



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Оценка гидрологического
режима в условиях климатических
изменений

Исполнитель Иванов Степан Юрьевич
(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)

«16» июня 2026г.

Санкт-Петербург
2026

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа изложена на 41 странице, содержит 18 рисунков, 8 таблиц, 3 приложения; список использованных источников включает 25 наименований.

Ключевые слова: ГОДОВОЙ СТОК, ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА, УРАВНЕНИЕ ФОККЕРА–ПЛАНКА–КОЛМОГорова, ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, КОЭФФИЦИЕНТ СТОКА, СЦЕНАРИИ CMIP6, КОЭФФИЦИЕНТ ВАРИАЦИИ, ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ.

Объект исследования – годовой сток рек севера Европейской части России и Сибири. Предмет исследования – изменение вероятностных характеристик годового стока под действием климатических факторов.

Цель работы – оценить чувствительность вероятностных характеристик годового стока (нормы, коэффициента вариации) к ожидаемым изменениям температуры воздуха и осадков на основе вероятностной модели формирования стока, описываемой уравнением Фоккера–Планка–Колмогорова.

В работе по рядам наблюдений за расходами воды на 24 гидрологических постах (база данных ГБДС / R-ArcticNET) рассчитаны статистические характеристики стока, выполнена параметризация модели Фоккера–Планка–Колмогорова и получены сценарные оценки нормы и коэффициента вариации стока для траекторий CMIP6 (SSP1-2.6 – SSP5-8.5) на периоды 2021–2040 и 2041–2060 гг. Построены карты-схемы чувствительности характеристик стока к изменению климата. Расчёты выполнены в электронных таблицах и на языке Python; полученные результаты согласуются между собой и с независимыми оценками.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ.....	6
1.1. Климатические характеристики	7
1.2. Рельеф.....	9
1.3. Исходные данные	10
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ.....	13
2.1. Уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова	13
2.2. Зависимость коэффициента стока от климатических параметров	16
ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ФПК	18
3.1. Определение параметров уравнения Пирсона	18
3.2. Определение параметров уравнения ФПК	21
ГЛАВА 4. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ФПК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА	25
4.1. Решение при постоянных параметрах модели ФПК	25
4.2. Решение при переменных параметрах модели ФПК.....	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	31
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	33
ПРИЛОЖЕНИЕ А. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОДОВОГО СТОКА	36
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ФОККЕРА-ПЛАНКА- КОЛМОГорова	37
ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ СЦЕНАРНОЙ ОЦЕНКИ.....	38

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние гидросферы всё чаще рассматривается в неразрывной связи с наблюдаемыми изменениями климата. За последние десятилетия среднегодовая температура воздуха на территории России выросла заметно быстрее, чем в среднем по земному шару, а в Арктической зоне темпы потепления оказались в два с лишним раза выше глобальных. Вместе с температурой меняется и режим увлажнения: смещаются сроки и сокращается продолжительность залегания снежного покрова, перераспределяется внутригодовой сток, растёт повторяемость опасных гидрологических явлений. Поскольку именно климат служит ведущим фактором формирования речного стока на равнинных водосборах, оценка возможных изменений гидрологического режима в перспективе климатических сдвигов приобретает не только научный, но и сугубо практический смысл.

Речной сток – возобновляемый водный ресурс, от которого зависят водоснабжение, гидроэнергетика, судоходство, проектирование и эксплуатация гидротехнических сооружений. Все эти отрасли опираются на расчётные гидрологические характеристики – норму стока, коэффициенты вариации и асимметрии, расходы заданной обеспеченности. Действующие нормативные документы (СП 33-101-2003) определяют эти характеристики в предположении стационарности климата, то есть неизменности статистического режима во времени. Однако наблюдаемые тенденции ставят такое предположение под сомнение: при меняющемся климате прежние оценки могут оказаться смещёнными, а принятые на их основе проектные решения – недостаточно надёжными.

Для учёта нестационарности климата в гидрологических расчётах на кафедре инженерной гидрологии РГГМУ развивается вероятностный подход, в основе которого лежит описание процесса формирования стока стохастическим дифференциальным уравнением и соответствующим ему

уравнением Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК). В отличие от чисто статистической обработки рядов, такой подход связывает параметры распределения стока с физическими характеристиками водосбора и климата, прежде всего с коэффициентом стока, который, в свою очередь, зависит от осадков и температуры воздуха. Это позволяет не подбирать кривую обеспеченности эмпирически, а получать её как стационарное решение модели и, меняя в модели климатические параметры по сценариям, прогнозировать сдвиг вероятностных характеристик стока.

Актуальность работы определяется потребностью в количественной, физически обоснованной оценке того, насколько чувствительны расчётные характеристики годового стока к ожидаемым изменениям климата, и в выделении районов, где эта чувствительность наиболее высока.

Целью работы является оценка изменений вероятностных характеристик годового стока рек в условиях климатических изменений на основе модели Фоккера-Планка-Колмогорова.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- сформировать базу данных по среднегодовым расходам воды и климатическим характеристикам водосборов для репрезентативной выборки рек севера Европейской части России и Сибири;
- рассчитать статистические характеристики годового стока (норму, коэффициенты вариации и асимметрии, коэффициент автокорреляции) и параметры распределения Пирсона III типа;
- выполнить параметризацию модели Фоккера–Планка–Колмогорова и установить связь её параметров с коэффициентом стока и климатическими условиями водосбора;
- получить сценарные оценки нормы и коэффициента вариации стока по траекториям СМIP6 для периодов 2021–2040 и 2041–2060 гг. при постоянных и переменных параметрах модели;

– построить карты-схемы чувствительности вероятностных характеристик стока к изменению климата и выделить районы со значимыми отклонениями.

Объектом исследования служит годовой сток рек севера Европейской части России и Сибири, предметом – изменение его вероятностных характеристик под действием климатических факторов. Исходными данными послужили ряды наблюдений за расходами воды из международной базы данных глобального стока, а также сценарные оценки температуры и осадков, полученные с использованием ансамбля климатических моделей СМIP6 через интерактивный сервис KNMI Climate Explorer.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследования охватывает северную, преимущественно субарктическую, часть территории России – от водосборов Северо-Двинского бассейна на западе до бассейнов Колымы и Анадыря на крайнем северо-востоке. В пределах этой обширной полосы для анализа отобраны 24 гидрологических поста, расположенных на средних и крупных реках пяти физико-географических районов: севера Европейской части России, Западной Сибири (бассейн Оби), Восточной Сибири (бассейны Енисея и Лены) и Северо-Востока (бассейны Колымы и Анадыря). Выбор постов подчинён двум условиям – достаточной продолжительности рядов наблюдений и расположению водосборов в зоне, где сток формируется главным образом под действием зональных климатических факторов, а не местных особенностей. Расположение постов показано на рисунке 1.

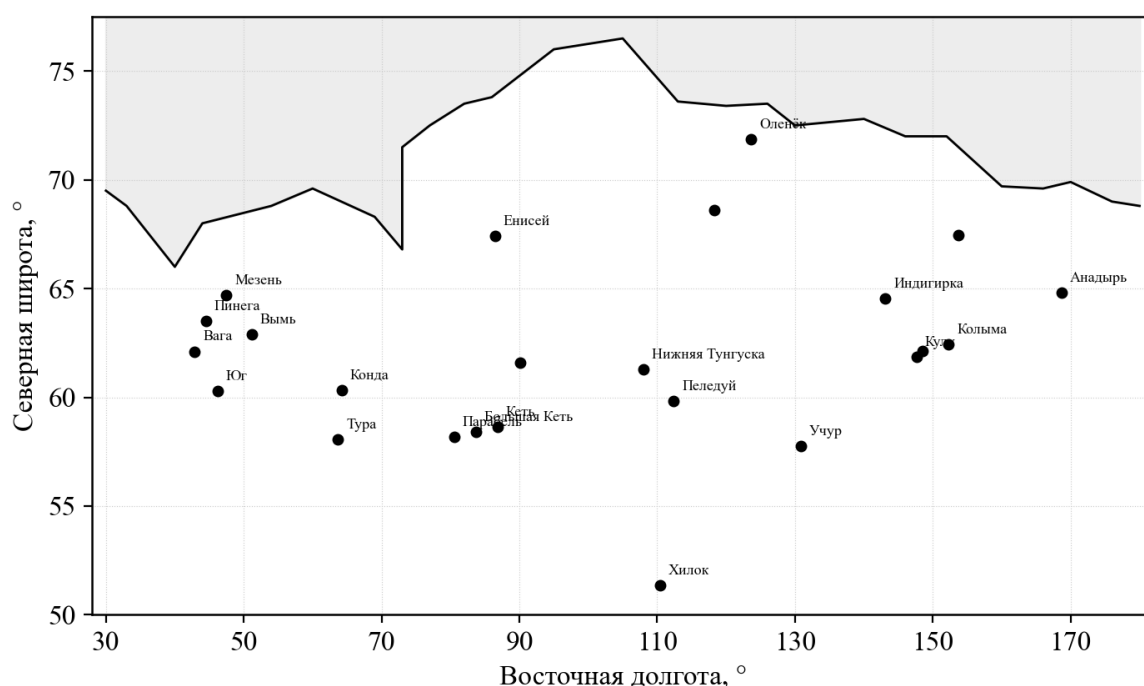


Рисунок 1. Расположение гидрологических постов.

1.1. Климатические характеристики

Климат рассматриваемой территории на всём её протяжении континентальный, а в восточных районах – резко континентальный. Определяющая черта климата – длительная морозная зима и короткое прохладное лето, причём амплитуда между средними температурами самого тёплого и самого холодного месяцев нарастает с запада на восток. Если на севере Европейской части средняя годовая температура воздуха близка к нулю, то в бассейне Индигирки, где находится один из полюсов холода Северного полушария, она опускается до минус 14...16 °С. Такое распределение складывается под совместным влиянием убывающего к северу прихода солнечной радиации, ослабления атлантического переноса в глубь материка и устойчивого зимнего Сибирского антициклона.

Годовые суммы осадков убывают в том же направлении. На севере Европейской части и в предгорьях они достигают 550–600 мм, в Западной Сибири составляют около 500 мм, а в континентальной Якутии и верховьях Колымы снижаются до 250–300 мм. Большая часть осадков выпадает в тёплый период; зимние осадки формируют снежный покров, запас воды в котором определяет объём весеннего половодья – главной фазы водного режима большинства рассматриваемых рек. Осреднённые по районам климатические нормы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Осреднённые климатические нормы и слой стока по районам

Физико-географический район	Осадки Р, мм	Температура Т, °С	Слой стока У, мм
Север Европейской части России	555	+0,5	250–365
Западная Сибирь (бассейн Оби)	505	–1,0	126–207
Восточная Сибирь (Енисей, Лена)	430	–6,5	86–354
Северо-Восток (Колыма, Анадырь)	330	–10,5	197–316

Испарение на рассматриваемой территории невелико и почти всюду ограничено запасами тепла, а не влаги. В холодных районах с многолетней мерзлотой инфильтрация затруднена, поэтому значительная часть выпадающих осадков уходит в сток: коэффициент стока здесь достигает 0,6–

0,8, тогда как в более тёплых и сухих южных частях Западной Сибири он снижается до 0,2–0,3. Эта зависимость испарения и коэффициента стока от температуры и осадков положена в основу сценарных расчётов (глава 2).

Ожидаемые изменения температуры воздуха и осадков, рассчитанные по ансамблю моделей CMIP6, показаны для четырёх районов на рисунках 2 и 3. Во всех сценариях потепление в рассматриваемой полосе превышает среднеглобальное; рост осадков выражен слабее и наиболее заметен на северо-востоке.

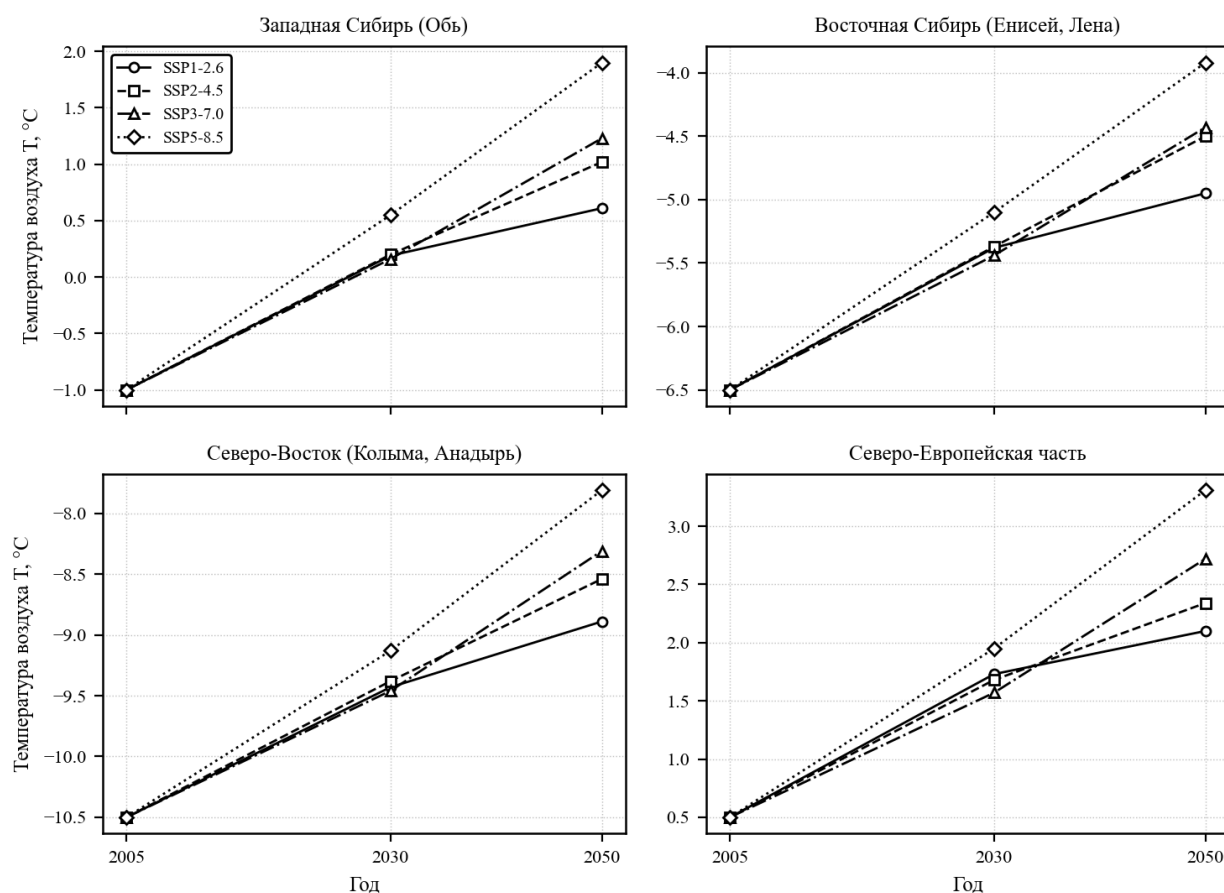


Рисунок 2. Изменение средней годовой температуры воздуха по сценариям CMIP6.

