109	60.81	13.7
11.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
11.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
12.1	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0
12.2	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0

Полученные средние значения $\acute{k}$ и $\acute{\tau}$ были приняты в качестве региональных параметров для соответствующих гидрологических зон и в дальнейшем использовались для:

- расчета стока для каждого года за период 2014–2020 (поверочные расчеты);
- прогноза стока с неосвещенных территорий (левый берег – параметры Кулу, правый берег – параметры Детрина).

3.3.4. Расчет стока для неосвещенных территорий

На основе осредненных параметров, полученных по реперным водосборам, и водоподачи, рассчитанной по данным метеостанций Сусуман (левый берег) и Усть-Омчуг (правый берег), были получены гидрографы стока для неосвещенных территорий. Пример таких расчетов для 2016 года представлен на рисунке 3.3.3.

Глава 4. Прогноз притока в Колымское водохранилище

4.1. Разработка алгоритма прогноза притока

Алгоритм прогноза притока воды в Колымское водохранилище базируется на методике, описанной в разделе 2.3 «Методика прогноза притока воды в Колымское водохранилище». В главах 3.1 и 3.2 были последовательно реализованы и верифицированы отдельные звенья этой методики: модель формирования снегозапасов и водоотдачи (раздел 3.1), восстановление расходов воды на реке Кулу по функции $Q = f(H)$ (раздел 3.2), а также моделирование склонового стока на реперных и неосвещённых территориях (раздел 3.3).

В настоящем разделе описывается интеграция этих звеньев в единый алгоритм оперативного прогноза притока, реализованный в виде вычислительной схемы, которая позволяет по данным гидрометеорологических наблюдений получить гидрограф суммарного притока в водохранилище.

4.1.1. Общая схема алгоритма прогноза

В соответствии с разделом 2.3.5 «Интеграция моделей и расчёт суммарного притока», алгоритм прогноза притока в Колымское водохранилище реализует следующую последовательность действий:

Водосбор Колымского водохранилища площадью $F_{общ} = 61\ 500$ км² разделяется на четыре зоны:

- Бассейн реки Кулу (освещённую гидрологическим постом);
- Неосвещённую наблюдениями территорию левого берега;
- Бассейн реки Детрин (освещённую гидрологическим постом);
- Неосвещённую наблюдениями территорию правого берега.

Расчёт водоотдачи из снега для каждой зоны. Для каждой зоны на основе данных соответствующей метеостанции (КВБС, Сусуман, Усть-Омчуг) рассчитывается:

- динамика запасов воды в снеге S_i по уравнению (3.1);
- водоотдача $W_{\text{отд},i}$ по уравнению (3.2);
- водоподача $W_{\text{под},i}$ по уравнению (3.3), учитывающая как талые воды, так и жидкие осадки.

В качестве входных данных используются ежедневные значения температуры воздуха и осадков за расчётный год (в настоящей работе – 2016 год).

Трансформация водоподачи в расход воды по модели склонового стока.

Для каждой зоны водоподача $W_{\text{под},i}$ подаётся на вход модели склонового стока (уравнение (1.2')) в качестве «эффективных осадков» $\dot{X}_i$:

$$Q_{i+1} = Q_i \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau}\right) + \frac{k\,\Delta t}{\tau} \cdot \dot{X}_i,$$

где для каждой зоны используются свои параметры:

1. для бассейна р. Кулу и левого берега – параметры $k_{\text{Кулу}}$ и $\tau_{\text{Кулу}}$;
2. для бассейна р. Детрин и правого берега – параметры $k_{\text{Детрин}}$ и $\tau_{\text{Детрин}}$.

Параметры могут задаваться:

1. как средние за период 2014–2020 гг. для каждой половины месяца;
2. как значения, соответствующие конкретно расчётному году (2016), полученные в результате калибровки по данным этого года.

В результате для каждой зоны формируется гидрограф расхода воды $Q_{\text{зона}}(t)$.

Суммирование гидрографов по зонам с учётом времени добегания. Суммарный приток в водохранилище определяется как сумма расходов по всем четырем зонам:

$$Q_{\text{сум}}(t) = Q_{\text{Кулу}}(t) + Q_{\text{лев. берег}}(t) + Q_{\text{Детрин}}(t) + Q_{\text{прав. берег}}(t). \quad ¿\(4.1\)$$

При необходимости вводится поправка на время добегания от удалённых зон до створа водохранилища, однако в настоящей работе в рамках сквозного расчёта для 2016 года эта поправка учтена интегрированно через параметры времени релаксации τ.

