



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

Кафедра прикладной и системной экологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

**На тему:** Анализ многолетних колебаний температуры воды и дат ледовых явлений в бассейне реки Северная Двина

**Исполнитель** Двоеглазова Ксения Сергеевна

**Руководитель** Доктор географических наук, профессор  
Шелутко Владислав Аркадьевич

**Консультант** Кандидат техн. наук, ст. науч. сотрудник ФГБУ «ГГИ»  
Горошкова Наталья Ивановна

Санкт–Петербург  
2019\_

Оглавление	
Введение.....	4
1 Физико-географическая характеристика бассейна реки Северная Двина	6
1.1 Рельеф.....	6
1.2 Климат.....	7
1.2.1 Температура воздуха .....	7
1.2.2 Осадки .....	8
1.2.3 Снежный покров .....	8
1.3 Почва и растительность.....	9
1.4 Водный режим.....	9
1.5 Хозяйственное использование.....	10
2 Характеристика исходных данных.....	12
2.1 Термический режим бассейна реки Северная Двина .....	13
2.1.1 Общая характеристика термического режима рек .....	13
2.1.2 Тип реки по термическому режиму .....	16
2.2 Ледовый режим бассейна реки Северная Двина .....	17
3 Анализ исходных рядов наблюдений .....	21
3.1 Анализ числовых характеристик по исходным рядам наблюдений.	21
3.2 Оценка стационарности рядов наблюдений.....	26
3.2.1 Визуальная оценка тренда.....	26
3.2.1.1 Температура воды .....	26
3.2.1.2 Продолжительность ледостава .....	29
3.2.1.3 Максимальная толщина льда .....	32
3.2.2 Статистическая оценка тренда .....	34
3.2.2.1 Оценка тренда по коэффициенту корреляции .....	34
3.2.2.2 Оценка тренда по критерию Спирмэна .....	37
3.3 Оценка однородности рядов наблюдений.....	41
3.3.1 Определение даты нарушения однородности.....	41
3.3.2 Оценка гипотез об однородности по критерию Стьюдента.....	46
3.3.3 Оценка гипотез об однородности по критерию Фишера.....	49

Заключение .....	55
Список использованных источников .....	58
Приложения .....	60

## Введение

О глобальном изменении климата заговорили в 1976 году, когда Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) заявила о его угрозе, а уже в 1984 году началась работа Гидрометслужбой СССР по мониторингу климата.

Изменение климата по преобладающей точке зрения выражается в его потеплении, которое в XX веке не было однородным. Так, выделяют 3 интервала: потепление 1910-1945 гг., слабое похолодание 1946-1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1976 года [1]. Причем данные изменения не носят антропогенного характера, а связаны с естественными колебаниями в активности Солнца, океана и космоса. Данный вывод подтверждается тем, что современное изменение температурного режима сходно с более ранними периодами, только с меньшей амплитудой (Атлантический оптимум голоцена – 5500 л.н., потепление в суббореальном периоде голоцена – 3500 л.н.) [2,3].

В первую очередь изменения климата оцениваются по данным о приповерхностной температуре. На территории России потепление происходит во все сезоны, но наиболее заметно в зимний сезон [4]. Темпы потепления превышают средние по Земному шару. В соответствии с данными Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля в России за 1976-2016 гг. повышение температуры составило  $1,88^{\circ}$ , что в 2,5 раза больше роста глобальной температуры воздуха за этот же период [5].

В связи с этим, представляет большой практический интерес выявление тенденций увеличения температуры воды, уменьшения продолжительности ледостава и толщины льда на реках под действием изменения климата. Целью выпускной квалификационной работы является анализ многолетних колебаний температуры воды и дат ледовых явлений на реках бассейна Северной Двины для выявления изменения их термического режима.

Определить изменения климата можно с помощью разности между климатическими переменными за конечный и начальный периоды, или тенденции изменений климатических переменных в течение рассматриваемого

периода времени [1]. Основным методом выявления изменения климата является статистический анализ рядов наблюдений за весь возможный исторический период.

Для достижения поставленной цели в выпускной квалификационной работе были определены следующие задачи:

1. Выполнить физико-географическое описание территории на основе информации, полученной из рядов наблюдений и климатических справочников;
2. Проанализировать числовые характеристики исходных рядов наблюдений;
3. Оценить тренды для данных различной дискретности и сделать вывод о стационарности рядов наблюдений;
4. Оценить временную динамику исходных данных на основе применения интегральных кривых и сделать вывод об однородности рассматриваемых рядов.

Для выполнения поставленных задач в работе использовались данные по 10 гидрологическим постам и 4 метеорологическим станциям за 1950-2016 гг.

## 1 Физико-географическая характеристика бассейна реки Северная Двина

Бассейн реки Северная Двина является частью Северного края, который занимает северо-восточную окраину Европейской территории России. Северная Двина образуется при слиянии рек Сухоны и Юга, впадает в Двинскую губу Белого моря, которая является частью Арктической зоны Российской Федерации. Протекает в Вологодской и Архангельской областях.

Длина Северной Двины составляет 744 км (вместе с Сухоней 1310 км), площадь бассейна 357 тыс. км<sup>2</sup> [6].

В речную сеть Северной Двины входит множество притоков: 39 правых и 40 левых, среди которых 70 составляют малые реки. Крупнейшими по площади бассейна притоками являются 3 правых: Вычегда (121 тыс. км<sup>2</sup>), Пинега (42 тыс. км<sup>2</sup>) и Юг (35,6 тыс. км<sup>2</sup>), а также 3 левых: Сухона (50,3 тыс. км<sup>2</sup>), Вага (44,8 тыс. км<sup>2</sup>) и Емца (14,1 тыс. км<sup>2</sup>).

### 1.1 Рельеф

Северная Двина – река со слабо устойчивым руслом. По всей длине реки русло песчаное, только на самых узких участках встречается гравий.

От истока до места впадения Вычегды Северная Двина течет строго на север. На данном участке русло прямолинейное, шириной около 500 м, с большим числом островов, берега представлены песчаником и мергелем.

На участке более 400 км (от притока Вычегда до устья реки Емца) река протекает в северо-западном направлении. После слияния с Вычегдой ширина русла реки увеличивается до 1 км, в основном оно разветвлённое. Севернее притока Емца на участке в 25 км река протекает вдоль берегов, представленных гипсом (данный участок именуется «гипсовым каньоном») [6].

Дальнейшие 100 км Северная Двина течет в северо-восточном направлении, где на одном из поворотов русла (у села Орлецы Архангельской области) находится самая глубокая часть реки (порядка 25 м), на остальных участках глубина не превышает 5-7 м.

До самого впадения в Двинскую губу река течет на северо-запад. У села Усть-Пинега долина реки увеличивается (Холмогорское расширение – 14 км), русло реки делится на рукава островами. В едином русле ширина реки достигает 2 км.

До своего впадения в Белое море Северная Двина разделяется от мыса Пур-Наволок на три главные рукава:

- Березовский (по другому названию Корабельный) – длиной 47 км;
- Мурманский – 50 км;
- Пудожемский – 35 км.

Также к северу от Архангельска отделяется на восток четвертый рукав – река Кузнечиха, которая впоследствии соединяется с Березовским рукавом.

От разделения этих рукавов начинается дельта реки, площадь которой составляет около 900 км<sup>2</sup> [6].