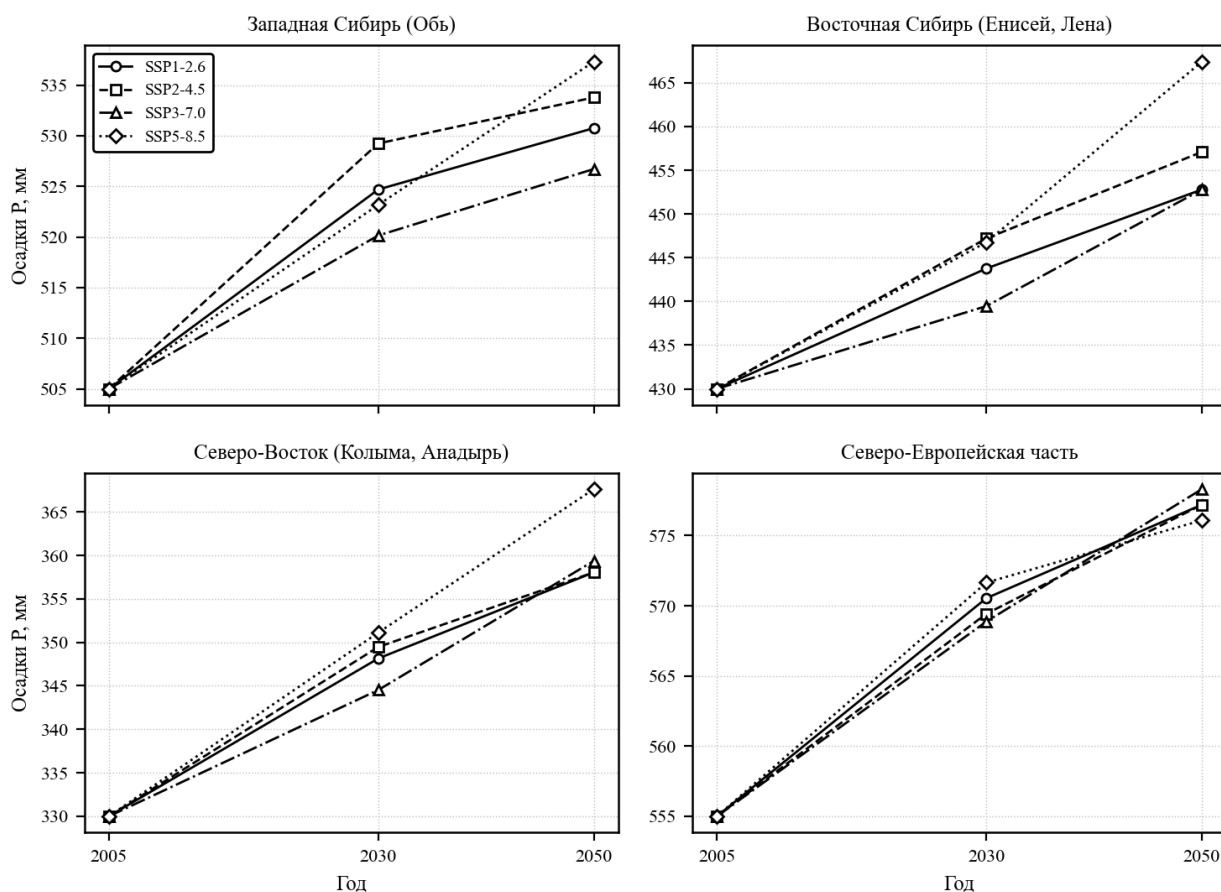


Рисунок 3. Изменение годовых сумм осадков по сценариям CMIP6.

1.2. Рельеф

Рельеф района разнообразен, однако большинство выбранных водосборов расположено на равнинах и низменностях, что отвечает задаче выделения зональной составляющей стока. Север Европейской части России занимает восточную окраину Русской равнины с пологими увалами и широкими заболоченными долинами (бассейны Юга, Ваги, Вычегды, Мезени, Пинеги). Западно-Сибирская равнина, по которой текут Конда, Тура, Кеть и Парабель, представляет собой одну из крупнейших аккумулятивных низменностей мира с малыми уклонами и обширными болотами, что обуславливает замедленный, зарегулированный характер стока.

К востоку равнины сменяются возвышенностями и плоскогорьями. Бассейны Нижней Тунгуски и притоков Енисея лежат на Среднесибирском плоскогорье, бассейны Учюра и Олёкмы – на Алданском нагорье, где орографическое усиление осадков повышает слой стока. Крайний северо-

восток (верховья Колымы, Индигирки, бассейн Анадыря) занят среднегорьем с резко расчленённым рельефом и сплошной многолетней мерзлотой. Несмотря на различия высот, для всех водосборов общим остаётся преобладание снегового и смешанного питания и хорошо выраженное весеннее половодье.

1.3. Исходные данные

Основу исходных данных составили ряды среднегодовых расходов воды, полученные из Глобального банка данных о стоке (Global Runoff Data Centre) и согласованной с ним базы R-ArcticNET, объединяющей материалы наблюдений Росгидромета и Государственного гидрологического института по рекам водосбора Северного Ледовитого океана. Для каждого поста использованы координаты створа, площадь водосбора и непрерывный ряд среднегодовых расходов. Перечень постов с основными характеристиками приведён в таблице 2.

Таблица 2. Гидрологические посты и характеристики рядов наблюдений

№	Река – пост	Район	F, км²	Период	n, лет
1	Большая Кеть – Родионовка	Зап. Сибирь	71 500	1955–2000	41
2	Кеть – Максимкин Яр	Зап. Сибирь	38 400	1937–2000	60
3	Конда – Чантырья	Зап. Сибирь	13 900	1955–1996	42
4	Парабель – Новиково	Зап. Сибирь	17 900	1958–2000	39
5	Тура – Туринск	Зап. Сибирь	29 000	1936–1989	54
6	Енисей – Игарка	Вост. Сибирь	2 440 000	1936–1999	64
7	Енисей – Подкаменная Тунгуска	Вост. Сибирь	1 760 000	1936–1999	60
8	Нижняя Тунгуска – Ербогачён	Вост. Сибирь	77 400	1952–1999	44
9	Оленёк – Сухана	Вост. Сибирь	127 000	1937–1999	62
10	Оленёк – низовье	Вост. Сибирь	198 000	1964–1999	35
11	Пеледуй – Сользавод	Вост. Сибирь	13 600	1936–1987	52
12	Учур – Чульбю	Вост. Сибирь	108 000	1954–1999	46
13	Хилок – Хилок	Вост. Сибирь	15 400	1945–1997	53
14	Анадырь – Новый Ерополь	Сев.-Восток	47 300	1958–1988	31
15	Индигирка – Усть-Нера	Сев.-Восток	83 500	1944–1999	56
16	Колыма – Оротук	Сев.-Восток	43 600	1957–1996	40
17	Колыма – Среднеколымск	Сев.-Восток	361 000	1927–1970	42
18	Колыма – Усть-Среднекан	Сев.-Восток	99 400	1933–1993	61
19	Кулу – Кулу	Сев.-Восток	9 550	1942–1994	53
20	Вага – Шенкурск	Сев.-Европ.	38 400	1915–1944	28
21	Вымь – Половники	Сев.-Европ.	25 100	1956–1988	33
22	Мезень – Большая Пысса	Сев.-Европ.	16 100	1961–1994	34
23	Пинега – Засурье	Сев.-Европ.	17 100	1965–1988	24
24	Юг – Подосиновец	Сев.-Европ.	15 200	1934–1999	66

Продолжительность рядов изменяется от 24 до 66 лет (в среднем около 45 лет), что достаточно для устойчивой оценки нормы и коэффициента вариации стока. Все ряды проверены на однородность по критериям Фишера и Стьюдента при уровне значимости 5 %; ряды, не прошедшие проверку по среднему, из рассмотрения исключены. Имеющиеся пропуски восстановлены методом гидрологической аналогии по рекам-аналогам.

Сценарные значения температуры воздуха и осадков получены с помощью интерактивного сервиса KNMI Climate Explorer (climexp.knmi.nl), предоставляющего доступ к результатам ансамбля климатических моделей шестой фазы проекта сравнения связанных моделей (CMIP6). Для каждого района по координатам водосборов выгружены осреднённые по ансамблю изменения приземной температуры воздуха и осадков по четырём сценариям семейства Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) на периоды 2021–2040 и 2041–2060 гг. относительно базового периода 1995–2014 гг. (рисунок 4).

• **one member per model:** members of "CMIP6 mean (one member per model)"
 • **all models:** ensemble mean of each model
 • **all members:** all members available

Select field		Choose a field and press this button					
Surface variables							
model	exp	tas	tas min	tas max	pr	rsds	psl
CMIP6 mean (one member per model)	ssp126	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	ssp245	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	ssp370	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	ssp585	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CMIP6 mean	ssp126	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	ssp245	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	ssp370	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	ssp585	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CMIP6 mean over all members	ssp126	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Рисунок 4. Выбор ансамбля моделей и сценариев CMIP6 в сервисе KNMI Climate Explorer.

Анализ хронологического хода стока выполнялся по разностно-интегральным кривым, позволяющим выделить многоводные и маловодные фазы и оценить синхронность колебаний стока на соседних реках. Пример таких кривых для рек Западной Сибири приведён на рисунке 5: до конца 1950-х годов ход стока на большинстве постов согласован, далее выделяется продолжительная многоводная фаза 1960–1980-х годов, сменяющаяся маловодьем в конце ряда.

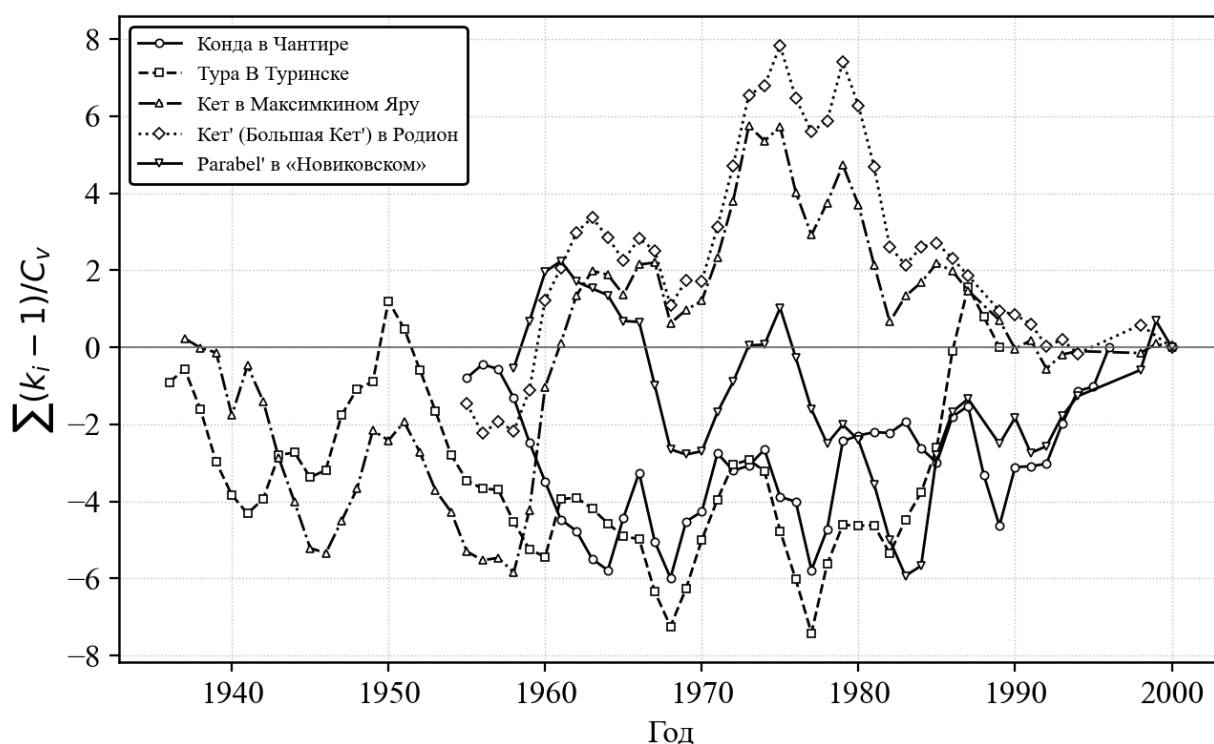


Рисунок 5. Разностно-интегральные кривые годового стока рек бассейна Оби.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ

В основу работы положена вероятностная модель формирования речного стока, разработанная В.В. Коваленко и развиваемая на кафедре инженерной гидрологии РГГМУ [1, 2]. В рамках этого подхода многолетний годовой сток рассматривается как случайный процесс, порождаемый стохастическим дифференциальным уравнением, а эволюция его плотности вероятности описывается уравнением Фоккера–Планка–Колмогорова. Преимущество модели в том, что параметры распределения стока оказываются связаны с физическими характеристиками водосбора и климата, что и позволяет переходить к сценарным оценкам.