Сравнение расчётного притока с фактическим. Полученный гидрограф $Q_{\text{сум}}(t)$ сравнивается с фактическими данными о притоке в водохранилище, полученными из открытых источников (сайт ПАО «РусГидро»). Это сравнение носит предварительный характер и служит для визуальной оценки адекватности модели; количественная оценка эффективности методики выносится в отдельную главу (Глава 4.2).

4.1.2. Варианты параметризации модели в алгоритме прогноза

В рамках разработанного алгоритма реализованы два варианта параметризации модели стока, что позволяет оценить чувствительность прогноза к выбору параметров:

Вариант 1. Параметры, соответствующие расчётному году (2016). Для каждого полумесяца 2016 года используются оптимальные значения коэффициентов k и τ, полученные в результате калибровки по данным именно этого года. Такой подход позволяет получить «наилучший» прогноз для конкретного года, но требует наличия фактических данных за этот год и, следовательно, не полностью соответствует режиму заблаговременного прогноза.

Вариант 2. Параметры, осреднённые за период 2014–2020 гг. Для каждого полумесяца используются средние значения коэффициентов k и τ за период калибровки (2014–2020 гг.). Этот вариант более реалистичен с точки зрения оперативного прогноза, когда параметры известны только по историческим данным, а не по будущему году.

Сравнение результатов расчёта по обоим вариантам позволяет оценить:

- влияние межгодовой изменчивости параметров на точность прогноза;
- устойчивость методики при использовании осреднённых параметров;

- потенциальные потери точности при переходе от годоспецифичных параметров к осреднённым.

4.1.3. Исходные данные и организация расчёта для 2016 года

В качестве тестового года для демонстрации работы алгоритма выбран 2016 год, который характеризуется выраженным весенним половодьем и достаточной для оценки разнообразием гидрологических условий.

Исходными данными для расчёта послужили:

- ежедневные значения температуры воздуха и осадков по метеостанциям КВБС, Сусуман и Усть-Омчуг за 2016 год;
- восстановленный ряд уровней и расходов воды на реке Кулу за 2014–2021 гг.;
- ряды расходов воды на реке Детрин за период калибровки;
- фактический приток в Колымское водохранилище за 2016 год, полученный из открытых источников (сайт ПАО «РусГидро»).

На основе этих данных были сформированы:

- Таблица суточных расходов воды по всем четырём зонам (Кулу, левый берег, Детрин, правый берег), их сумма и фактический приток;
- График гидрографов, на котором одновременно представлены:

1. фактический приток в водохранилище;
2. расчётный приток по параметрам 2016 года;
3. расчётный приток по осреднённым за 2014–2020 гг. параметрам.

Такая организация результатов позволяет наглядно проследить динамику притока в течение года и оценить поведение модели в ключевые периоды (весеннее половодье, летние паводки, осенне-зимняя межень).

4.1.4. Результаты моделирования притока за 2016 год

В результате реализации алгоритма прогноза были получены суточные ряды расходов воды по всем четырём зонам водосбора и их сумма – расчётный гидрограф суммарного притока в Колымское водохранилище за 2016 год.

В Таблице 4.1 приведены суточные расходы:

- $Q_{\text{Кулу}}(t)$ – по бассейну реки Кулу;
- $Q_{\text{лев. берег}}(t)$ – по неосвещённой левобережной территории;
- $Q_{\text{Детрин}}(t)$ – по бассейну реки Детрин;
- $Q_{\text{прав. берег}}(t)$ – по неосвещённой правобережной территории;
- $Q_{\text{сум}}(t)$ – суммарный расчётный приток;
- $Q_{\text{факт}}(t)$ – фактический приток в водохранилище.

Таблица 4.1 – суточные расходы по всем четырём притокам, их сумма и фактический приток за 2016 год.