## 1.2 Климат

Климат территории, на которой расположен бассейн Северной Двины, обуславливается небольшим количеством солнечной радиации зимой, воздействием Белого моря и интенсивным западным переносом воздушных масс.

Белое море сильно влияет на распределение температуры воздуха, так в зимний период  $t^{\circ}$  воздуха на побережье выше, чем в удалении от моря, а в летний – ниже. С севера на юг нарастает континентальность климата, что прослеживается в изменении годовой амплитуды  $t^{\circ}$  воздуха (увеличение от 23-28 $^{\circ}$  на севере до 30-31 $^{\circ}$  на юге бассейна) [6].

Вышеизложенные факторы обуславливают короткое прохладное лето и длинную холодную зиму с устойчивым снежным покровом.

### 1.2.1 Температура воздуха

Средняя годовая температура воздуха изменяется в пределах 0-2 $^{\circ}$ .

Самый холодный месяц – январь, на побережье Белого моря – февраль. В особо суровые зимы средняя суточная температура понижается: на побережье Белого моря до  $-41^{\circ}$ , на остальной части территории до  $-45^{\circ}$ .

Абсолютный максимум температуры наблюдается в июле или августе и достигает  $30^{\circ}$  на юге бассейна и  $25^{\circ}$  на побережье [6].

Начало весны, характеризуемое переходом температуры воздуха через нуль, приходится на первую-вторую декаду апреля. Лето (период с температурой воздуха выше  $10^{\circ}$ ) наступает в третьей декаде мая – первой декаде июня. Осень наступает в первой декаде сентября. К концу сентября суточные температуры воздуха становятся ниже  $5^{\circ}$ . Зимний сезон (период с температурой воздуха ниже  $0^{\circ}$ ) начинается в третьей декаде октября.

### 1.2.2 Осадки

Бассейн реки Северная Двина находится в зоне избыточного увлажнения. Годовое количество осадков изменяется от 650 до 750 мм.

В течение года осадки выпадают неравномерно. Большая их часть (65-70%) приходится на теплый период года (400-500 мм). Минимум осадков наблюдается в феврале, максимум – в июле-августе. Большую половину года ежедневное количество осадков составляет от 0,1 до 10 мм (180-190 дней на побережье, 200-210 дней на остальной части территории).

В летний период максимумы суточных осадков формируются за счет ливневых дождей, связанных с прохождением фронтов. В осенне-зимний период чаще наблюдаются длительные осадки обложного характера и слабой интенсивности [6].

Жидких осадков за год выпадает 50-60%, твердых – 25-30%, смешанных – 10-15%.

### 1.2.3 Снежный покров

Устойчивый снежный покров образуется в первой-второй декадах ноября, хотя первые снегопады уже могут быть в первых декадах октября.



Максимальной высоты снежный покров достигает во второй-третьей декадах марта. На защищенных лесом участках он составляет 75-85 см, на открытых участках – на 10-20 см меньше.

Большая часть территории освобождается от снега к третьей декаде апреля – первой декаде мая.

Число дней со снежным покровом в среднем составляет: на побережье Белого моря – 200-230, во внутренних районах – 170-200.

### 1.3 Почва и растительность

Изменение почвенного покрова прослеживается широтной зональностью: от 64° широты почвы глееподзолистые (севернее города Архангельск), до 64° - подзолистые и болотно-подзолистые. На плоских водоразделах широко распространены торфяники.

Растительный покров представлен темнохвойными таежными лесами (ель, сосна, кедр). Лесопокрытость водосборов в таежной зоне более 80%, местами до 95% [6].

### 1.4 Водный режим

Северная Двина относится к рекам с преимущественно снеговым питанием. Водный режим характеризуется высоким весеннем половодьем и низкой зимней меженью. Летом и осенью часто проходят дождевые паводки, что является причиной повышенной водности реки по сравнению с зимним сезоном.

Годовой сток воды уменьшается с севера на юг, несмотря на увеличение годовой суммы осадков. Причиной такого уменьшения является увеличение испарения с поверхности водосборов. Годовой сток на побережье составляет 11-12 л/сек.км<sup>2</sup>, в южных частях водосбора – 9-10 л/сек.км<sup>2</sup> [6].

Весеннее половодье начинается в третьей-четвертой декадах апреля, длится 1,5-2 месяца. Этот период характерен максимальными расходами воды

(40-60% годового стока). Основной частью суммарного стока за весну являются талые снеговые воды (60-80%), на долю дождевого стока приходится 10-30%.

Летне-осенняя межень начинается в четвертой декаде мая – первой декаде июня. Ее устойчивость и водность зависит от количества осадков: в засушливые годы длится 3-5 месяцев, в дождливые – 0,5-1 месяц. Составляет 5-8% от годового стока, а если учесть дождевые паводки, то на этот период приходится 40%.

Зимняя межень начинается в четвертой декаде октября, продолжается от 4,5 до 6 месяцев. Сток воды уменьшается к концу зимы, минимальным становится к марту. Слой стока составляет 8-10% от годового.

### 1.5 Хозяйственное использование

Северная Двина используется в основном для судоходства и сплава леса. Энергетический потенциал реки не используется, а рыболовство имеет местное значение.

На всем своем протяжении Северная Двина по состоянию загрязненности относится к следующим классам качества: 3-й - «загрязненная» (разряд «а» и «б»), 4-й – «грязная» (разряд «а»).

В верховье реки загрязняющие вещества поступают со сточными водами предприятий городов: Великий Устюг, Красавино, Котлас, Коряжма, а также с льяльными водами судов речного флота и водами притоков рек Сухона и Вычегда [7].

На данном участке преобладающими загрязняющими веществами являются соединения марганца (превышение ПДК в 5-7 раз), железа (для г. Котлас значение равно 6ПДК), меди (особенно ниже г. Красавино – 4ПДК), цинка, алюминия (в черте г. Котлас – 5ПДК) и трудноокисляемые органические вещества (по ХПК) [7]. На протяжении 70 км класс качества воды оценивается как 4-й, разряд «а» («грязная»), что является самым грязным участком Северной Двины [8].

В среднем течении реки (д. Телегово, д. Абрамково, д. Звоз) следующие характерные загрязняющие вещества – соединения железа (выше ПДК в 5 раз), меди и трудноокисляемые органические вещества. В черте д. Абрамково добавляется превышение ПДК по нефтепродуктам в 10 раз, что является причиной повышенного класса качества воды по сравнению с другими створами среднего участка реки – 3-й класс, разряд «б» [7].

В нижнем течении реки в черте с. Усть-Пинега превышение ПДК наблюдается по соединениям железа, марганца, алюминия. Класс качества воды оценивается как «очень загрязненная» (3-й, разряд «б»).

Основными источниками загрязнения устьевого участка реки Северная Двина являются сточные воды предприятий целлюлозно-бумажной, деревообрабатывающей промышленности, жилищно-коммунального хозяйства, а также суда речного и морского флота [8]. Характерные загрязняющие вещества: соединения железа, марганца, алюминия, меди и трудноокисляемые органические вещества. По комплексной оценке вода соответствует 3-му классу качества разряда «б» [7].

В дельте Северной Двины (рукава Березовский, Мурманский, Пудомежский, проток Кузнечиха) вода характеризуется как «очень загрязненная» (3-й класс разряд «б»). Характерные загрязняющие вещества не превышают 4ПДК, к ним относятся соединения железа, марганца, меди, алюминия, а также трудноокисляемые органические вещества.