2.1. Уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова

Процесс формирования годового стока Q описывается линейным стохастическим дифференциальным уравнением (уравнением Ланжевена)

$$\frac{dQ}{dt} = -(\bar{c} + \tilde{c})Q + (\bar{N} + \tilde{N}) \quad (2.1)$$

где Q – годовой сток; c – параметр, обратный произведению коэффициента стока на время релаксации водосбора; N – приведённое внешнее воздействие (осадки); черта сверху обозначает математическое ожидание (норму), а знак тильды – флуктуационную (шумовую) составляющую. Параметры c и N связаны с гидрологическими характеристиками соотношениями

$$c = \frac{1}{k\tau}, \quad N = \frac{\dot{X}}{\tau} \quad (2.2)$$

в которых k – коэффициент стока, τ – время релаксации (добегания) водосбора, $\dot{X}$ – норма осадков. Составляющая $-\tilde{c}Q$ представляет собой мультипликативный белый шум, отражающий колебания характеристик водосбора, а $\tilde{N}$ – аддитивный белый шум колебаний осадков; их интенсивности (спектральные плотности) обозначены далее $G\tilde{c}$, $G\tilde{N}$, а взаимная интенсивность – $G\tilde{c}\tilde{N}$.

Уравнению (2.1) статистически эквивалентно уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова для плотности вероятности $p(Q, t)$ стока

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Q}(A_1 p) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(A_2 p) \quad (2.3)$$

Коэффициент сноса $A_1(Q)$ и коэффициент диффузии $A_2(Q)$ для рассматриваемой модели имеют вид

$$A_1(Q) = -\bar{c}Q + \bar{N} \quad (2.4)$$

$$A_2(Q) = G_{\bar{c}}Q^2 - 2G_{\bar{c}\bar{N}}Q + G_{\bar{N}} \quad (2.5)$$

Квадратичная по Q форма коэффициента диффузии обусловлена мультипликативным характером шума и приводит к тому, что стационарным решением уравнения (2.3) является трёхпараметрическое распределение Пирсона III типа (гамма-распределение)

$$p(Q) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} (Q - Q_0)^{a-1} \exp(-b(Q - Q_0)) \quad (2.6)$$

Существенно, что используемая в нормативной практике кривая обеспеченности получается здесь не подбором, а как следствие физики процесса. Поскольку ряды наблюдений сравнительно коротки, на практике уравнение ФПК заменяют системой обыкновенных дифференциальных уравнений для начальных моментов m_1, m_2, m_3 [1]:

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{dt} = -(\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}})m_1 - 0,5G_{\bar{c}\bar{N}} + \bar{N} \\ \frac{dm_2}{dt} = -2(\bar{c} - G_{\bar{c}})m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\bar{c}\bar{N}}m_1 + G_{\bar{N}} \\ \frac{dm_3}{dt} = -3(\bar{c} - 1,5G_{\bar{c}})m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7,5G_{\bar{c}\bar{N}}m_2 + 3G_{\bar{N}}m_1 \end{cases} \quad (2.7)$$

В установившемся (стационарном) режиме производные по времени обращаются в нуль. Тогда из первого уравнения системы (2.7) получается норма стока (математическое ожидание)

$$m_1 = \frac{\bar{N} - 0,5G_{\bar{c}\bar{N}}}{\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}}} \quad (2.8)$$

Из второго уравнения, выражая дисперсию через начальные моменты, находят коэффициент вариации, а для гамма-распределения справедливо соотношение между коэффициентами асимметрии и вариации

$$C_v^2 = \frac{G_{\tilde{c}}}{2\tilde{c} - G_{\tilde{c}}} , \quad C_s = 2C_v \quad (2.9)$$

Важной особенностью модели является возможность потери устойчивости моментов. Параметром устойчивости служит отношение

$$\beta = \frac{G_{\tilde{c}}}{\tilde{c}} \quad (2.10)$$

При $\beta > 0,67$ теряет устойчивость третий момент (коэффициент асимметрии), при $\beta > 1$ – второй момент (коэффициент вариации), а при приближении β к 2 – само распределение. Условие устойчивости всех характеристик имеет вид $\tilde{c} > 2G_{\tilde{c}}$. Превышение этих порогов указывает на районы, где формирование стока становится неустойчивым и где сценарные оценки требуют особой осторожности. Общая последовательность расчёта по модели представлена на рисунке 6.

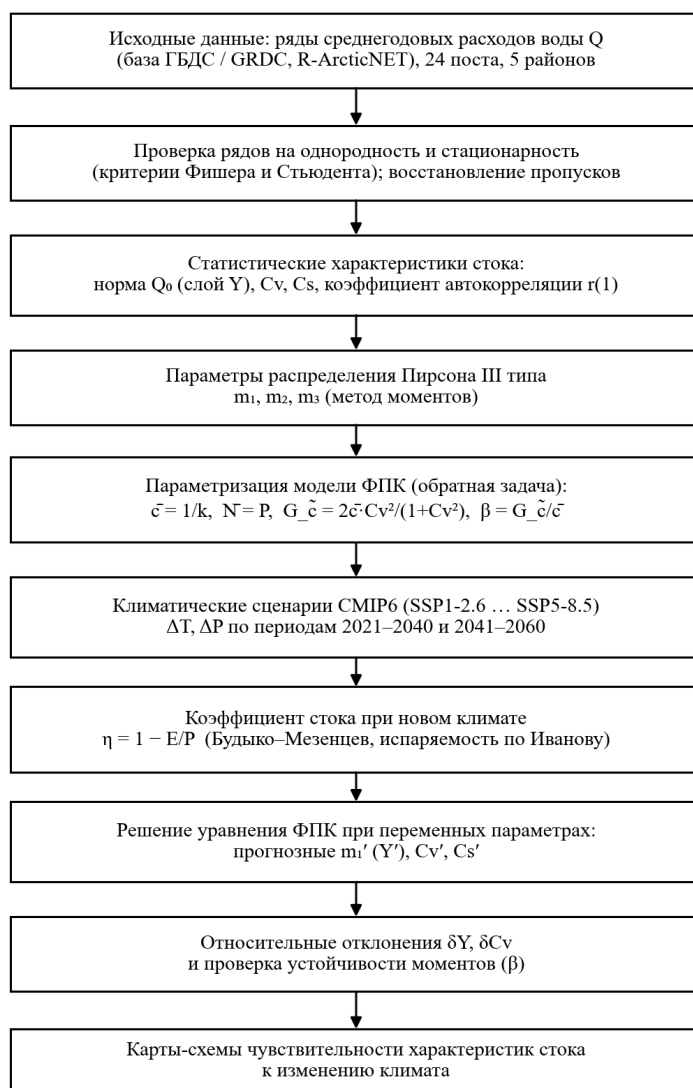


Рисунок 6. Схема методики сценарной оценки вероятностных характеристик годового стока.

2.2. Зависимость коэффициента стока от климатических параметров

Климат входит в модель через коэффициент стока k , определяющий параметр сноса $\bar{c} = 1/(k\tau)$. Связь коэффициента стока с осадками и температурой устанавливается уравнением водного баланса замкнутого водосбора за многолетний период, когда изменением влагозапасов можно пренебречь:

$$P = E + R, \quad \eta = k = \frac{R}{P} = 1 - \frac{E}{P} \quad (2.11)$$

где P – годовые осадки; E – суммарное испарение; R – слой стока. Испарение связывают с осадками и теплоэнергетическими ресурсами (испаряемостью E_0) формулами семейства Будыко. В работе рассмотрены три классические зависимости. Формула Тюрка

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}, \quad L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (2.12)$$

где L – температурный параметр (мм), приближённо равный испаряемости, T – средняя годовая температура воздуха, °C. Формула Багрова задаётся дифференциальным соотношением, аналитическое решение которого в форме Мезенцева имеет вид

$$\frac{dE}{dP} = 1 - \left(\frac{E}{E_0}\right)^n, \quad E = \frac{PE_0}{(P^n + E_0^n)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.13)$$

а формула Ольдекопа выражает испарение через гиперболический тангенс отношения осадков к испаряемости

$$E = E_0 \operatorname{th} \frac{P}{E_0} \quad (2.14)$$

Поскольку формула Тюрка при средних годовых температурах ниже -10 °C даёт отрицательное значение параметра L и теряет физический смысл, для холодных водосборов района исследования коэффициент стока вычислялся по зависимости Будыко–Мезенцева с испаряемостью, оценённой по формуле Н.Н. Иванова, которая остаётся положительной при любых температурах:

$$E_0 = 0,0018(25 + T)^2(100 - r) , \quad \eta = 1 - \left(1 + \left(\frac{P}{E_0}\right)^n\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (2.15)$$

где r – относительная влажность воздуха, %, $n \approx 2,3$ – параметр, характеризующий ландшафт водосбора. Рассчитанная по (2.15) зависимость коэффициента стока от осадков при разных температурах показана на рисунке 7. Видно, что при потеплении коэффициент стока убывает (растёт испарение), а при увеличении осадков – возрастает; именно соотношение этих двух эффектов определяет знак изменения стока в сценарных расчётах.

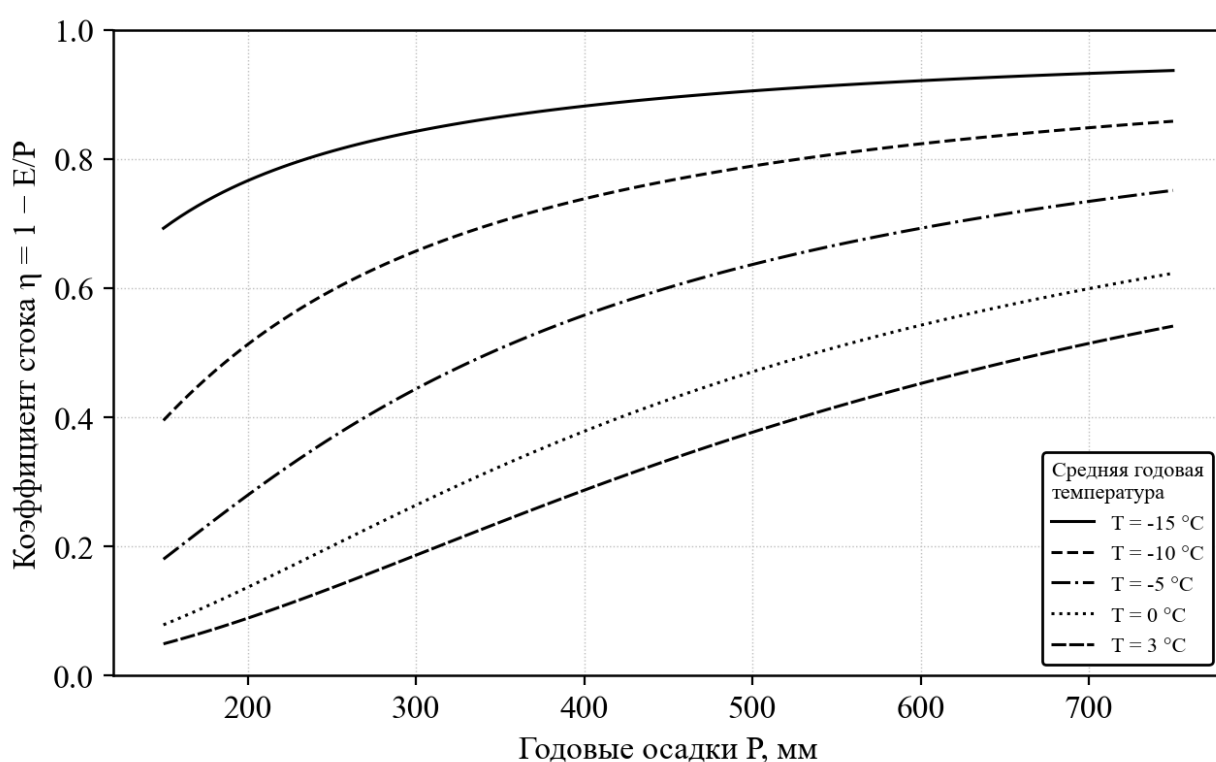


Рисунок 7. Зависимость коэффициента стока от годовых осадков при различных средних годовых температурах воздуха.

Для расчета среднемноголетнего испарения (в мм) с поверхности суши в работе использована формула А.Н. Постникова:

$$E_c = E_0(1 - e^{-Z}),$$

где E_0 – испаряемость:

$$E_0 = 16,8(0,8 + 0,011t)(90 - 52e^{0,11(6-t)}),$$

$$Z = \frac{P}{E_0} + \left(\frac{P}{E_0}\right)^2,$$

$$t = \frac{\sum T_i}{12},$$

где T – норма температуры i -го месяца теплого периода года, к которому относились месяцы с положительными температурами.

ГЛАВА 3. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ФПК

Параметризация модели выполняется в два этапа. Сначала по рядам наблюдений оцениваются статистические характеристики стока и связанные с ними параметры распределения Пирсона III типа, затем по этим характеристикам решается обратная задача – определяются параметры уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова. Все расчёты продублированы в электронных таблицах и на языке Python; результаты обоих расчётов полностью совпадают.

Параметризация выполнена для квазистационарного периода с 1931 г. по 1990-ый (см. табл.) на примере р. Онега (д. Казаково).

Таблица 1. Гидроклиматические характеристики ретроспективного периода (1931-1990 гг.).

№	Координаты		Вероятностные характеристики стока					Характеристики климата
	широт а	долгот а	q, л/с км ²	Y, мм	C _v	C _s /C _v	C _s	N, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	61.50	38.93	-	283	0.22	1.3	0.28	675

3.1. Определение параметров уравнения Пирсона

Для каждого поста по ряду среднегодовых расходов воды Q вычислялись норма стока (среднее многолетнее значение), среднее квадратическое отклонение, коэффициенты вариации и асимметрии и коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда.

Среднегодовое количество осадков переводилось в слой стока Y (мм) по площади водосбора F :

$$Y = \frac{Q_0 \cdot 31\,557\,600}{F \cdot 10^6} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

Коэффициент вариации и коэффициент асимметрии определялись методом моментов:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}} / \bar{Q}, \quad C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^3}{n\sigma^3} \quad (3.2)$$

Полученные характеристики позволяют перейти к начальным моментам распределения Пирсона III типа, необходимым для параметризации уравнения ФПК:

$$m_2 = m_1^2(1 + C_v^2), \quad m_3 = m_1^3(C_s C_v^3 + 3C_v^2 + 1) \quad (3.3)$$

Расчёт статистических характеристик выполнен в электронных таблицах с использованием встроенных функций (СРЗНАЧ, СТАНДОТКЛОН, СКОС, КОРРЕЛ), что обеспечивает прозрачность и воспроизводимость вычислений (рисунок 8). Полный перечень характеристик по всем 24 постам приведён в приложении А.