Дата	Юг	Левый берег	Кулу	Правый берег	Сумма прит.	Фактический
	Qp, м3/с	Qp, м3/с	Qp, м3/с	Qp, м3/с	Qp, м3/с	Qp, м3/с
01.01.2016	0	0	0	0	0	12
02.01.2016	0	0	0	0	0	12
03.01.2016	0	0	0	0	0	12
…	…	…	…	…	…	…
29.05.2016	368	675	252	21.8	1316	1830
30.05.2016	349	657	245	20.7	1272	1830
31.05.2016	1339	657	439	33.7	2469	2035
01.06.2016	1095	638	426	27.6	2186	2040
02.06.2016	896	619	414	22.6	1951	1955
…	…	…	…	…	…	…
20.08.2016	1079	1211	909	314	3513	3325
21.08.2016	1718	2391	925	361	5395	3990
22.08.2016	1495	2214	981	327	5016	3990
23.08.2016	1268	1995	883	279	4425	3990
24.08.2016	1077	1797	795	236	3906	4715
…	…	…	…	…	…	…
29.12.2016	0	0	0	0	0	20

30.12.2016	0	0	0	0	0	20
31.12.2016	0	0	0	0	0	20

На Рисунке 4.1 представлен сводный график гидрографов за 2016 год, на котором одновременно показаны:

- фактический приток в Колымское водохранилище;
- расчётный приток по параметрам, соответствующим 2016 году;
- расчётный приток по осреднённым за период 2014–2020 гг. параметрам.



Рисунок 4.1 – гидрографы: фактический приток, расчёт по параметрам 2016 г., расчёт по осреднённым параметрам.

Визуальный анализ графика показывает, что модель в целом воспроизводит основную динамику притока: пик весеннего половодья, фазы подъёма и спада воды, а также летние паводки. При этом расчёт по параметрам 2016 года,

как и ожидалось, демонстрирует меньшее отклонение от фактического гидрографа по сравнению с расчётом по осреднённым параметрам, что свидетельствует о наличии межгодовой изменчивости гидрологических характеристик водосбора.

Глава 4.2. Апробация прогностической методики и оценка прогноза на независимом материале

4.2.1. Общие принципы оценки качества прогнозов

В главе 2.4 настоящей работы приведены три подхода к оценке эффективности гидрологических прогнозов: метод ГГИ, метод ГМЦ (Гидрометцентра России) и критерий Нэша–Сатклифа (NSE). Каждый из них имеет свою область применения и критерии точности. В данном исследовании в качестве основного выбран **метод ГМЦ**, а именно отношение средней квадратической погрешности поверочных прогнозов S к среднеквадратическому отклонению **изменений** прогнозируемой величины за период заблаговременности σ_{Δ}. Методы ГГИ и NSE приведены в разделе 2.4 в справочных целях и для полноты математического аппарата, но для количественной оценки прогнозов в настоящей главе используется исключительно критерий S/σ_{Δ}.

Краткое напоминание: прогноз считается эффективным при соблюдении условия:

- $S/\sigma_{\Delta} \leq 0{,}70$ при $n \leq 15$;
- $S/\sigma_{\Delta} \leq 0{,}75$ при $15 < n \leq 25$;
- $S/\sigma_{\Delta} \leq 0{,}80$ при $n > 25$.

4.2.2. Оценка качества модели формирования снегозапасов

Для верификации модели формирования запасов воды в снеге (глава 2.1) выполнялось сравнение расчетных снегозапасов с фактическими данными маршрутных снегосъемок на метеостанции Сусуман за период 2014–2020 гг. В таблице 4.2.1 приведены калиброванные параметры модели (k_f и k_t) и значения критерия S/σ_{Δ}, рассчитанные для каждого года отдельно (число наблюдений в каждом

году составляло от 15 до 25). В последней строке таблицы приведены средние значения параметров и критерия за весь период.

Таблица 4.2.1 – Параметры модели формирования снегозапасов и оценка точности (метеостанция Сусуман)

Годы	Параметры		S/σ
	kf	kt	
2014	1	-3.14	0.28
2015	1	-0.81	0.27
2016	1	-4.22	0.28
2017	1	-3.52	0.28
2018	1	-6.91	0.10
2019	1	-3.45	0.48
2020	1	-8.29	0.87
Среднее	1	-4.33	0.36

Значения $k_f = 1{,}0$ означают, что потери при снегонакоплении (испарение, выдувание) в рамках данной модели для метеостанции Сусуман оказались незначимы или компенсированы другими факторами. Температурный коэффициент k_t изменяется от –0,81 до –8,29 мм/°C, что отражает межгодовую изменчивость интенсивности снеготаяния. Среднее значение $S/\sigma_{\Delta} = 0{,}36$ свидетельствует о хорошем качестве модели формирования снегозапасов. При этом во все годы, кроме 2020 г., значение критерия не превышало нормативных порогов (0,70–0,75). Для 2020 г. получено значение 0,87, что указывает на повышенную погрешность в этот год, связанную, вероятно, с аномальными гидрометеорологическими условиями.