## 2 Характеристика исходных данных

Исходные данные представлены рядами наблюдений с 1950 года по 2016 год, некоторые ряды продолжительности ледостава с 1936 года (Приложение А).

Гидрологические данные были взяты из Гидрологических ежегодников по бассейнам Баренцева и Белого морей (Том 0, Выпуск 0-9). По каждому створу рассмотрены ряды средней температуры воды за период открытого русла, максимальной толщины льда и продолжительности ледостава.

Метеорологическая информация (температура воздуха), взята с официального сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД).

Таблица 2.1 Характеристики постов.

№ п/п	Река - пост	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Период наблюдений
1	р. Северная Двина – г. Котлас	675	88 300	1936-2016
2	р. Северная Двина – д. Абрамково	528	220 000	1936-2016
3	р. Северная Двина – с. Нижняя Тойма	462	227 000	1936-2016
4	р. Северная Двина – д. Сидоровская	389	236 000	1950-2016
5	р. Северная Двина – р.п. Березник	352	278 000	1950-2016
6	р. Северная Двина – д. Звоз	276	285 000	1950-2016
7	р. Северная Двина – с. Усть-Пинега	137	348 000	1936-2016
8	р. Сухона – д. Каликино	39	49 200	1950-2016
9	р. Сухона – г. Великий Устюг	3	50 300	1950-2016
10	р. Вычегда – д. Федяково	73	112 000	1961-2016

## 2.1 Термический режим бассейна реки Северная Двина

Самым ранним наблюдением за температурой воды является 1890 год вблизи дельты г. Архангельск. В настоящее время по рекам Северная Двина, Сухона и Вычегда насчитывается 26 пунктов наблюдения.

Данные о температуре воды представлены в виде среднемесячных значений, которые в дальнейшем были переведены в среднегодовые.

### 2.1.1 Общая характеристика термического режима рек

Среднегодовой ход температуры воды в основном повторяет изменение температуры воздуха (Рисунок 2.1 и Рисунок 2.2). Отличие в том, что колебания температуры воды более сглаженные и происходят с отставанием во времени.

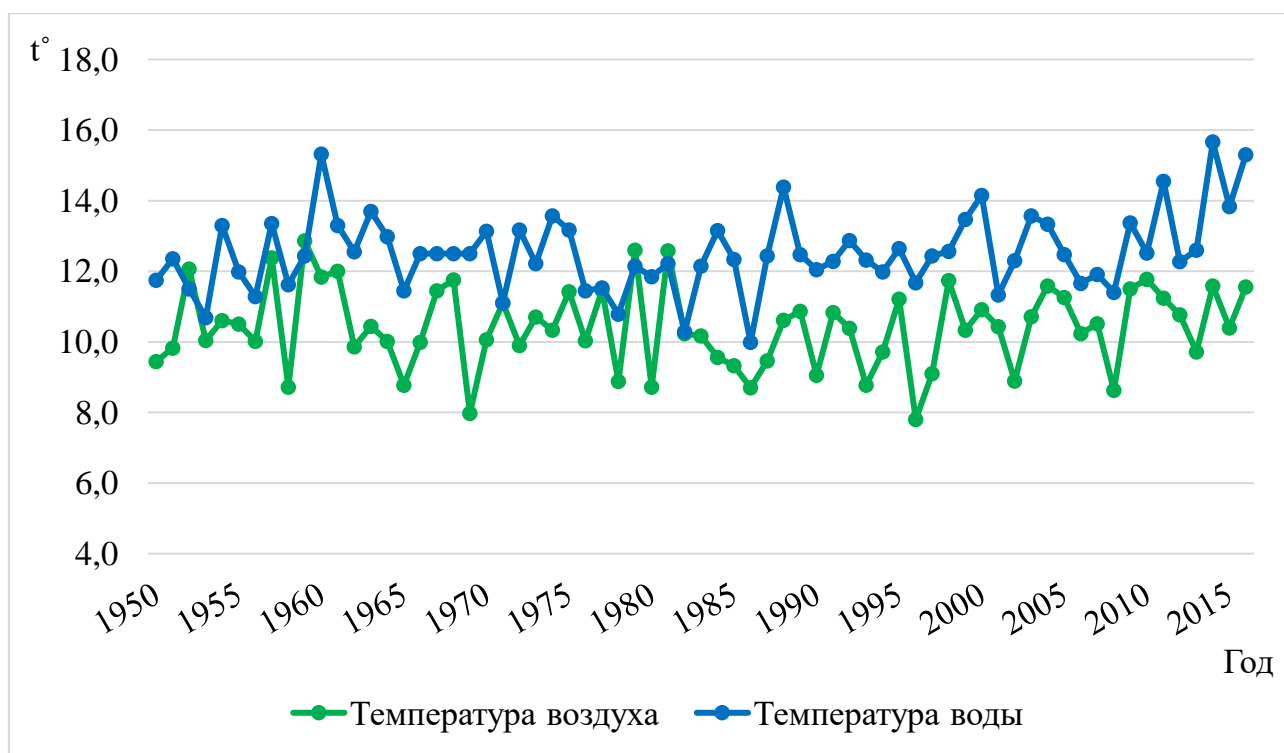


Рисунок 2.1 Ход температуры воздуха и температуры воды по средним значениям за теплый период 1950-2016 годов - р. Северная Двина - г. Котлас.