Таблица 2. Параметризация уравнений Пирсона и ФПК

№	a	b ₀	b ₁	k	G _{сN}	G _N	c
1	2	3	4	5	6	7	8
1	274.0	-1379	-8.7	0.42	-21	6695	2.43

№	Река — пост	Регион	Период	n	Q ₀ , м³/с	F, км²	Слой Y, мм	C _v	C _s	г(1)	Осадки P, мм	T, °C	Кэф. стока k
1	Большая Кеть — Родионовка	Зап. Сибирь	1955–2000	41	469,1	71500	207,0	0,19	0,22	1,00	510	-1,3	0,41
2	Кеть — Максимкин Яр	Зап. Сибирь	1937–2000	60	240,9	38400	198,0	0,20	0,48	0,37	526	-0,9	0,38
3	Конда — Чантырья	Зап. Сибирь	1955–1996	42	80,2	13900	182,0	0,28	0,13	-0,51	500	-0,4	0,36
4	Парабель — Новиково	Зап. Сибирь	1958–2000	39	74,2	17900	130,8	0,38	0,35	#ДЕЛ/0!	500	-1,5	0,26
5	Тура — Туринск	Зап. Сибирь	1936–1989	54	116,2	29000	126,4	0,44	0,54	0,34	541	1,9	0,23
6	Енисей — Игарка	Вост. Сибирь	1936–1999	64	18395,1	2440000	237,9	0,07	-0,01	0,19	500	-7	0,48
7	Енисей — Подкаменная Тунгуск	Вост. Сибирь	1936–1999	60	10768,8	1760000	193,1	0,09	-0,26	0,16	500	-2,5	0,39
8	Нижняя Тунгуска — Ербогачён	Вост. Сибирь	1952–1999	44	290,2	77400	118,3	0,21	0,13	-0,49	366	-5,6	0,32
9	Оленёк — Сухана	Вост. Сибирь	1937–1999	62	714,8	127000	177,6	0,25	0,15	-0,02	300	-11	0,59
10	Оленёк — низовье	Вост. Сибирь	1964–1999	35	1172,8	198000	186,9	0,28	0,35	#ДЕЛ/0!	250	-13	0,75
11	Пеледуй — Сользавод	Вост. Сибирь	1936–1987	52	48,9	13600	113,5	0,26	0,62	0,66	420	-5,5	0,27
12	Учур — Чульбю	Вост. Сибирь	1954–1999	46	1211,2	108000	353,9	0,19	0,33	-0,29	500	-7,5	0,71
13	Хилок — Хилок	Вост. Сибирь	1945–1997	53	42,0	15400	86,1	0,42	0,34	0,23	378	-2	0,23
14	Анадырь — Новый Ерополь	Сев.-Восток	1958–1988	31	472,8	47300	315,5	0,23	0,71	#ДЕЛ/0!	400	-8	0,79
15	Индигирка — Усть-Нера	Сев.-Восток	1944–1999	56	421,5	83500	159,3	0,22	0,47	0,16	250	-15	0,64
16	Колыма — Оротук	Сев.-Восток	1957–1996	40	282,8	43600	204,7	0,26	0,06	#ДЕЛ/0!	290	-11,5	0,71
17	Колыма — Среднеколымск	Сев.-Восток	1927–1970	42	2249,0	361000	196,6	0,19	0,41	0,02	280	-11	0,70
18	Колыма — Усть-Среднекан	Сев.-Восток	1933–1993	61	724,6	99400	230,0	0,23	0,03	0,12	310	-10,5	0,74
19	Кулу — Кулу	Сев.-Восток	1942–1994	53	95,0	9550	313,9	0,22	-0,33	0,28	380	-12	0,83
20	Вага — Шенкурск	Сев.-Европ.	1915–1944	28	236,5	38400	194,4	0,28	0,75	0,32	570	2	0,34
21	Вымь — Половники	Сев.-Европ.	1956–1988	33	260,0	25100	326,9	0,17	0,00	#ДЕЛ/0!	520	0,7	0,63
22	Мезень — Большая Пысса	Сев.-Европ.	1961–1994	34	186,4	16100	365,4	0,15	0,40	#ДЕЛ/0!	550	-0,7	0,66
23	Пинега — Засурье	Сев.-Европ.	1965–1988	24	101,0	17100	186,4	0,22	2,64	#ДЕЛ/0!	570	-0,2	0,33
24	Юг — Подосиновец	Сев.-Европ.	1934–1999	66	118,8	15200	246,7	0,27	1,19	0,13	560	1,5	0,44

Рисунок 8. Расчёт статистических характеристик годового стока в электронных таблицах.

Таблица 3. Осреднённые по районам характеристики годового стока

Район	Слой Y, мм	C _v	C _s	Кэф. стока k
Сев.-Европ.	264	0,22	0,95	0,48
Зап. Сибирь	169	0,30	0,33	0,33
Вост. Сибирь	183	0,22	0,20	0,47
Сев.-Восток	237	0,23	0,22	0,73

Слой стока закономерно убывает от севера Европейской части (в среднем около 270 мм) к континентальным районам Восточной Сибири, где на отдельных постах он опускается до 85–120 мм. Коэффициент вариации годового стока изменяется в широких пределах – от 0,07 на Енисее, сток которого сглажен огромной площадью водосбора, до 0,44 на малых реках Западной Сибири. Коэффициент асимметрии в среднем близок к удвоенному коэффициенту вариации, что согласуется с принятым в модели гамма-распределением стока (рисунок 9).

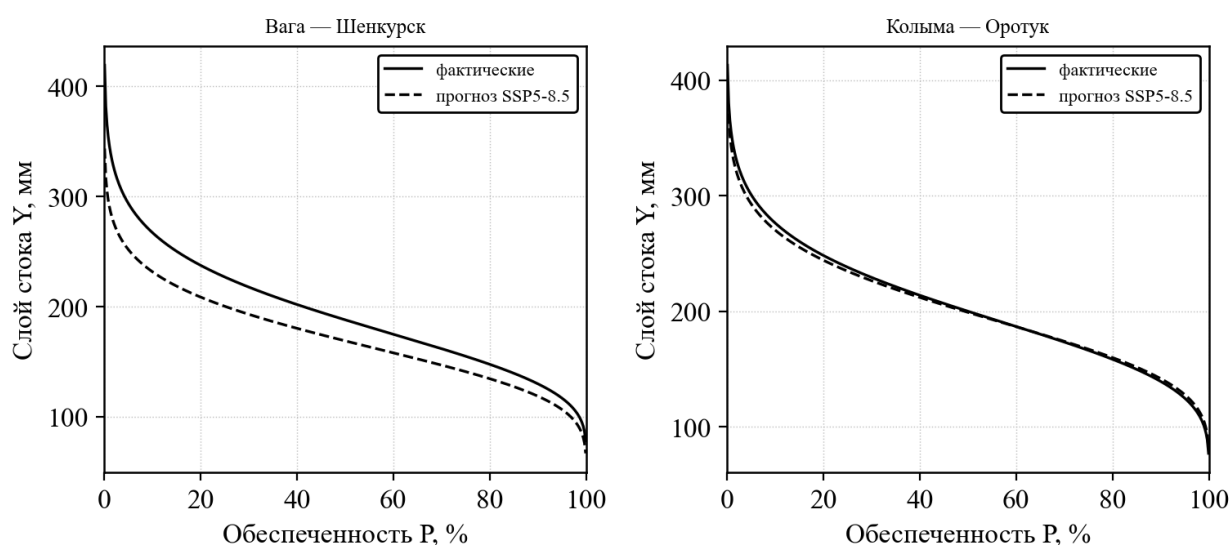


Рисунок 9. Кривые обеспеченности годового стока, построенные по распределению Пирсона III типа (фактические и прогнозные).

3.2. Определение параметров уравнения ФПК

Обратная задача параметризации решалась при нормировке времени релаксации $\tau = 1$ год, при которой норма стока, выражаемая как отношение N к $\bar{c}$, не зависит от τ . Тогда норма приведённого воздействия равна норме осадков ($\bar{N} = P$), а параметр сноса – обратной величине коэффициента стока:

$$\bar{N} = P, \quad \bar{c} = \frac{1}{k}, \quad k = \frac{Y}{P} \quad (3.4)$$

Интенсивность мультипликативного шума $G_{\tilde{c}}$ находилась из условия, чтобы стационарное решение модели воспроизводило фактический коэффициент вариации стока. Из (2.9) следует

$$G_{\tilde{c}} = \frac{2\bar{c}C_v^2}{1+C_v^2}, \quad \beta = \frac{2C_v^2}{1+C_v^2} \quad (3.5)$$

Рассчитанные таким образом параметры модели для всех постов приведены в приложении Б; фрагмент расчёта показан на рисунке 10.

№	Река — пост	$Y=m_1$, мм	C_v	$\tilde{c}=1/k$	$\tilde{N}=P$, мм	$G_{\tilde{c}}$	$\beta=G_{\tilde{c}}/\tilde{c}$	m_2	Устойчивость
1	Большая Кеть — Родионовка	207,0	0,190	2,463	510,0	0,171	0,069	44410,8	устойчива
2	Кеть — Максимкин Яр	198,0	0,195	2,657	526,0	0,195	0,073	40690,6	устойчива
3	Конда — Чантырья	182,0	0,277	2,747	500,0	0,390	0,142	35675,7	устойчива
4	Парабель — Новиково	130,8	0,385	3,822	500,0	0,987	0,258	19654,1	устойчива
5	Тура — Туринск	126,4	0,440	4,279	541,0	1,386	0,324	19074,6	устойчива
6	Енисей — Игарка	237,9	0,073	2,102	500,0	0,022	0,011	56904,9	устойчива
7	Енисей — Подкаменная Тунгуск	193,1	0,086	2,589	500,0	0,038	0,015	37562,2	устойчива
8	Нижняя Тунгуска — Ербогачён	118,3	0,207	3,093	366,0	0,254	0,082	14601,9	устойчива
9	Оленёк — Сухана	177,6	0,251	1,689	300,0	0,200	0,119	33539,8	устойчива
10	Оленёк — низовье	186,9	0,281	1,337	250,0	0,195	0,146	37688,2	устойчива
11	Пеледуй — Сользавод	113,5	0,256	3,702	420,0	0,455	0,123	13716,7	устойчива
12	Учур — Чульбу	353,9	0,195	1,413	500,0	0,103	0,073	130012,1	устойчива
13	Хилок — Хилок	86,1	0,423	4,389	378,0	1,334	0,304	8746,6	устойчива
14	Анадырь — Новый Ерополь	315,5	0,227	1,268	400,0	0,125	0,098	104664,3	устойчива
15	Индигирка — Усть-Нера	159,3	0,218	1,569	250,0	0,143	0,091	26584,0	устойчива
16	Колыма — Оротук	204,7	0,264	1,417	290,0	0,185	0,131	44839,5	устойчива
17	Колыма — Среднеколымск	196,6	0,190	1,424	280,0	0,099	0,069	40042,0	устойчива
18	Колыма — Усть-Среднекан	230,0	0,234	1,348	310,0	0,140	0,104	55807,1	устойчива
19	Кулу — Кулу	313,9	0,225	1,211	380,0	0,116	0,096	103491,1	устойчива
20	Вага — Шенкурск	194,4	0,281	2,933	570,0	0,428	0,146	40745,9	устойчива
21	Вымь — Половники	326,9	0,165	1,591	520,0	0,085	0,053	109757,2	устойчива
22	Мезень — Большая Пысса	365,4	0,154	1,505	550,0	0,070	0,046	136654,1	устойчива
23	Пинега — Засурье	186,4	0,222	3,057	570,0	0,286	0,094	36469,5	устойчива
24	Юг — Подосиновец	246,7	0,268	2,270	560,0	0,305	0,134	65267,5	устойчива

Рисунок 10. Расчёт параметров модели ФПК в электронных таблицах.

Таблица 3. Расчет сценарных (2041-2100 гг.) параметров уравнений ФПК и Пирсона

№	G_{cN}	G_N	$c_{cц}$	$N_{cц}$, мм	-
1	2	3	4	5	-
1	-21	6695	2.43	753	-
a	b_0	b_1	m_1	m_2	m_3
6	7	8	9	10	11
305.8	-1379	-8.7	314	102998	35040437

Параметр устойчивости β на всех постах не превышает 0,33, оставаясь существенно ниже первого критического порога 0,67. Это означает, что в современных условиях формирование годового стока на рассматриваемой территории устойчиво, а все три вероятностные характеристики (норма, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии) определены корректно. Наибольшие значения β (0,25–0,33) приходятся на малые реки Западной Сибири и Забайкалья с повышенной изменчивостью стока, наименьшие – на крупные транзитные реки.

Пространственное распределение фактических характеристик стока показано на рисунках 11–13. Слой стока убывает с северо-запада на юго-восток вслед за осадками; коэффициент стока, напротив, возрастает к холодным районам с многолетней мерзлотой, где испарение мало; коэффициент вариации повышен на малых континентальных реках.