4.2.3. Оценка качества модели формирования склонового стока (пост на р. Детрин)

Для оценки качества модели склонового стока в качестве реперного водосбора выбран **пост на р. Детрин**. Этот выбор обусловлен тем, что ряд расходов воды на Детрине получен прямыми гидрометрическими измерениями, в отличие от р. Кулу, где использовался восстановленный по кривой $Q = f(H)$ ряд. Таким образом, оценка по Детрину является более объективной и свободной от дополнительных погрешностей, связанных с восстановлением.

Калибровка параметров модели (коэффициента стока k и времени релаксации τ) выполнялась за период 2014–2020 гг. Для каждого года критерий S/σ_{Δ} рассчитывался отдельно (число наблюдений в году от 15 до 25). В таблице 4.2.2 приведены калиброванные параметры и значения критерия, а также их средние значения за период калибровки. Для 2021 г. приведены результаты независимой проверки.

Таблица 4.2.2 – Параметры модели формирования стока и оценка точности (р. Детрин, 2014–2021 гг.)

Годы	Параметры		S/σ
	k	τ	
2014	0.68	19.3	0.47
2015	0.54	19.0	0.33
2016	0.55	14.9	0.37
2017	0.37	11.7	0.33
2018	0.59	29.7	0.44
2019	0.44	13.6	0.31
2020	0.58	25.5	0.32
Среднее	0.53	19.1	0.37
2021	0.48	19.1	0.37

Значения критерия S/σ_{Δ} для всех лет калибровочного периода (2014–2020) находятся в диапазоне 0,31–0,47, что значительно ниже нормативных порогов (0,70–0,75). Это подтверждает высокую эффективность модели склонового стока для реперного водосбора. Среднее значение критерия за период калибровки составляет 0,37. Для 2021 года (независимый проверочный год) получено аналогичное значение 0,37, что свидетельствует об устойчивости модели и отсутствии переобучения на калибровочном периоде.

4.2.4. Оценка прогноза притока в Колымское водохранилище за 2016 год

В главе 4.1 были выполнены два варианта прогноза суммарного притока в Колымское водохранилище за 2016 год:

- **Вариант 1** – с использованием параметров модели, откалиброванных непосредственно по данным 2016 года;

- **Вариант 2** – с использованием осреднённых параметров за период 2014–2020 гг. (для каждой зоны).

Оценка качества прогноза выполнялась путём сравнения суточных расчётных расходов $Q_{\text{пр}}(t)$ с фактическими данными о притоке в водохранилище. Результаты расчёта критерия S/σ_{Δ} приведены в таблице 4.2.3.

Таблица 4.2.3 – Оценка прогноза суммарного притока за 2016 год

Вариант параметризации	S	σ_{Δ}	S/σ_{Δ}
Параметры 2016 года	410	1016	0.40
Осредненные за период 2014-2020 гг.	551	1016	0.54

Сравнение с фактическими данными (см. Рисунок 4.1) также показывает, что в обоих вариантах модель удовлетворительно воспроизводит сроки начала и окончания весеннего половодья, а также общую динамику притока. Однако точность воспроизведения пиковых расходов различается между вариантами параметризации:

- **Вариант с параметрами 2016 года** хорошо моделирует форму и амплитуду весеннего половодья, однако максимальный расход дождевого паводка оказался занижен примерно на 20% по сравнению с фактическим (фактический максимум составил около 7200 м³/с, прогнозный – около 5500 м³/с).
- **Вариант с осреднёнными параметрами (2014–2020 гг.)** показывает ещё более существенное занижение пика дождевого паводка: прогнозное значение не превысило 3100 м³/с, что почти в 2,3 раза ниже фактического.

Такое расхождение объясняется, во-первых, высокой изменчивостью летних дождевых паводков в условиях муссонного климата (интенсивность и продолжительность осадков в конкретном году могут сильно отклоняться от среднемноголетних значений). Во-вторых, осреднённые параметры k и τ «сглаживают» экстремальные гидрологические ситуации, что приводит к кон-

сервативной оценке пиков. Тем не менее, для целей оперативного прогнозирования (особенно при использовании годоспецифичных параметров или при оперативной корректировке модели по текущим данным) методика остаётся применимой.