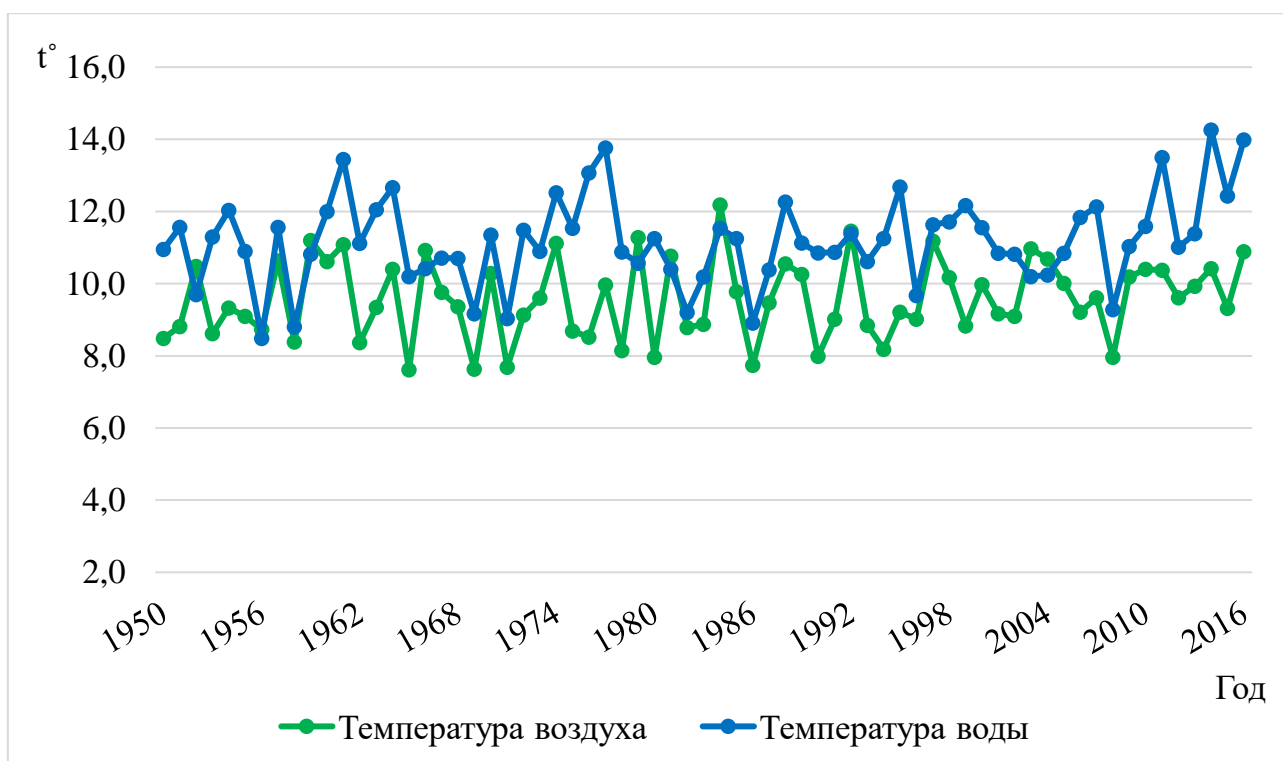


Рисунок 2.2 Ход температуры воздуха и температуры воды по средним значениям за теплый период 1950-2016 годов - р. Северная Двина - с. Усть-Пинега.

Река Северная Двина имеет устойчивую температуру воды на всем своем протяжении, только немного снижающуюся к устьевой части на  $0,5-1^{\circ}$ , а весной на  $2-3^{\circ}$ .

Воды притоков Вычегда и Пинега за счет позднего развития весенних процессов понижают температуру воды Северной Двины, что особенно заметно в мае (Рисунок 2.3). Смешивание вод происходит не одномоментно, поэтому для мая характерны различия в температурах для левого и правого берегов (в среднем ниже на  $1-2^{\circ}$  вода у правого берега, с которого впадают Вычегда и Пинега) на протяжении нескольких десятков километров.

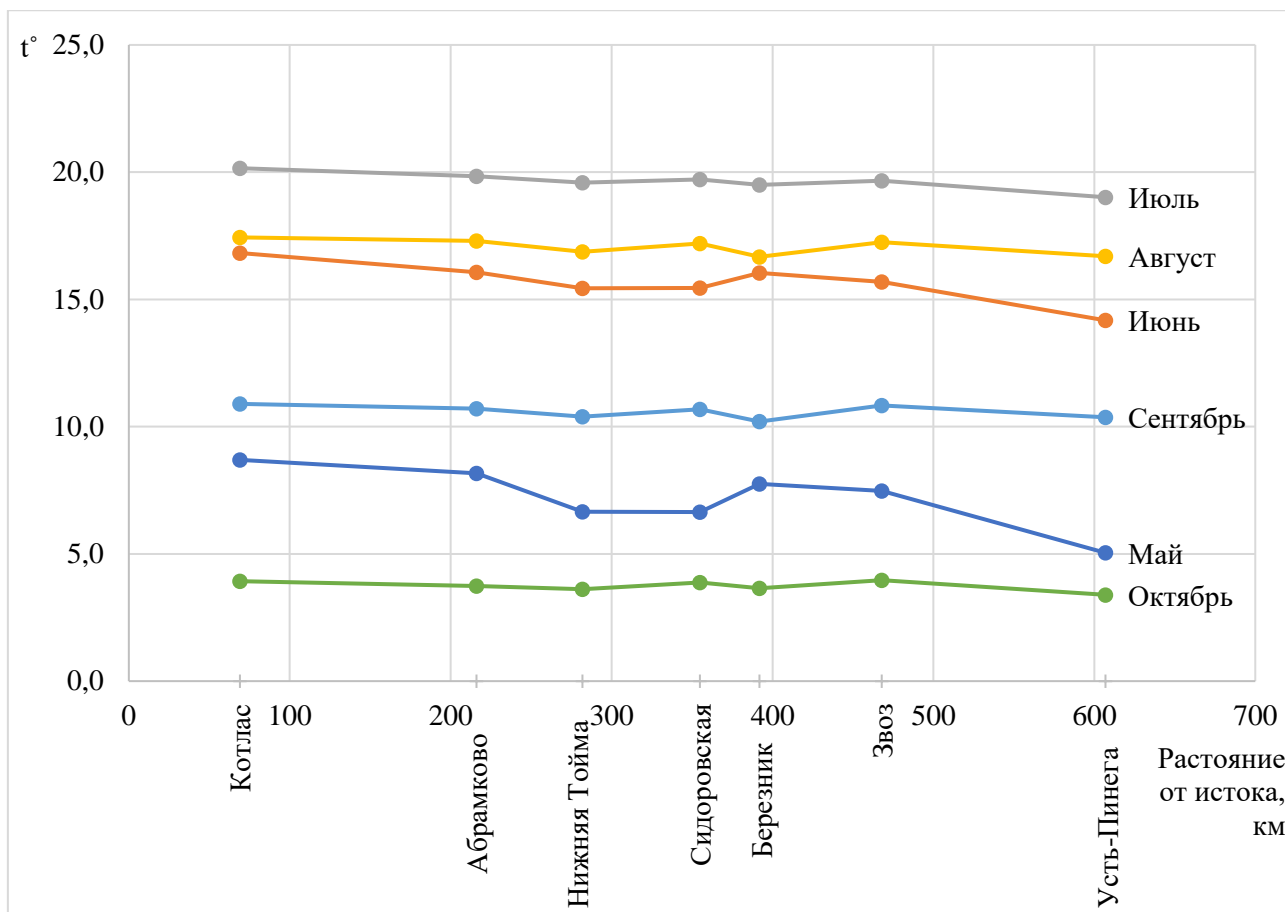


Рисунок 2.3 Изменение среднемесячных температур воды за теплый период года по длине реки Северная Двина.

Весенний переход температуры воды через  $0,2^{\circ}$  в 1970-х годах отмечается в период с 27-29 апреля в южной части бассейна Северной Двины по 2-7 мая на севере территории. А к 2016 году этот переход сместился на 5-9 дней, причем на севере смещение более выраженное. Так для самого северного пункта наблюдений с. Усть-Пинега средним значением температурного перехода через  $0,2^{\circ}$  считается 28 апреля, а еще 60 лет назад – 7 мая; в южном гидрологическом пункте г. Котлас дата перехода сместилась с 27 апреля в 1970-х на 21 апреля в 2010-х.

Соответствующие изменения произошли и в температуре воды. С 1950 года по 2016 год средняя температура воды в мае изменилась на  $1-3^{\circ}$ : южная часть бассейна – с  $7,7^{\circ}$  на  $9,5^{\circ}$ , северная часть – с  $4,5^{\circ}$  на  $6,3^{\circ}$ . В июне продолжается интенсивный нагрев воды, средние значения колеблются в

пределах 15-17° (увеличение на 1-3° за рассмотренный период наблюдений по всей длине реки). Июль является самым теплым месяцем: вода нагревается во всех районах до 18-21°, для каждого пункта наблюдения температура выросла на 2° по сравнению с 1950-ми годами.