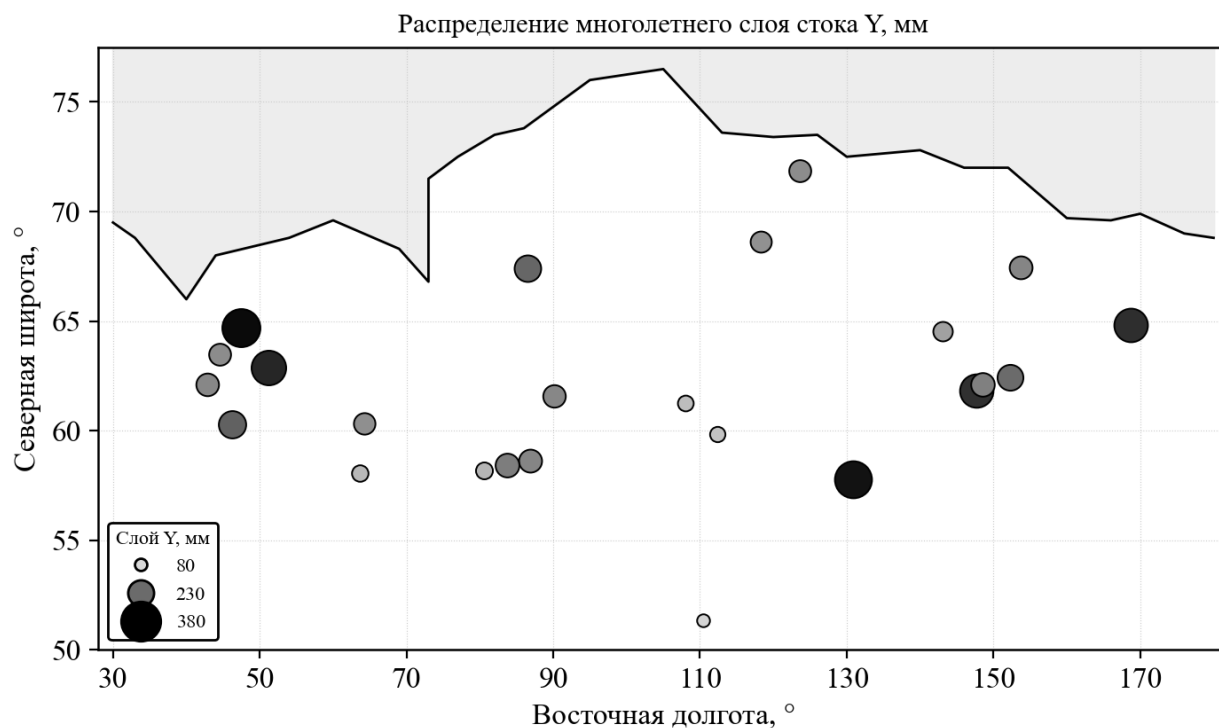


Рисунок 11. Распределение многолетнего слоя стока $\bar{Y}$.

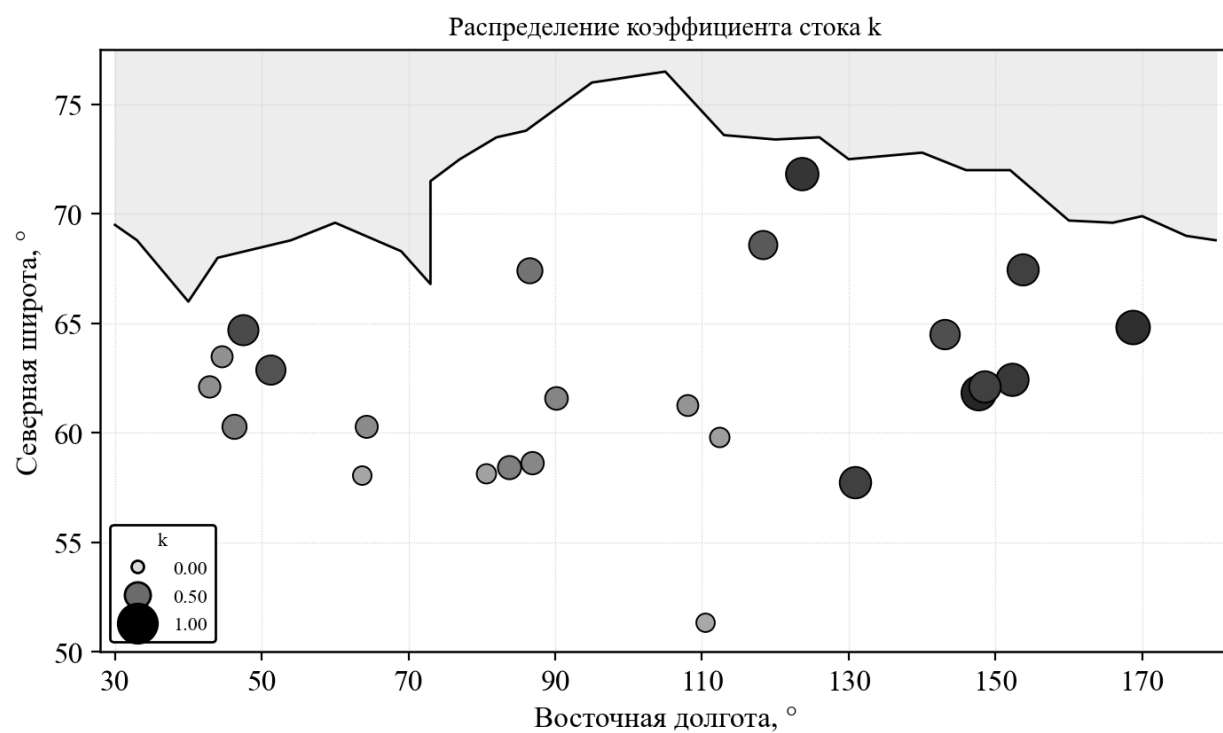


Рисунок 12. Распределение коэффициента стока k .

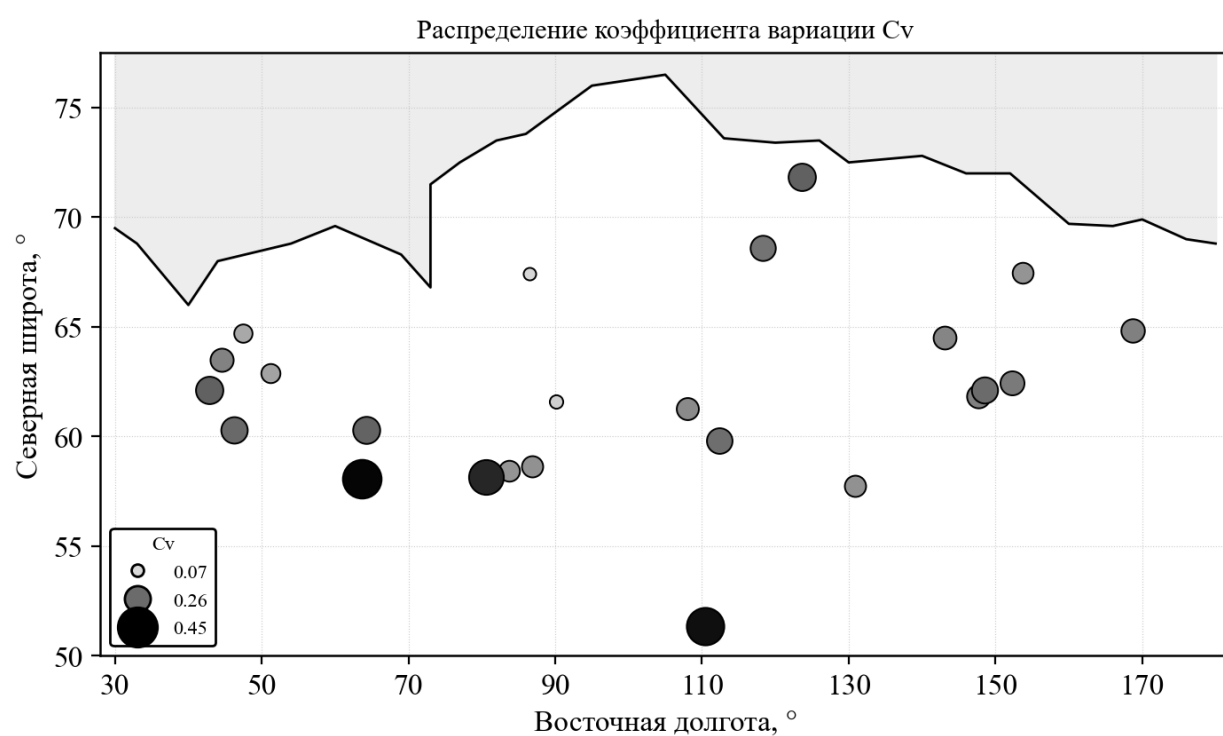


Рисунок 13. Распределение коэффициента вариации C_v .

ГЛАВА 4. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ФПК ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Сценарные оценки получены для четырёх траекторий изменения климата CMIP6 – SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5, отвечающих условиям от жёсткого сокращения выбросов парниковых газов до их неограниченного роста. Изменения температуры воздуха и осадков по районам, осреднённые по ансамблю моделей, приведены в таблице 4 для двух будущих периодов относительно базового 1995–2014 гг. Во всех сценариях и районах потепление превышает рост осадков; наибольшее увеличение осадков характерно для северо-востока, наименьшее – для севера Европейской части.

Таблица 4. Изменения температуры воздуха и осадков по сценариям CMIP6

Район	Сценарий	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ 2021–40	$\Delta P, \%$ 2021–40	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ 2041–60	$\Delta P, \%$ 2041–60
Сев.-Европ.	SSP1-2.6	+1,2	+2,8	+1,6	+4,0
	SSP2-4.5	+1,2	+2,6	+1,8	+4,0
	SSP3-7.0	+1,1	+2,5	+2,2	+4,2
	SSP5-8.5	+1,4	+3,0	+2,8	+3,8
Зап. Сибирь	SSP1-2.6	+1,2	+3,9	+1,6	+5,1
	SSP2-4.5	+1,2	+4,8	+2,0	+5,7
	SSP3-7.0	+1,2	+3,0	+2,2	+4,3
	SSP5-8.5	+1,6	+3,6	+2,9	+6,4
Вост. Сибирь	SSP1-2.6	+1,1	+3,2	+1,6	+5,3
	SSP2-4.5	+1,1	+4,0	+2,0	+6,3
	SSP3-7.0	+1,1	+2,2	+2,1	+5,3
	SSP5-8.5	+1,4	+3,9	+2,6	+8,7
Сев.-Восток	SSP1-2.6	+1,1	+5,5	+1,6	+8,5
	SSP2-4.5	+1,1	+5,9	+2,0	+8,5
	SSP3-7.0	+1,0	+4,4	+2,2	+8,9
	SSP5-8.5	+1,4	+6,4	+2,7	+11,4

4.1. Решение при постоянных параметрах модели ФПК

В первом приближении, принятом в методических рекомендациях РГГМУ [3], сценарий учитывается только через аддитивное воздействие: изменяется норма осадков, а параметры $\bar{c}$, $\tilde{G}$ и отношение C_s/C_v остаются

неизменными. Тогда прогнозная норма стока следует за нормой осадков, а форма кривой обеспеченности сохраняется:

$$m_1^{\text{пр}} = \frac{\bar{N}^{\text{пр}} - 0,5G_{\bar{c}}}{\bar{c} - 0,5G_{\bar{c}}} , \quad \bar{N}^{\text{пр}} = \frac{\dot{X}^{\text{пр}}}{\tau} \quad (4.1)$$

При таком подходе относительное изменение нормы стока примерно равно относительному изменению осадков. Поскольку по сценариям осадки растут на 4–11 %, норма стока в этом приближении увеличивается на ту же величину, а коэффициент вариации остаётся неизменным. Такая оценка, однако, не учитывает рост испарения при потеплении и потому даёт верхнюю границу изменения стока.

Таблица 4. Расчет сценарных (2041-2100 гг.) вероятностных характеристик слоя годового стока

№	Вероятностные характеристики стока				Изменения в %			
	Y _{сц} , мм	C _{Vсц}	C _S /C _V	C _{Scц}	ΔN	ΔY	ΔC _V	ΔC _S
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	314	0.20	1.33	0.27	11	11	-7	-3

4.2. Решение при переменных параметрах модели ФПК

Более полная оценка учитывает изменение коэффициента стока при потеплении. Для нового климата по формуле (2.15) пересчитывается коэффициент стока, через него – параметр сноса $\bar{c} = 1/k$, после чего из стационарных уравнений (2.8) и (2.9) находятся прогнозные норма стока и коэффициент вариации, а затем относительные отклонения от современных значений:

$$\delta Y = \frac{Y^{\text{пр}} - Y}{Y} \cdot 100 \% , \quad \delta C_v = \frac{C_v^{\text{пр}} - C_v}{C_v} \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

Результаты расчёта по сценарию SSP5-8.5 на период 2041–2060 гг. показаны на рисунке 14; полные результаты по всем сценариям приведены в

приложении В. Обобщённые по районам изменения нормы стока и коэффициента вариации к середине века приведены в таблице 5.