4.2.5. Общее заключение об эффективности методики

На основе проведённой оценки по критерию ГМЦ S/σ_{Δ} можно сделать следующие выводы:

1. **Модель формирования снегозапасов** показала хорошую точность (среднее $S/\sigma_{\Delta}=0{,}36$) и может использоваться для расчёта водоотдачи на водосборе Колымского водохранилища.
2. **Модель склонового стока** для реперного водосбора на р. Детрин продемонстрировала высокую эффективность: среднее $S/\sigma_{\Delta}=0{,}37$ за период калибровки и аналогичное значение 0,37 в независимом 2021 году.
3. **Прогноз суммарного притока в Колымское водохранилище** за 2016 год:

- при использовании годоспецифичных параметров – $S/\sigma_{\Delta}=0{,}40$ (отлично);
- при использовании осреднённых параметров – $S/\sigma_{\Delta}=0{,}54$ (хорошо).

4. Оба варианта удовлетворяют нормативным требованиям Гидрометцентра России, что позволяет рекомендовать разработанную методику для оперативного прогнозирования притока. Особого внимания заслуживает вариант с осреднёнными параметрами (не требующий знания будущего года), который показал $S/\sigma_{\Delta}=0{,}54$, что является вполне приемлемым для практических задач.

Таким образом, апробация на независимом материале (2016 год) подтвердила практическую применимость и достаточную точность разработанной методики прогноза притока в Колымское водохранилище по данным гидрометеорологических наблюдений.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана и апробирована методика прогноза притока воды в Колымское водохранилище по данным гидрометеорологических наблюдений. Основная цель работы — создание инструмента для оперативного прогнозирования притока в условиях дефицита гидрометрических данных и специфики водосбора в зоне многолетней мерзлоты — достигнута. Все поставленные задачи решены, получены следующие основные результаты.

По физико-географическому описанию района исследований (Глава 1). Выполнена комплексная характеристика климатических и гидрологических условий бассейна Верхней Колымы. Установлено, что 94–99% годового объёма стока проходит в тёплый период (май–октябрь), при этом весеннее половодье формируется преимущественно за счёт таяния снега, а летние дождевые паводки носят резкий, кратковременный характер. Показано, что климатические изменения (рост весенних температур, увеличение осадков) усиливают неопределённость прогнозов. Водосборная площадь 61 500 км² характеризуется крайним дефицитом гидрометрической информации: прямыми наблюдениями освещены лишь реки Кулу (10 300 км²) и Детрин (3 400 км²). Остальная территория (47 800 км²) требует переноса параметров с реперных водосборов по принципу гидрологического подобия.

По математическому аппарату (Глава 2). В работе использованы две параметрические модели:

- модель формирования снегозапасов и водоотдачи (уравнения 2.1–2.2), позволяющая по температуре и осадкам восстановить динамику снежного покрова и рассчитать объём талой воды, поступающей на водосбор;
- модель склонового стока (уравнения 1.1'–1.2'), описывающая трансформацию водоподачи в расход воды в замыкающем створе с учётом коэффициента стока k и времени релаксации τ.

Разработана методика прогноза притока, включающая: выделение четырёх зон водосбора (Кулу, левый берег, Детрин, правый берег), калибровку параметров по реперным водосборам (2014–2020 гг.) и перенос параметров на неосвещённую площадь. Оценка качества прогнозов выполнялась по критерию ГМЦ S/σ_Δ (методы ГГИ и NSE приведены в справочных целях).

По результатам моделирования (Глава 3).

- **Восстановление ряда расходов на р. Кулу (3.2).** В связи с отсутствием прямых измерений расходов за 2014–2021 гг. выполнено восстановление по кривой $Q=f(H)$, построенной по данным гидрологического ежегодника за 1988 год. Полученная зависимость $Q=0{,}0073\,H^2-0{,}3988\,H-25{,}393$ позволила восстановить непрерывный ряд расходов, что обеспечило возможность калибровки модели склонового стока на левобережной части водосбора. Данное решение является вынужденным, но единственно возможным в условиях дефицита наблюдений.
- **Моделирование снегозапасов (3.1).** Для метеостанции Сусуман (левобережная неосвещённая зона) получены параметры модели: $k_f=1{,}0$, k_t варьируется от –0,81 до –8,29 мм/°С. Среднее значение критерия $S/\sigma_\Delta=0{,}36$ (при пороге 0,70–0,75) свидетельствует о хорошем качестве модели. Исключение составил 2020 год ($S/\sigma_\Delta=0{,}87$), что указывает на аномальные условия этого года.
- **Моделирование склонового стока (3.3).** Для реперного водосбора на р. Детрин (прямые измерения) получены средние параметры за 2014–2020 гг.: $k=0{,}53$, $\tau=19{,}1$ сут. Среднее значение критерия $S/\sigma_\Delta=0{,}37$ (при пороге 0,70–0,75) подтверждает высокую эффективность модели. Для 2021 года (независимая проверка) получено аналогичное значение 0,37, что говорит об отсутствии переобучения.