В августе начинается снижение температуры воды, причем к концу месяца наиболее интенсивно. Если в 50-е годы 20 века температура колебалась в пределах 15-16° по всей длине реки, то в 10-е годы 21 века - уже от 17 до 18°. Средние значения сентября за весь период наблюдений изменились не сильно: с 9-10° до 10-11°, наибольшие изменения произошли на севере бассейна в пункте с. Усть-Пинега (увеличение с 9,6° до 11,3°). Примерно такие же изменения за 66 лет прослеживаются в самом холодном месяце – октябре (с 2-3° до 3-4°).

Осенний переход температуры воды через 0,2° проходил в последнюю декаду октября на всей территории бассейна, а в последние года сместился на 2-3 декады ноября (смещение составляет 12-15 дней на юге и 15-21 день на севере). Однако по некоторым пунктам наблюдений (г. Котлас, д. Сидоровская, р.п. Березник и с. Усть-Пинега) наивысшее среднее значение даты перехода наблюдается в период с 2000 по 2009 годы, в этот период температура переходила через 0,2° позже, чем на 2016 год, на 5-9 дней.

### 2.1.2 Тип реки по термическому режиму

По классификации Е.М. Соколовой [9], в основу которой положено соотношения температур воды и воздуха:  $t_{\text{в}}/t_{\text{воз}}$  и  $t_{\text{в}}-t_{\text{воз}}$ , река Северная Двина относится к подтипу *II в*. Для него характерны отрицательные значения  $t_{\text{в}}-t_{\text{воз}}$  в мае и положительные в остальную часть года, а также отношение  $t_{\text{в}}/t_{\text{воз}} > 1$  за июнь-октябрь.

В Таблице 2.2 представлены соотношения температуры воды и воздуха на примере створа г. Котлас, являющимся характерным примером термического режима Северной Двины.



Таблица 2.2 Соотношение температуры воды и температуры воздуха створа г. Котлас за различные временные отрезки.

Створ – г. Котлас	Соотношение	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
1950-2016	$t_B/t_{B03}$	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	2,1
	$t_B-t_{B03}$	-0,4	2,1	2,9	3,1	2,3	2,0
1950-1982	$t_B/t_{B03}$	0,9	1,1	1,2	1,2	1,3	2,5
	$t_B-t_{B03}$	-0,6	1,8	2,6	2,7	2,3	2,1
1983-2016	$t_B/t_{B03}$	1,0	1,2	1,2	1,2	1,3	1,8
	$t_B-t_{B03}$	-0,4	2,3	3,0	3,4	2,4	1,9

Из таблицы видно, что подтип термического режима не изменился за период наблюдений, хотя средние температуры и повышаются в последние годы. Это свидетельствует о том, что режим меняется на II б, где соотношение  $t_B-t_{B03}$  отрицательно только в апреле.

## 2.2 Ледовый режим бассейна реки Северная Двина

Наблюдения за ледовым режимом на реке Северная Двина начаты одновременно с изучением уровенного режима (наиболее ранним периодом является 1877-1883 гг.). На данный момент на реках Северная Двина, Сухона и Вычегда насчитывается 26 пунктов наблюдения за ледовыми явлениями.

В работе рассмотрены максимальная толщина льда, даты начала и конца ледостава, но все расчеты ведутся для наиболее показательных характеристик – продолжительности ледостава и толщины льда.

За дату начала ледостава принята дата первого длительного ледостава (не менее 20 дней). Датой конца ледостава является следующий день после окончания ледостава. Продолжительность рассчитана как разница между этими датами.

Река Северная Двина характеризуется ежегодным устойчивым ледоставом.

Замерзание реки в холодные годы может длиться 10-12 дней, а в годы с неустойчивой погодой до 30-40 дней.

Установление ледостава на протяжении всей реки происходит в разные декады ноября: на юге (г. Котлас) в начале четвертой декады, а на севере (с. Усть-Пинега) в конце второй (Рисунок 2.4). По трендам видно, что начало ледостава смещается на более позднее время: г. Котлас – с 20 ноября 1936 г. на 28 ноября 2015 г.; с. Усть-Пинега – с 11 ноября 1936 г. на 17 ноября 2015 г. Данная выборка в 70 лет доказывает изменение климата.

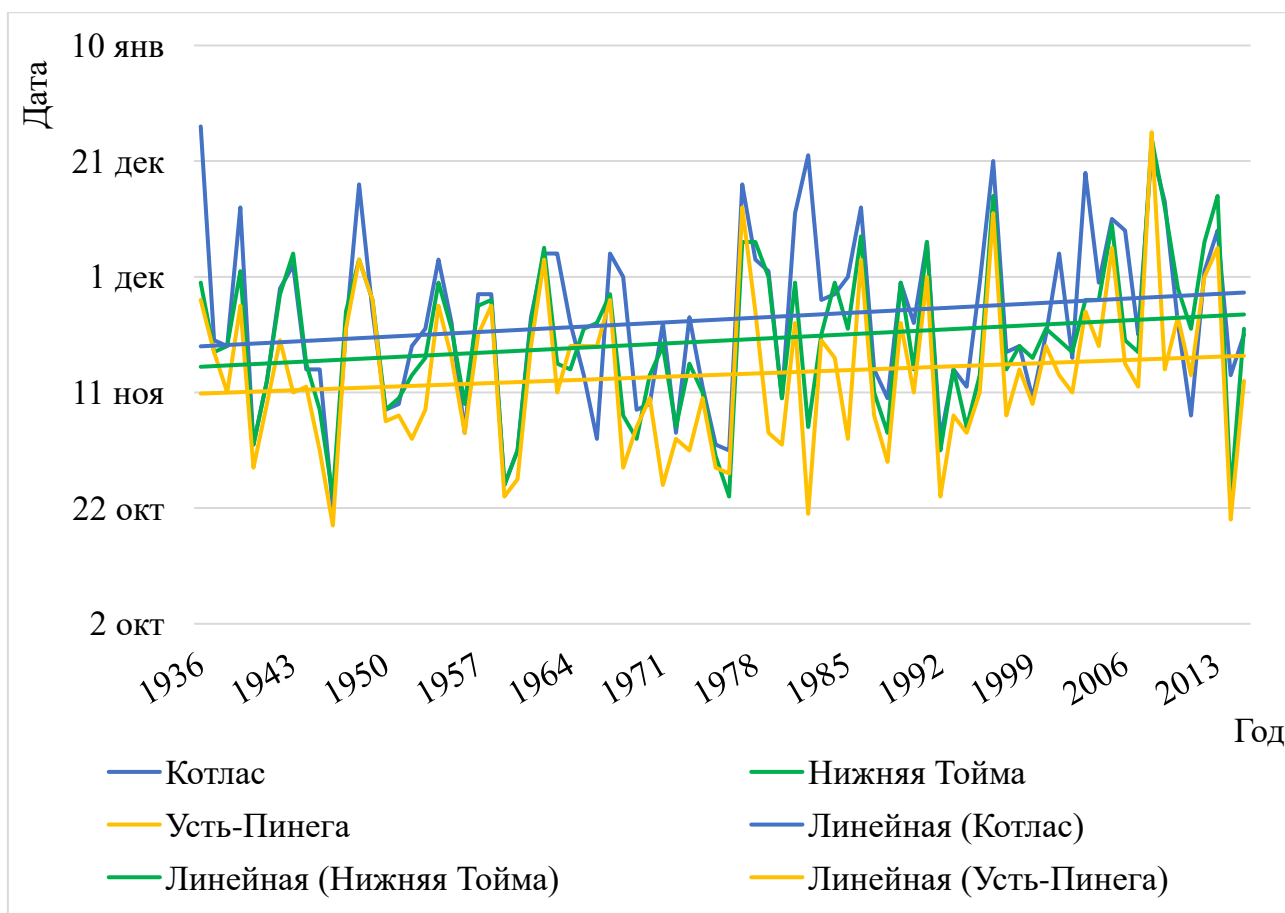


Рисунок 2.4 Даты начала ледостава на реке Северная Двина за период 1936-2015 гг.