№	Река — пост	Период	ΔT , °C	ΔP , %	P' , мм	T' , °C	K'	Y' , мм	Cv'	Cs'	δY , %	δCv , %
1	Большая Кеть — Родионовка	2021–2040	1,6	3,6	528,4	0,3	0,378	199,6	0,183	0,366	-3,6	-3,7
1	Большая Кеть — Родионовка	2041–2060	2,9	6,4	542,6	1,6	0,353	191,6	0,177	0,353	-7,5	-7,0
2	Кеть — Максимкин Яр	2021–2040	1,6	3,6	544,9	0,7	0,351	191,1	0,188	0,376	-3,5	-3,6
2	Кеть — Максимкин Яр	2041–2060	2,9	6,4	559,7	2,0	0,328	183,7	0,182	0,364	-7,2	-6,8
3	Конда — Чантырья	2021–2040	1,6	3,6	518,0	1,2	0,337	174,8	0,266	0,531	-4,0	-4,0
3	Конда — Чантырья	2041–2060	2,9	6,4	532,0	2,5	0,314	167,3	0,256	0,511	-8,1	-7,6
4	Парабель — Новиково	2021–2040	1,6	3,6	518,0	0,1	0,243	126,0	0,369	0,738	-3,7	-4,1
4	Парабель — Новиково	2041–2060	2,9	6,4	532,0	1,4	0,227	120,8	0,355	0,710	-7,7	-7,7
5	Тура — Туринск	2021–2040	1,6	3,6	560,5	3,5	0,217	121,6	0,421	0,841	-3,8	-4,3
5	Тура — Туринск	2041–2060	2,9	6,4	575,6	4,8	0,202	116,6	0,404	0,808	-7,8	-8,1
6	Енисей — Игарка	2021–2040	1,4	3,9	519,5	-5,6	0,454	235,6	0,071	0,143	-1,0	-2,4
6	Енисей — Игарка	2041–2060	2,6	8,7	543,5	-4,4	0,438	238,1	0,070	0,140	0,1	-4,1
7	Енисей — Подкаменная Тунгус	2021–2040	1,4	3,9	519,5	-1,1	0,364	189,1	0,084	0,168	-2,0	-2,9
7	Енисей — Подкаменная Тунгус	2041–2060	2,6	8,7	543,5	0,1	0,350	190,2	0,082	0,165	-1,5	-4,8
8	Нижняя Тунгуска — Ербогачё	2021–2040	1,4	3,9	380,3	-4,2	0,300	114,1	0,199	0,398	-3,5	-3,8
8	Нижняя Тунгуска — Ербогачё	2041–2060	2,6	8,7	397,8	-3,0	0,285	113,3	0,194	0,387	-4,3	-6,4
9	Оленёк — Сухана	2021–2040	1,4	3,9	311,7	-9,6	0,553	172,5	0,242	0,485	-2,9	-3,5
9	Оленёк — Сухана	2041–2060	2,6	8,7	326,1	-8,4	0,525	171,1	0,236	0,471	-3,6	-6,2
10	Оленёк — низовье	2021–2040	1,4	3,9	259,8	-11,6	0,696	180,9	0,270	0,540	-3,2	-3,7
10	Оленёк — низовье	2041–2060	2,6	8,7	271,8	-10,4	0,657	178,7	0,262	0,524	-4,4	-6,7
11	Пеледуй — Сользавод	2021–2040	1,4	3,9	436,4	-4,1	0,253	110,6	0,248	0,495	-2,5	-3,3
11	Пеледуй — Сользавод	2041–2060	2,6	8,7	456,5	-2,9	0,242	110,6	0,242	0,483	-2,5	-5,6
12	Учур — Чульбю	2021–2040	1,4	3,9	519,5	-6,1	0,676	351,0	0,190	0,381	-0,8	-2,4
12	Учур — Чульбю	2041–2060	2,6	8,7	543,5	-4,9	0,653	354,9	0,187	0,374	0,3	-4,1
13	Хилок — Хилок	2021–2040	1,4	3,9	392,7	-0,6	0,210	82,5	0,404	0,807	-4,2	-4,7

Рисунок 14. Сценарная оценка характеристик стока по траектории SSP5-8.5 (электронные таблицы).

Таблица 5. Изменение нормы стока и коэффициента вариации к периоду 2041–2060 гг.

Район	δY , % (SSP2-4.5)	δY , % (SSP5-8.5)	δCv , % (SSP2-4.5)	δCv , % (SSP5-8.5)
Сев.-Европ.	-4,6	-10,9	-4,4	-7,7
Зап. Сибирь	-3,1	-7,7	-4,7	-7,4
Вост. Сибирь	-2,6	-2,6	-4,5	-5,7
Сев.-Восток	0,7	0,3	-3,9	-5,4

Расчёты показывают два принципиально разных отклика. На реках севера Европейской части и юга Западной Сибири, где средняя годовая температура близка к нулю и испарение сравнительно велико, потепление перевешивает рост осадков, и норма стока снижается – по сценарию SSP5-8.5 на 8–12 %. Напротив, на холодных реках Северо-Востока и Восточной Сибири, расположенных в зоне сплошной мерзлоты, испарение мало и слабо реагирует на потепление, поэтому увеличение осадков оказывается определяющим, а норма стока остаётся практически неизменной или

несколько возрастает. Зависимость отклика стока от величины потепления для характерных рек каждого района показана на рисунке 15.

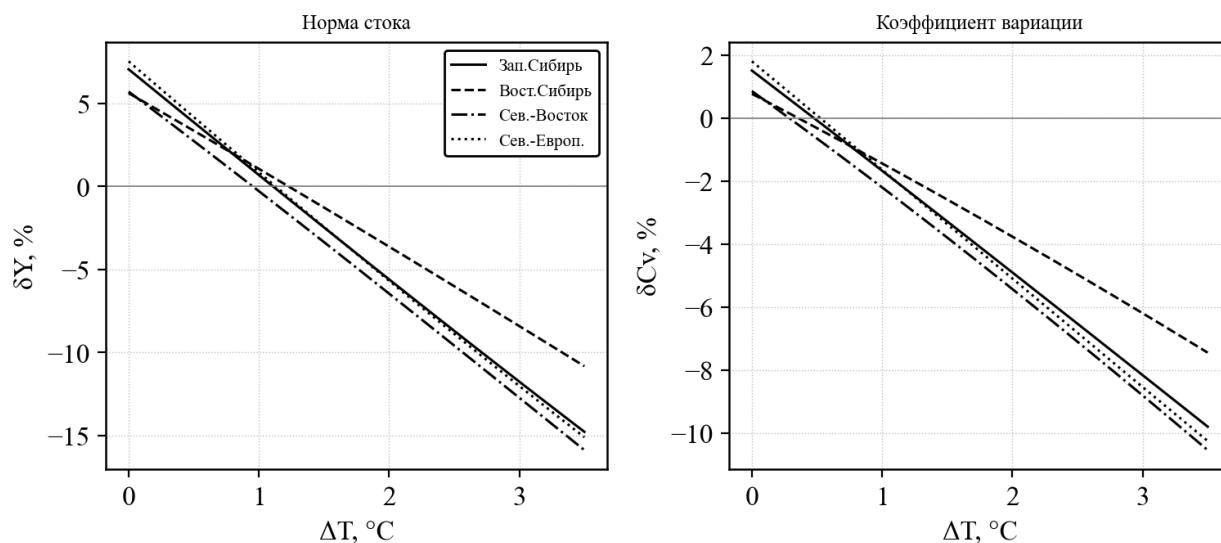


Рисунок 15. Зависимость относительного изменения нормы стока (слева) и коэффициента вариации (справа) от величины потепления.

Коэффициент вариации по всем сценариям и районам снижается на 3–8 %. Это объясняется тем, что при уменьшении коэффициента стока параметр сноса $\bar{c}$ растёт, а вместе с ним увеличивается знаменатель в выражении (2.9), что и приводит к уменьшению C_v . Снижение изменчивости стока означает некоторое сглаживание колебаний водности, однако оно невелико и не меняет качественной картины режима.

Пространственная картина чувствительности нормы стока обобщена на карте-схеме (рисунок 16). Уменьшение стока (светлые кружки) охватывает запад рассматриваемой территории, увеличение (тёмные кружки) – её восточные и северо-восточные районы. Аналогичная карта-схема изменения коэффициента вариации приведена на рисунке 17.

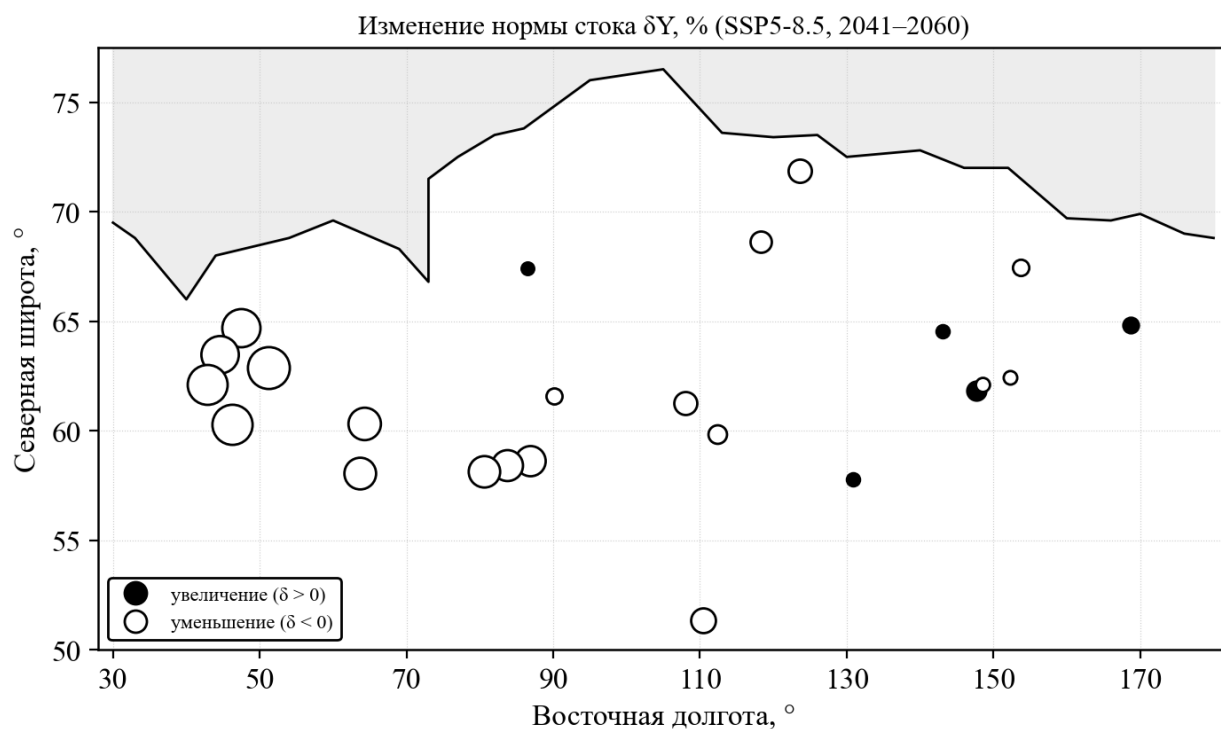


Рисунок 16. Карта-схема изменения нормы стока δY (SSP5-8.5, 2041–2060 гг.).

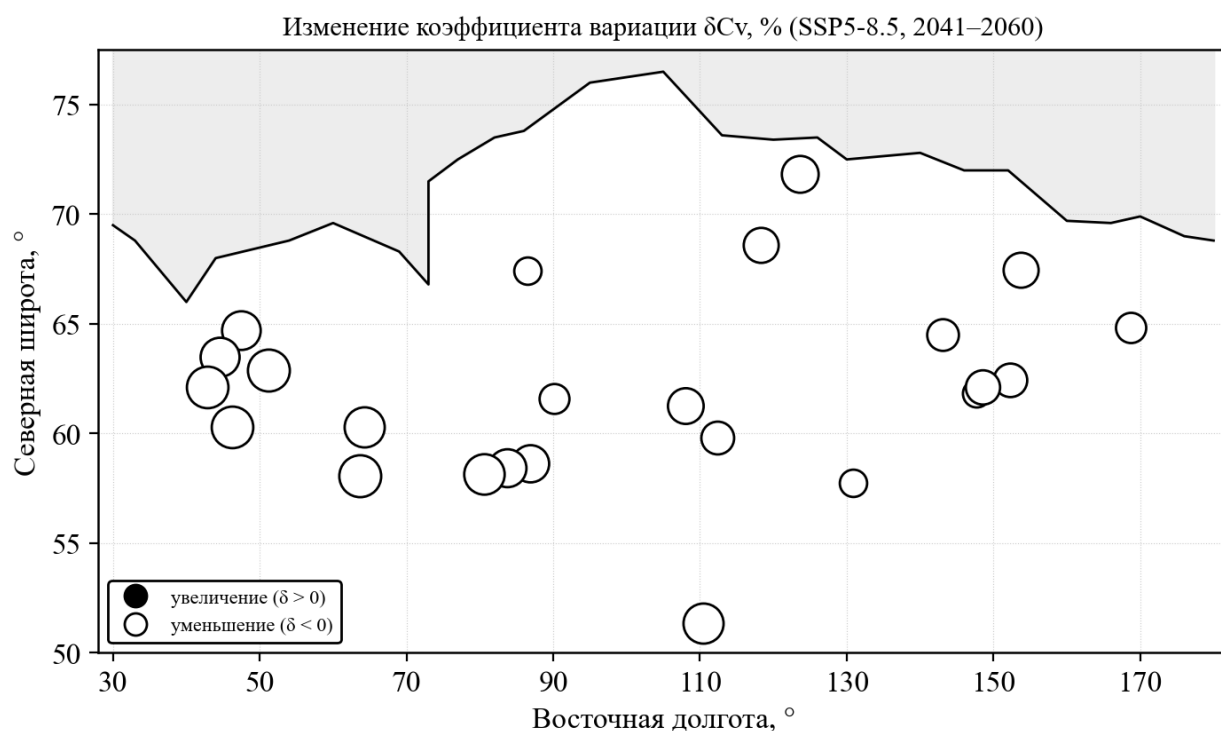


Рисунок 17. Карта-схема изменения коэффициента вариации δC_v (SSP5-8.5, 2041–2060 гг.).

Наиболее чувствительными к изменению климата оказались водосборы переходной полосы – север Европейской части и юг Западной Сибири, где

сток формируется при близком к единице соотношении тепла и влаги и где даже умеренное потепление заметно меняет водный баланс. Именно эти районы следует считать зоной повышенного риска при долгосрочном гидрологическом проектировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе выполнена оценка изменений вероятностных характеристик годового стока рек севера Европейской части России и Сибири в условиях ожидаемых изменений климата. Основные результаты работы состоят в следующем.

- сформирована база данных по 24 гидрологическим постам пяти физико-географических районов, включающая ряды среднегодовых расходов воды, площади водосборов и климатические нормы; ряды проверены на однородность и приведены к сопоставимому виду;

- рассчитаны статистические характеристики годового стока и параметры распределения Пирсона III типа; слой стока изменяется от 85 до 365 мм, коэффициент вариации – от 0,07 до 0,44, коэффициент стока – от 0,2 до 0,8;

- выполнена параметризация модели Фоккера–Планка–Колмогорова; показано, что во всех пунктах параметр устойчивости β не превышает 0,33 и формирование стока в современных условиях устойчиво;

- получены сценарные оценки нормы и коэффициента вариации стока по четырём траекториям СМIP6 на периоды 2021–2040 и 2041–2060 гг. при постоянных и переменных параметрах модели;

- построены карты-схемы чувствительности характеристик стока к изменению климата и выделены районы со значимыми отклонениями.

Установлено, что отклик годового стока на изменение климата неоднороден по территории. На холодных реках Северо-Востока и Восточной Сибири, где испарение мало и ограничено теплом, рост осадков преобладает над ростом испарения, и норма стока сохраняется или несколько увеличивается. На реках севера Европейской части и юга Западной Сибири потепление перевешивает увеличение осадков, и норма стока по наиболее жёсткому сценарию снижается на 8–12 %. Коэффициент вариации стока во

всех районах уменьшается на 3–8 %, что свидетельствует о небольшом сглаживании межгодовых колебаний водности.