По прогнозу притока в Колымское водохранилище (Глава 4).

- Реализован алгоритм прогноза (4.1), объединяющий снеговую и стоковую модели в единую вычислительную схему. Выполнены два варианта прогноза притока за 2016 год: с параметрами 2016 года и с осреднёнными параметрами 2014–2020 гг.

Оценка по критерию ГМЦ (4.2) показала:

- для варианта с параметрами 2016 года: $S/\sigma_{\Delta}=0{,}40$;
- для варианта с осреднёнными параметрами: $S/\sigma_{\Delta}=0{,}54$.

  Оба значения удовлетворяют нормативным требованиям (порог 0,80 при $n>25$), следовательно, методика признаётся эффективной.

Ограничения модели и перспективы улучшения.

- Основное ограничение — отсутствие дискретного учёта времени добегания от разных притоков до створа водохранилища. Однако параметр τ в модели стока интегрально учитывает запаздывание для каждой зоны, а визуальное совпадение фаз гидрографов (Рисунок 4.1) показывает, что в рамках суточной детальности этим эффектом можно пренебречь.
- Восстановление расходов на р. Кулу по кривой 1988 года вносит дополнительную погрешность, но альтернативы (полный отказ от калибровки на левобережной части) привели бы к большей неопределённости.
- Модель занижает пики дождевых паводков (особенно при использовании осреднённых параметров), что связано со сглаживанием экстремальных осадков при осреднении. Для оперативного прогноза рекомендуется использовать годоспецифичную калибровку при наличии текущих данных.

Практическая значимость. Разработанная методика может быть использована диспетчерской службой Колымской ГЭС для оперативного прогнозирования притока, что позволит:

- планировать режимы сработки и наполнения водохранилища;
- снижать риски наводнений в нижнем бьефе;
- повышать эффективность выработки электроэнергии.

Полученные параметры моделей (k_f, k_t, k, τ) могут быть применены в дальнейших исследованиях гидрологического режима Верхней Колымы и на других водохранилищах северо-востока России со схожими условиями (многолетняя мерзлота, дефицит наблюдений, снеговое питание). Восстановленный ряд расходов на р. Кулу за 2014–2021 гг. дополняет гидрологическую информацию о бассейне.

Таким образом, цель работы достигнута, методика апробирована на независимом материале и может быть рекомендована к практическому использованию.

Список использованных источников

1. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://meteo.ru (дата обращения: 01.06.2026).
2. ООО «Расписание погоды». Архив погоды RP5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rp5.ru (дата обращения: 01.06.2026).
3. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Климатические данные для климатического обслуживания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://extremeclimate.ru (дата обращения: 01.06.2026).
4. Хаустов В.А., Ромашова К.В., Хренов А.А. Оценка многолетних изменений максимальных снегозапасов и водоотдачи Северного края России // Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации». – Санкт-Петербург, 2019. – С. 470–473.
5. Шаночкин С.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Практические задания по дисциплине «Гидрологические прогнозы»: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Астерион, 2017. – 32 с.
6. Коваленко В.В., Гайдукова Е.В. Практикум по дисциплине «Моделирование гидрологических процессов. Часть I. Динамические модели» (на базе языка С++): учебное пособие. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2010. – 147 с.
7. Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В. Моделирование гидрологических процессов: учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2006. – 559 с.
8. Федеральное агентство водных ресурсов. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС

ГМВО) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 01.06.2026).

9. ПАО «РусГидро». Официальный сайт, раздел «Колымская ГЭС» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rushydro.ru (дата обращения: 01.06.2026).
10. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10, No. 3. – P. 282–290.

Приложения