Интенсивное нарастание толщины льда происходит в ноябре (0,8-1,2 см в сутки), поэтому к концу месяца она может равняться 20-30 см и более. До середины января интенсивность нарастания составляет 0,6-0,4 см за сутки, а концу февраля – 0,3-0,1 см/сутки [6]. Максимальной мощности толщина льда

достигает в марте и составляет 65-100 см. В мягкие зимы толщина льда на реке Северная Двина всего 40-50 см.

Конец ледостава наступает с четвертой декады апреля в верховьях реки Северная Двина и с первой декады мая в низовьях реки (Рисунок 2.5). Тренды на понижение показывают смещение дат конца ледостава на третью декаду апреля на всей длине реки (перенос на 10-14 дней).

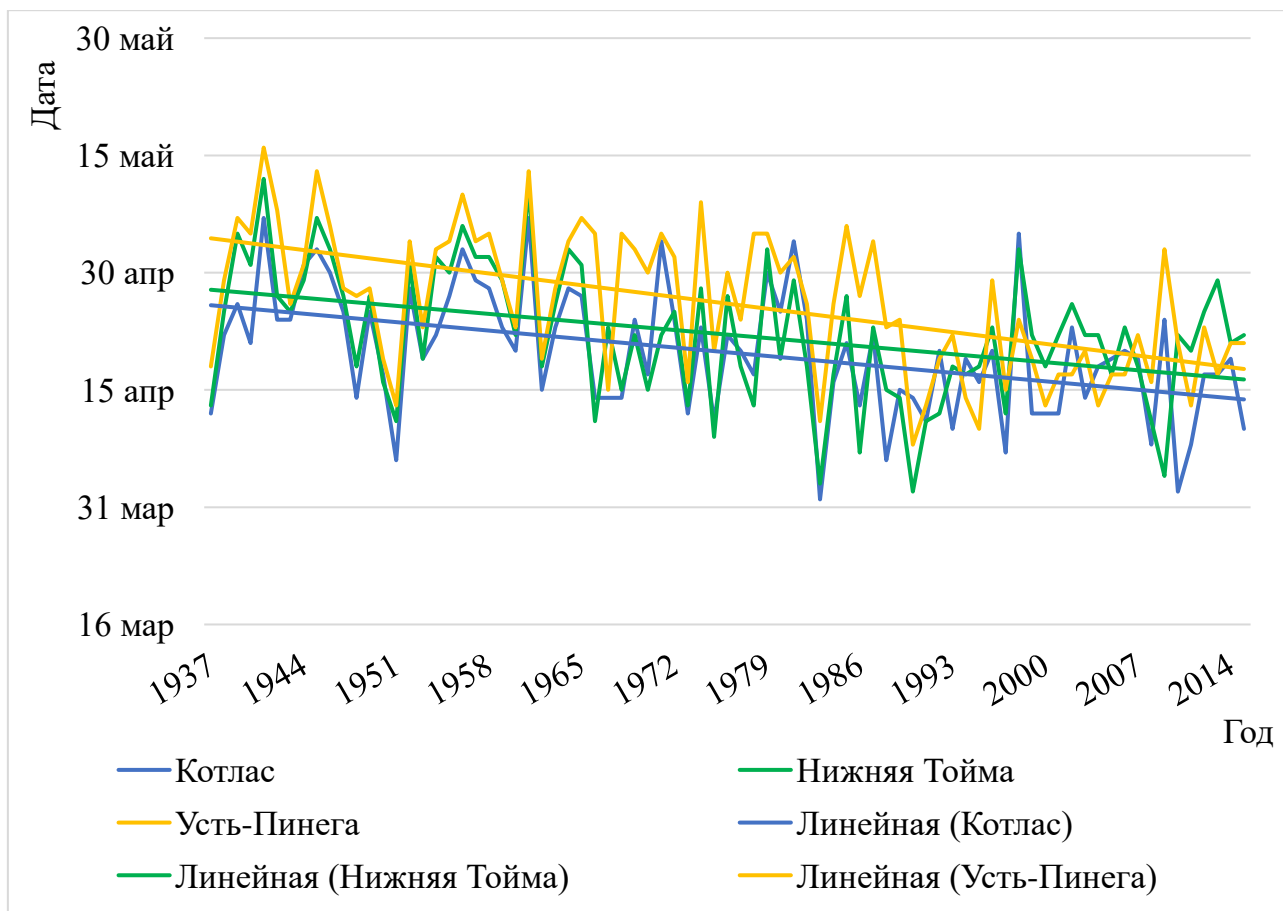


Рисунок 2.5 Даты конца ледостава на реке Северная Двина за период 1937-2015 гг.

Средняя продолжительность ледостава колеблется от 140 на юге до 170 дней на севере рассматриваемой территории (Рисунок 2.6).

Вскрытие реки длится от 8 до 25 дней, в исключительных случаях ледяной покров разрушается за 2 дня.