Поставленные в работе задачи решены в полном объёме, цель достигнута. Полученные результаты и карты-схемы чувствительности могут быть использованы при долгосрочном планировании водопользования и обосновании расчётных гидрологических характеристик проектируемых сооружений в условиях нестационарного климата. Дальнейшее развитие работы целесообразно связать с переходом к моделям повышенной размерности фазового пространства, позволяющим описывать районы с неустойчивым формированием стока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коваленко, В. В. Моделирование гидрологических процессов : учебник / В. В. Коваленко, Н. В. Викторова, Е. В. Гайдукова. – 2-е изд. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2006. – 559 с.
2. Коваленко, В. В. Частично инфинитное моделирование : основания, примеры, парадоксы / В. В. Коваленко. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2012. – 244 с.
3. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / В. В. Коваленко, Н. В. Викторова, Е. В. Гайдукова [и др.]. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2010. – 50 с.
4. Диагностирование неустойчивости формирования и фрактальной размерности многолетних рядов летне-осенней межени Восточной Сибири методами частично инфинитной гидрологии / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, М. Н. Громова [и др.] // Учёные записки РГГМУ. – 2010. – № 13. – С. 30–39.
5. Коваленко, В. В. О сценарной оценке вероятностных характеристик годового стока при изменении климата / В. В. Коваленко // Учёные записки РГГМУ. – 2014. – № 32. – С. 28–35.
6. Коваленко, В. В. Критерии устойчивого развития гидрологических процессов и картирование зон ожидаемых аномалий параметров годового стока рек СНГ при антропогенном изменении климата / В. В. Коваленко, В. А. Хаустов // Метеорология и гидрология. – 1998. – № 12. – С. 96–112.
7. Хаустов, В. А. Устойчивость вероятностных характеристик годового стока к антропогенным воздействиям: дис. ... канд. техн. наук: 11.00.07 / Хаустов Виталий Александрович. – СПб. : РГГМУ, 1999. – 142 с.
8. Сикан, А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: учебник / А. В. Сикан. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2007. – 279 с.

9. СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. – М. : Госстрой России, 2004. – 72 с.
10. Будыко, М. И. Климат и жизнь / М. И. Будыко. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 472 с.
11. Мезенцев, В. С. Расчёты водного баланса : учебное пособие / В. С. Мезенцев. – Омск: Изд-во ОмСХИ, 1973. – 80 с.
12. Багров, Н. А. О среднем многолетнем испарении с поверхности суши / Н. А. Багров // Метеорология и гидрология. – 1953. – № 10. – С. 20–25.
13. Ольдекоп, Э. М. Об испарении с поверхности речных бассейнов / Э. М. Ольдекоп. – Юрьев: Тип. К. Маттисена, 1911. – 209 с.
14. Иванов, Н. Н. Об определении величины испаряемости / Н. Н. Иванов // Известия Всесоюзного географического общества. – 1954. – Т. 86, вып. 2. – С. 189–196.
15. Кобышева, Н. В. Климат России / Н. В. Кобышева. – СПб. : Гидрометеиздат, 2001. – 644 с.
16. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021. – 2391 p.
17. An update of IPCC climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data / M. Iturbide, J. M. Gutiérrez, L. M. Alves [et al.] // Earth System Science Data. – 2020. – Vol. 12, № 4. – P. 2959–2970.
18. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – СПб. : Росгидромет, 2022. – 676 с.
19. Георгиади, А. Г. Изменения стока крупнейших рек Сибири в XXI веке по данным ансамбля моделей CMIP6 / А. Г. Георгиади [и др.] // Geography, Environment, Sustainability. – 2026. – Т. 19. – С. 15–28.
20. Шевнина, Е. В. Сценарная оценка вероятностных характеристик слоя стока весеннего половодья / Е. В. Шевнина, В. В. Коваленко // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 6. – С. 79–88.

21. Гайдукова, Е. В. Моделирование многолетнего стока с помощью уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова / Е. В. Гайдукова // Учёные записки РГГМУ. – 2015. – № 41. – С. 17–25.

22. Global Runoff Data Centre (GRDC). The Global Runoff Database [Электронный ресурс]. – Koblenz: Federal Institute of Hydrology (BfG). – URL: <https://grdc.bafg.de> (дата обращения: 15.05.2026).

23. R-ArcticNET v4.0. A Regional Hydrographic Data Network for the Pan-Arctic Region [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu> (дата обращения: 20.05.2026).

24. KNMI Climate Explorer [Электронный ресурс]. – De Bilt : Royal Netherlands Meteorological Institute. – URL: <https://climexp.knmi.nl> (дата обращения: 28.05.2026).

25. Турк, Л. Баланс воды почв. Связь с климатическими факторами / Л. Турк ; пер. с франц. – М. : Изд-во иностр. лит., 1958. – 88 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОДОВОГО СТОКА

Таблица А.1. Статистические характеристики годового стока по постам

№	Река – пост	n	Y, мм	Cv	Cs	r(1)	k
1	Большая Кеть – Родионовка	41	207	0,19	0,21	0,38	0,41
2	Кеть – Максимкин Яр	60	198	0,20	0,47	0,37	0,38
3	Конда – Чантырья	42	182	0,28	0,12	0,12	0,36
4	Парабель – Новиково	39	131	0,39	0,34	0,36	0,26
5	Тура – Туринск	54	126	0,44	0,53	0,42	0,23
6	Енисей – Игарка	64	238	0,07	-0,01	0,22	0,48
7	Енисей – Подкаменная Тунгуска	60	193	0,09	-0,25	0,15	0,39
8	Нижняя Тунгуска – Ербогачён	44	118	0,21	0,13	0,34	0,32
9	Оленёк – Сухана	62	178	0,25	0,15	0,24	0,59
10	Оленёк – низовье	35	187	0,28	0,34	0,51	0,75
11	Пеледуй – Сользавод	52	114	0,26	0,60	0,60	0,27
12	Учур – Чульбю	46	354	0,20	0,32	0,15	0,71
13	Хилок – Хилок	53	86	0,42	0,33	0,35	0,23
14	Анадырь – Новый Ерополь	31	316	0,23	0,67	0,02	0,79
15	Индиگیرка – Усть-Нера	56	159	0,22	0,46	0,23	0,64
16	Колыма – Оротук	40	205	0,26	0,06	-0,01	0,71
17	Колыма – Среднеколымск	42	197	0,19	0,39	0,01	0,70
18	Колыма – Усть-Среднекан	61	230	0,23	0,03	0,09	0,74
19	Кулу – Кулу	53	314	0,23	-0,33	0,06	0,83
20	Вага – Шенкурск	28	194	0,28	0,71	0,31	0,34
21	Вымь – Половники	33	327	0,17	0,00	-0,11	0,63
22	Мезень – Большая Пысса	34	365	0,15	0,38	-0,01	0,66
23	Пинега – Засурье	24	186	0,22	2,48	-0,26	0,33
24	Юг – Подосиновец	66	247	0,27	1,16	0,16	0,44

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ФОККЕРА-ПЛАНКА-КОЛМОГорова

Таблица Б.1. Параметры модели ФПК по постам

№	Река – пост	$\bar{c}$	$\bar{N}$, мм	$G \bar{c}$	β	m_2
1	Большая Кеть – Родионовка	2,46	510	0,171	0,069	44411
2	Кеть – Максимкин Яр	2,66	526	0,195	0,073	40691
3	Конда – Чантырья	2,75	500	0,390	0,142	35676
4	Парабель – Новиково	3,82	500	0,987	0,258	19654
5	Тура – Туринск	4,28	541	1,386	0,324	19075
6	Енисей – Игарка	2,10	500	0,022	0,011	56905
7	Енисей – Подкаменная Тунгуска	2,59	500	0,038	0,015	37562
8	Нижняя Тунгуска – Ербогачён	3,09	366	0,254	0,082	14602
9	Оленёк – Сухана	1,69	300	0,201	0,119	33540
10	Оленёк – низовье	1,34	250	0,195	0,146	37688
11	Пеледуй – Сользавод	3,70	420	0,455	0,123	13717
12	Учур – Чульбю	1,41	500	0,103	0,073	130012
13	Хилок – Хилок	4,39	378	1,335	0,304	8747
14	Анадырь – Новый Ерополь	1,27	400	0,125	0,098	104664
15	Индиگیرка – Усть-Нера	1,57	250	0,143	0,091	26584
16	Колыма – Оротук	1,42	290	0,185	0,131	44840
17	Колыма – Среднеколымск	1,42	280	0,099	0,069	40042
18	Колыма – Усть-Среднекан	1,35	310	0,140	0,104	55807
19	Кулу – Кулу	1,21	380	0,117	0,096	103491
20	Вага – Шенкурск	2,93	570	0,428	0,146	40746
21	Вымь – Половники	1,59	520	0,085	0,053	109757
22	Мезень – Большая Пысса	1,50	550	0,070	0,046	136654
23	Пинега – Засурье	3,06	570	0,286	0,094	36470
24	Юг – Подосиновец	2,27	560	0,305	0,134	65268

ПРИЛОЖЕНИЕ В. РЕЗУЛЬТАТЫ СЦЕНАРНОЙ ОЦЕНКИ

Таблица В.1. Относительное изменение нормы стока δY и коэффициента вариации δC_v к периоду 2041–2060 гг., %

№	Река – пост	δY 2.6	δY 4.5	δY 7.0	δY 8.5	δC_v 8.5
1	Большая Кеть – Родионовка	-1,4	-3,0	-6,7	-7,5	-7,0
2	Кеть – Максимкин Яр	-1,3	-2,9	-6,5	-7,2	-6,8
3	Конда – Чантырья	-1,7	-3,4	-7,3	-8,1	-7,6
4	Парабель – Новиково	-1,5	-3,2	-6,9	-7,7	-7,7
5	Тура – Туринск	-1,4	-3,1	-7,1	-7,8	-8,1
6	Енисей – Игарка	0,3	-0,5	-2,2	0,1	-4,1
7	Енисей – Подкаменная Тунгуска	-0,7	-1,8	-3,9	-1,5	-4,8
8	Нижняя Тунгуска – Ербогачён	-2,3	-3,9	-6,1	-4,3	-6,4
9	Оленёк – Сухана	-1,9	-3,3	-5,1	-3,6	-6,2
10	Оленёк – низовье	-2,3	-3,8	-5,6	-4,4	-6,7
11	Пеледуй – Сользавод	-1,3	-2,5	-4,5	-2,5	-5,6
12	Учур – Чульбу	0,4	-0,3	-2,0	0,3	-4,1
13	Хилок – Хилок	-2,8	-4,7	-7,1	-5,0	-7,6
14	Анадырь – Новый Ерополь	3,4	1,4	0,6	1,3	-4,9
15	Индигирка – Усть-Нера	2,6	0,8	0,0	0,3	-5,3
16	Колыма – Оротук	2,1	-0,1	-1,0	-0,7	-6,0
17	Колыма – Среднеколымск	1,7	-0,7	-1,7	-1,6	-6,2
18	Колыма – Усть-Среднекан	2,3	0,1	-0,8	-0,5	-5,8
19	Кулу – Кулу	4,0	2,4	1,9	2,7	-4,2
20	Вага – Шенкурск	-3,0	-4,6	-6,7	-11,1	-8,0
21	Вымь – Половники	-3,5	-5,1	-7,3	-11,9	-8,1
22	Мезень – Большая Пысса	-2,8	-4,3	-6,2	-10,4	-7,2
23	Пинега – Засурье	-2,7	-4,1	-6,0	-10,1	-7,3
24	Юг – Подосиновец	-3,1	-4,7	-6,7	-11,2	-8,0

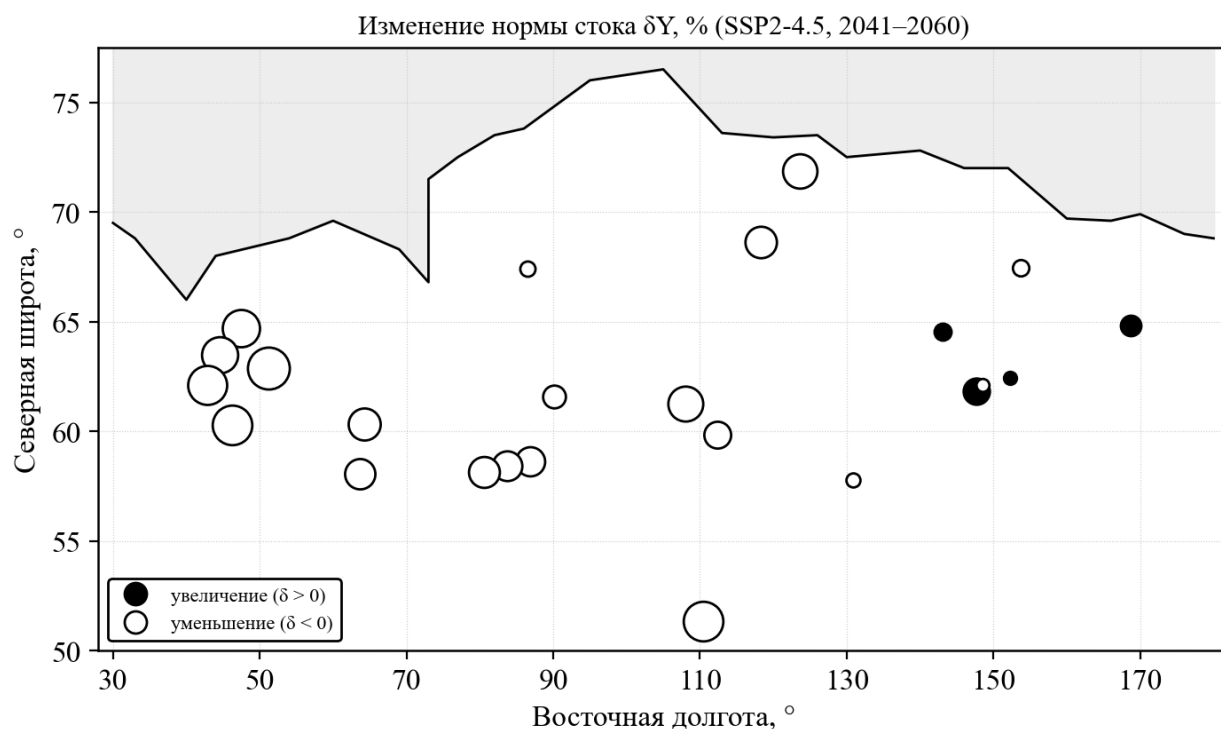


Рисунок В.1. Карта-схема изменения нормы стока δY (SSP2-4.5, 2041–2060 гг.).