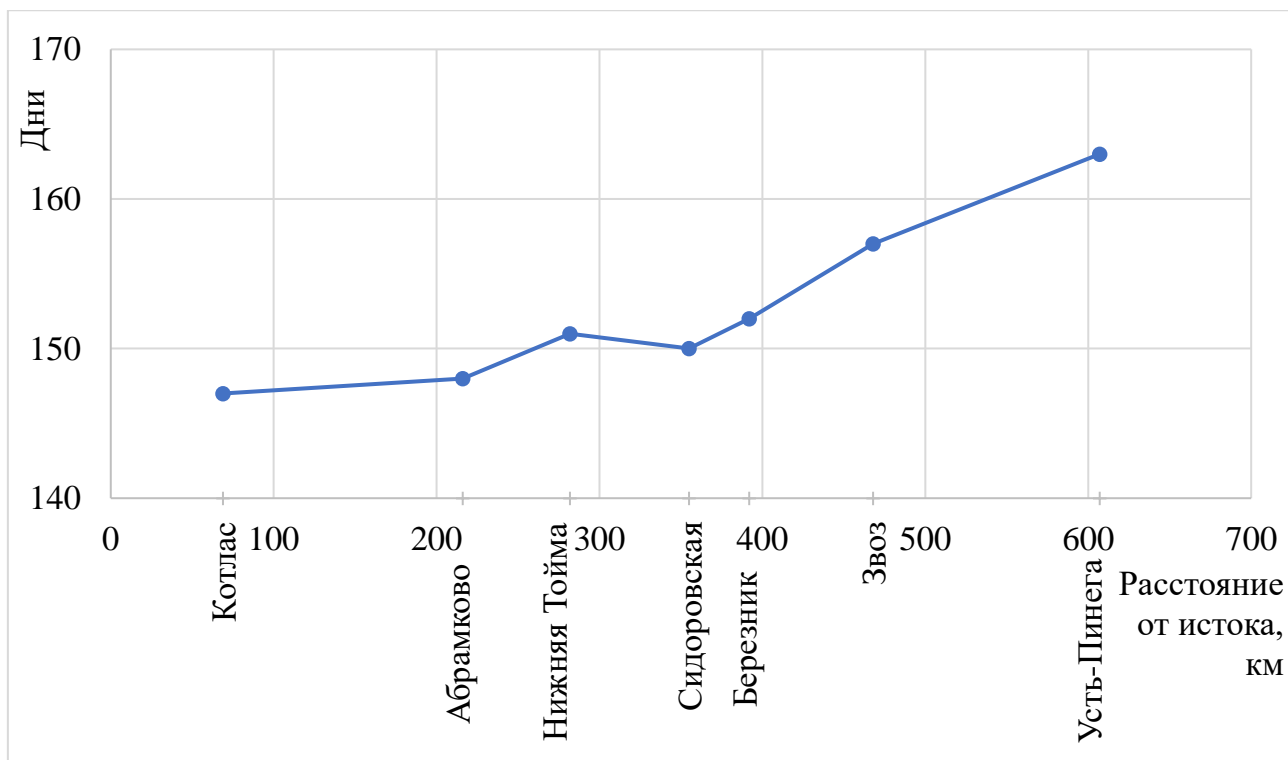


Рисунок 2.6 Изменение средней продолжительности ледостава в днях по длине реки Северная Двина.

Изменение продолжительности ледостава за период с 1936 по 2016 гг. и толщины льда за 1950-2016 гг. будет подробнее освещено в Главе 3 (3.2 Оценка стационарности).

### 3 Анализ исходных рядов наблюдений

#### 3.1 Анализ числовых характеристик по исходным рядам наблюдений

Оценка числовых характеристик проводилась с использованием метода моментов, выбор которого объясняется его простотой и независимостью от закона распределения.

Числовые характеристики или параметры распределения случайной величины — это характеристики, назначение которых выразить в сжатой форме наиболее существенные особенности распределения. Их разделяют на характеристики положения и характеристики рассеивания.

Характеристики положения показывают расположение определенных характеристик на числовой оси. Из их числа важнейшую роль играет математическое ожидание случайной величины  $m_x$  - первый начальный момент, представляющий сумму произведений всех возможных значений случайной величины на их вероятности [10]:

$$m_x = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (3.1)$$

где  $N$  – объем генеральной совокупности.

Кроме того, к используемым на практике относятся еще две характеристики положения: мода  $M$  и медиана  $Me$ .

Модой дискретной случайной величины называется ее наиболее вероятное значение, а модой непрерывной случайной величины называется то ее значение, в котором плотность вероятности имеет наибольшее значение.

Медианой случайной величины  $X$  называется такое ее значение, для которого

$$p(X < Me) = p(X > Me) \quad (3.2)$$

т.е. вероятность значений  $X$ , больших или меньших  $Me$ , одинакова и равна 0,5 [10].

Математическое ожидание, мода и медиана совпадают только в случае симметричного одномодального распределения (например, для нормального закона распределения) [10].

Числовые характеристики рассеивания характеризуют степень и форму рассеивания возможных значений  $X$  относительно  $m_x$  [11]. К ним относятся: дисперсия  $D$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$ , коэффициент вариации  $Cv$  и коэффициент асимметрии  $Cs$ .

Дисперсией случайной величины  $X$  называется математическое ожидание квадрата соответствующей центрированной величины [10]:

$$D_x = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - m_x)^2}{N} \quad (3.3)$$

Для характеристики рассеивания часто удобнее пользоваться величиной, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины, т.е. среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$ :

$$\sigma_x = \sqrt{D_x} \quad (3.4)$$

Для описания заведомо положительных величин используется безразмерная характеристика рассеивания – коэффициент вариации  $Cv$ , который используется для сопоставления изменчивости различных процессов [10]:

$$Cv = \frac{\sigma_x}{m_x} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(k_i - 1)^2}{N}} \quad (3.5)$$

где  $k_i$  – модульный коэффициент:

$$k_i = \frac{x_i}{m_x} \quad (3.6)$$

Для характеристики симметричности рассеивания значений применяется коэффициент асимметрии  $Cs$ :

$$Cs = \frac{\sum_{i=1}^N (k_i - 1)^3}{N * Cv^3} \quad (3.7)$$

В таблицах 3.1, 3.2 и 3.3 представлены расчеты всех приведенных выше числовых характеристик для рядов температуры воды, продолжительности ледостава и толщины льда.

Таблица 3.1 Основные числовые характеристики рядов температуры воды за весь период наблюдений по 10 створам.

Створ	$m_x$	$M$	$Me$	$D$	$\sigma_x$	$Cv$	$Cs$
г. Котлас	12,5	12,0	12,4	1,28	1,13	0,09	0,51
д. Абрамково	12,4	14,7	12,3	1,37	1,17	0,09	0,37
д. Нижняя Тойма	11,9	11,2	11,7	1,43	1,20	0,10	0,69
д. Сидоровская	12,0	12,8	12,0	1,06	1,03	0,09	0,22
р. п. Березник	11,8	12,5	11,7	1,34	1,16	0,10	0,50
д. Звоз	12,2	11,4	12,2	1,34	1,16	0,09	0,14
с. Усть-Пинега	11,2	11,3	11,1	1,49	1,22	0,11	0,18
д. Каликино	12,5	#Н/Д	12,4	2,09	1,44	0,12	0,10
г. Великий Устюг	12,8	11,1	12,7	2,05	1,43	0,11	-0,01
д. Федяково	11,3	11,0	11,2	2,02	1,42	0,13	-0,35

Как видно из полученных данных большинство рядов температуры воды обладают положительной асимметрией, т.е. в рядах есть отдельные повышенные значения температур воды. Отрицательная асимметрия наблюдается только у рядов г. Великий Устюг и д. Федяково. Во всех случаях  $Cs$  меньше 1 (или -1). Наибольшая степень асимметрии характерна для створа д. Нижняя Тойма.

Значения коэффициентов вариации не так велики, что говорит о низкой вариативности значений рядов температуры. Из таблицы 3.1 видно, что наибольшие значения  $Cv$  характерны для створов д. Федяково и д. Каликино, хотя и они близки ко всем значениям рядов температуры.

Можно сделать вывод, что распределение исходных рядов температур асимметрично относительно математического ожидания. Выявленные особенности исходных рядов можно объяснить постепенным изменением климата. Увеличение средних температур приводит к смещению ряда в сторону больших величин. Низкая вариативность вызвана постепенным изменением климата, так называемым естественным изменением без сильного воздействия антропогенных факторов.

Таблица 3.2 Основные числовые характеристики рядов продолжительности ледостава за весь период наблюдений по 10 створам.