Расчет сценарных вероятностных характеристик стока для двух вариантов (с постоянным и переменным коэффициентом стока k)

Уравнение ФПК для 3-х моментов (квази-стационарный режим)

Расчет при изменении только нормы осадков
Онега - Казаково

Таблица 1. Гидроклиматические характеристики ретроспективного периода (1931-1990 гг.).

№	Координаты		Вероятностные характеристики стока					Характеристики климата
	широта	долгота	q, л/с км ²	Y, мм	C _V	C _S /C _V	C _S	N, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	61.50	38.93	-	283	0.22	1.3	0.28	675

Таблица 2. Параметризация уравнений Пирсона и ФПК

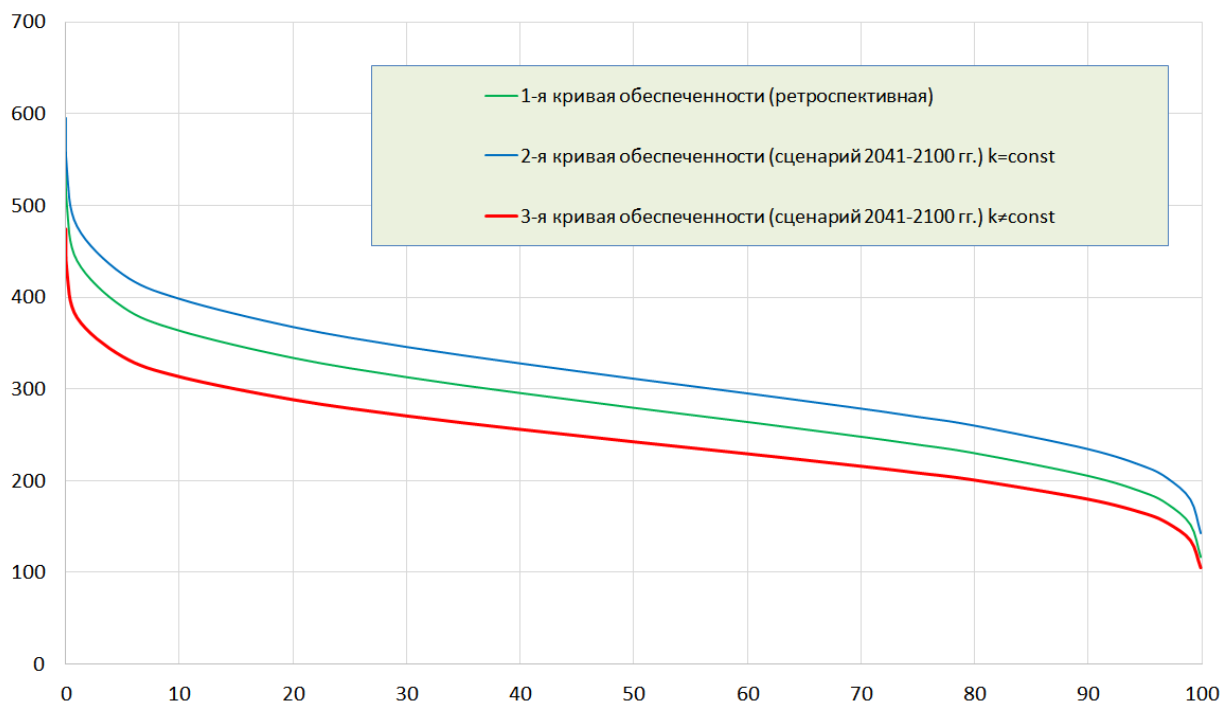
№	a	b ₀	b ₁	k	G _{сN}	G _N	c
1	2	3	4	5	6	7	8
1	274.0	-1379	-8.7	0.42	-21	6695	2.43

Таблица 3. Расчет сценарных (2041-2100 гг.) параметров уравнений ФПК и Пирсона

№	G _{сN}	G _N	c _{сц}	N _{сц} , мм	a	b ₀	b ₁	m ₁	m ₂	m ₃
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-21	6695	2.43	753	305.8	-1379	-8.7	314	102998	35040437

Таблица 4. Расчет сценарных (2041-2100 гг.) вероятностных характеристик слоя годового стока

№	Вероятностные характеристики стока				Изменения в %			
	Y _{сц} , мм	C _{Vсц}	C _S /C _V	C _{Sсц}	ΔN	ΔY	ΔC _V	ΔC _S
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	314	0.20	1.33	0.27	11	11	-7	-3



Кривые обеспеченности слоя годового стока

Уравнение ФПК для 3-х моментов (квази-стационарный режим) **Онега - Казаково**

Расчет при изменении нормы осадков с учетом изменений температуры

Таблица 1. Гидроклиматические характеристики ретроспективного периода (1951-1980 гг.).

№	Координаты		Вероятностные характеристики стока					Характеристики климата		
	широта	долгота	q, л/с км ²	Y, мм	C _V	C _S /C _V	C _S	N, мм	T ₅₋₉ , °C	T ₊ , °C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	61.50	38.93	-	283	0.22	1.28	0.28	675	61.5	65.2

Таблица 2. Параметризация уравнений Пирсона и ФПК

№	a	b ₀	b ₁	k _Ф	G _{сN}	G _N	c
1	2	3	4	5	6	7	8
1	274.0	-1379	-8.7	0.42	-21	6695	2.43

Таблица 4. Расчет испарения (2041-2100 гг.) и коэффициента стока k'

№	t	E ₀	Z	E	k'
1	2	3	4	5	6
1	5.4	501	3.17	479	0.29

Таблица 5. Расчет сценарного (2041-2100 гг.) коэффициента стока k_{сц}

№	T _{сц 5-9} , °C	T ₊ , °C	t	E ₀	Z	E _{сц}	k'сц	k _{сц}
1	1	2	3	4	5	6	7	8
1	75.9	82.3	6.85	627	2.64	583	0.23	0.33

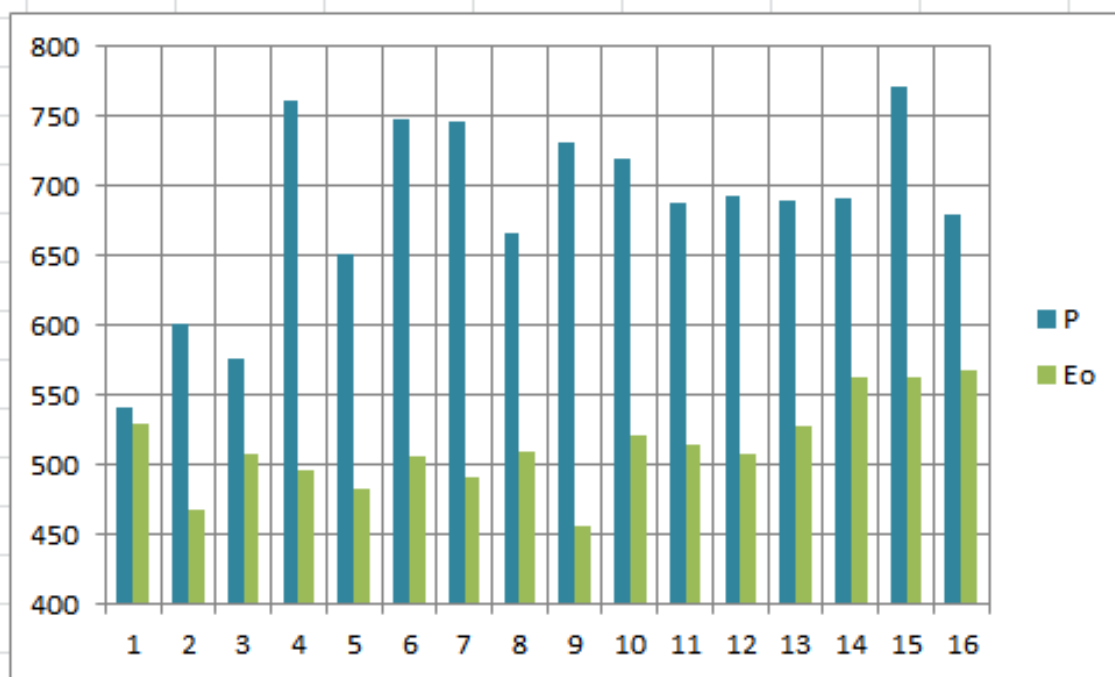
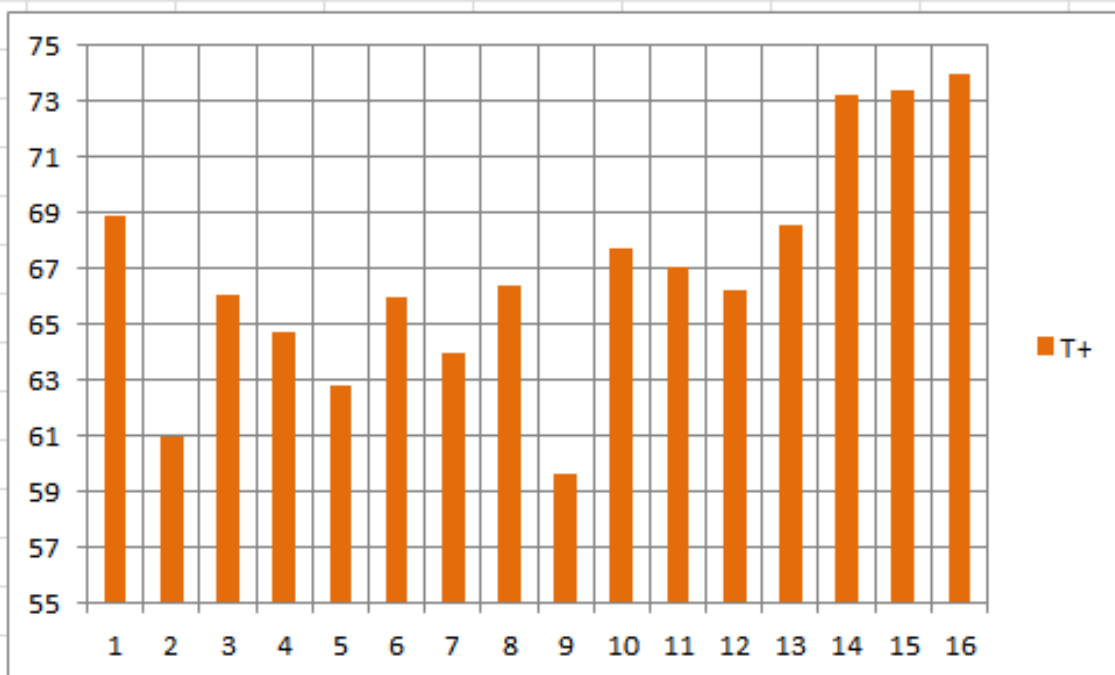
Таблица 6. Расчет сценарных (2041-2100 гг.) параметров уравнений ФПК и Пирсона

№	G _{сN}	G _N	c _{сц}	N _{сц} , мм	a	b ₀	b ₁	m ₁	m ₂	m ₃
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-21	6695	3.11	753	238.3	-1075	-6.7	245	62779	16757419

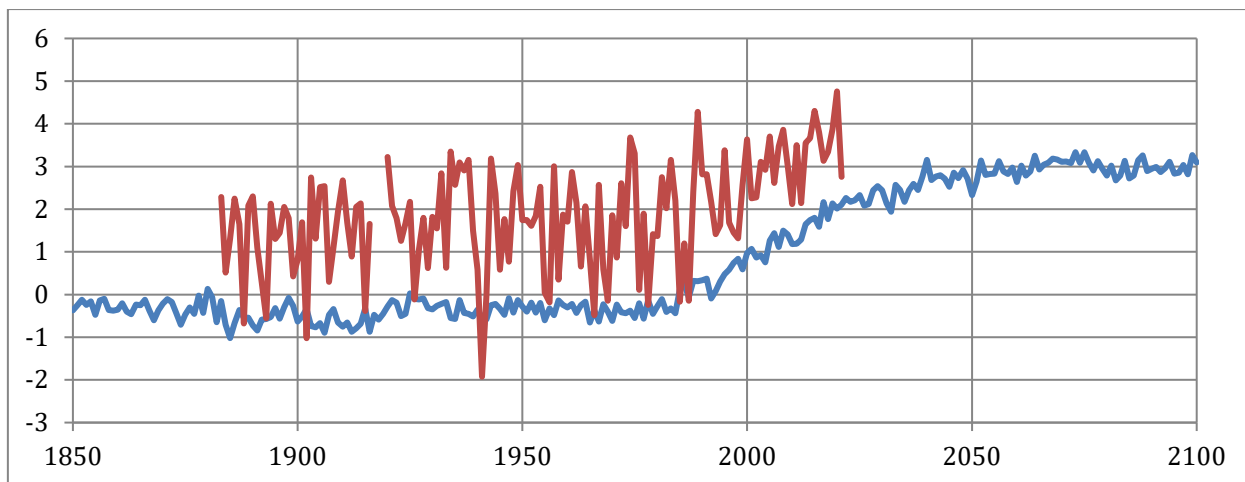
Таблица 7. Расчет сценарных (2041-2100 гг.) вероятностных характеристик слоя годового стока

№	Вероятностные характеристики стока				Изменения в %				
	Y _{сц} , мм	C _{Vсц}	C _S /C _V	C _{сц}	ΔN	ΔY	ΔC _V	ΔC _S	ΔT
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	245	0.2	1	0.3	11	-13	-3	-8	-23

Фактические положительные температуры воздуха (T^+), осадки (P) и
расчетная испаряемость (E_o)



Сценарные и фактические среднегодовые температуры воздуха
для м/с Каргополь



Сценарные и фактические суммы годовых осадков
для м/с Каргополь