Створ	$m_x$	$M$	$Me$	$D$	$\sigma_x$	$Cv$	$Cs$
г. Котлас	147,6	144	147	319,01	17,86	0,12	-0,14
д. Абрамково	148,8	147	148	209,88	14,49	0,10	0,12
д. Нижняя Тойма	153,4	151	153	274,62	16,57	0,11	-0,20
д. Сидоровская	150,4	156	150	267,72	16,36	0,11	0,08
р. п. Березник	152,0	158	152	293,52	17,13	0,11	-0,12
д. Звоз	157,6	157	157	264,95	16,28	0,10	-0,10
с. Усть-Пинега	163,2	157	161	278,56	16,69	0,10	-0,11
д. Каликино	164,5	151	147	278,41	16,69	0,10	-3,91
г. Великий Устюг	156,5	151	151	382,75	19,56	0,13	-0,79
д. Федяково	159,1	160	160	319,65	17,88	0,11	-0,59

Из таблицы 3.2 видно, что большинство исследуемых рядов продолжительности ледостава обладают отрицательной асимметрией (8 из 10 рядов), что объясняется уменьшением значений в исходных рядах. Наибольшая степень асимметрии в сторону низких значений характерна для ряда наблюдений створа д. Каликино. Это единственный ряд, в котором значение больше -1 (или 1).

Коэффициенты вариации рядов продолжительности ледостава, как и температур воды, говорят о низкой вариативности значений рядов. Наивысшими значениями  $Cv$  среди створов являются г. Великий Устюг и г. Котлас.

Распределение исходных рядов продолжительности ледостава также асимметрично относительно математического ожидания. Уменьшение дней ледостава за весь период наблюдений приводит к смещению ряда в сторону низких величин. Низкая вариативность подтверждает естественное изменение климата, выявленное по значениям рядов температуры воды.



Таблица 3.3 Основные числовые характеристики рядов максимальной толщины льда за весь период наблюдений по 10 створам.

Створ	$m_x$	$M$	$Me$	$D$	$\sigma_x$	$Cv$	$Cs$
г. Котлас	67,5	64	67	120,09	10,96	0,16	0,71
д. Абрамково	70,0	68	69	121,09	11,00	0,16	0,37
д. Нижняя Тойма	68,6	62	66	108,99	10,44	0,15	0,56
д. Сидоровская	71,7	66	68	236,28	15,37	0,21	0,70
р. п. Березник	71,4	80	72	139,86	11,83	0,17	0,74
д. Звоз	64,2	60	65	130,70	11,43	0,18	-0,37
с. Усть-Пинега	60,0	63	60	56,58	7,52	0,13	0,25
д. Каликино	63,5	52	61,5	239,43	15,47	0,24	0,76
г. Великий Устюг	69,5	62	69	201,07	14,18	0,20	0,75
д. Федяково	66,0	66	66	80,17	8,95	0,14	0,01

По полученным данным из таблицы 3.3 9 из 10 исследуемых рядов обладают положительной асимметрией. Ни одно значение не превышает 1 (или -1). Отрицательная асимметрия наблюдается только у створа д. Звоз, что объясняется наибольшим изменением толщины льда за период наблюдений.

Значения коэффициента вариации для рядов толщины льда выше, чем в предыдущих рядах наблюдений, но все равно являются низкими. Наибольшие  $Cv$  у створов д. Каликино и д. Сидоровская.

Распределение исходных рядов максимальной толщины льда асимметрично относительно математического ожидания. Смещение ряда значений в сторону больших величин можно объяснить самими рядами наблюдений, ведь максимальная толщина льда – это чаще всего разовое значение за весь период ледостава. А вот низкая вариативность рядов толщины льда вновь подтверждает постепенный характер изменения климата.

## 3.2 Оценка стационарности рядов наблюдений

Случайные процессы делятся на стационарные и нестационарные. В узком смысле условием стационарности являются: постоянство математического ожидания и дисперсии во времени, зависимость корреляционной функции только от разности аргументов.

### 3.2.1 Визуальная оценка тренда

Нестационарность процесса можно определить по наличию тренда. Тренд – медленное, постепенное изменение случайной переменной  $X$  в течение анализируемого периода [10].

#### 3.2.1.1 Температура воды

На рисунках 3.1-3.3 представлены наиболее показательные графики временной изменчивости рядов температуры воды. Графики для остальных рядов представлены в Приложении Б.

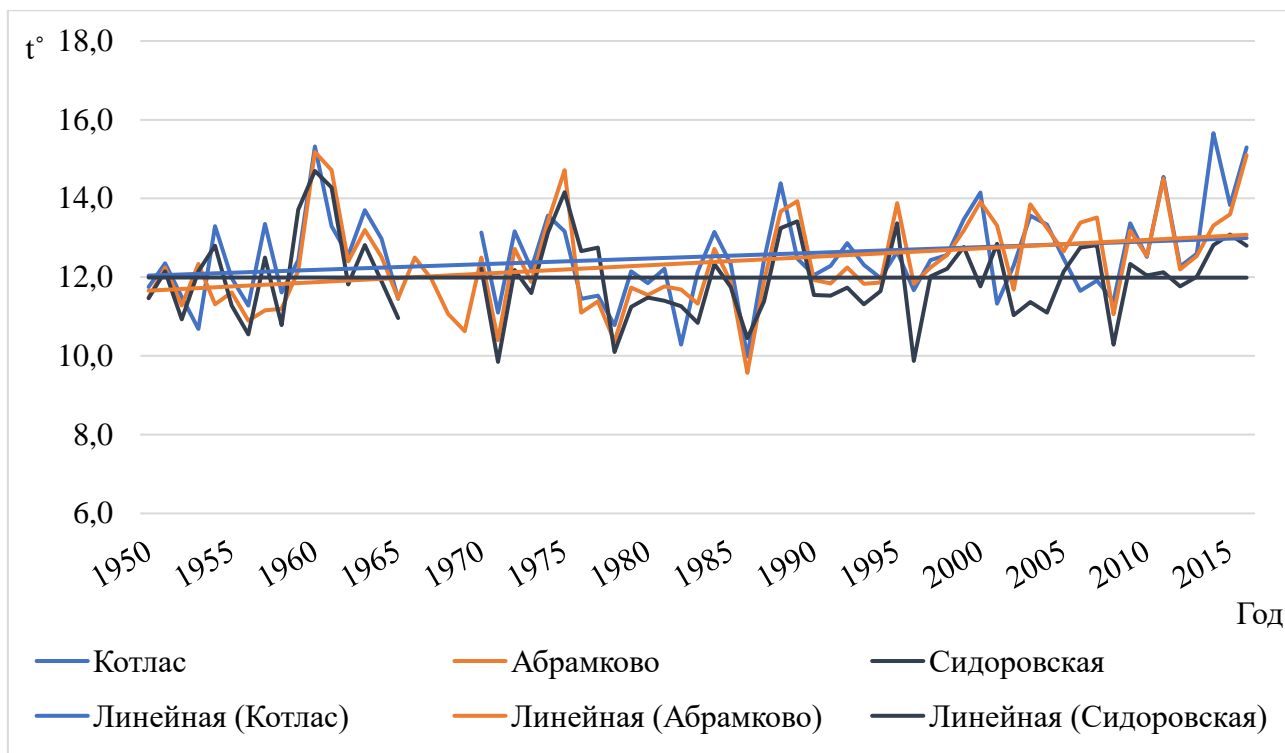


Рисунок 3.1 График временной изменчивости средних годовых температур воды с 1950 по 2016 гг. – р. Северная Двина до впадения р. Вага.

Из рисунка 3.1 видно, что тренды идут не только на повышение, но есть и не меняющиеся значения температур воды, как например для створа д. Сидоровская. Изменения в температуре воды для г. Котлас составляют  $2^{\circ}$ , для д. Абрамково –  $2,5^{\circ}$ .

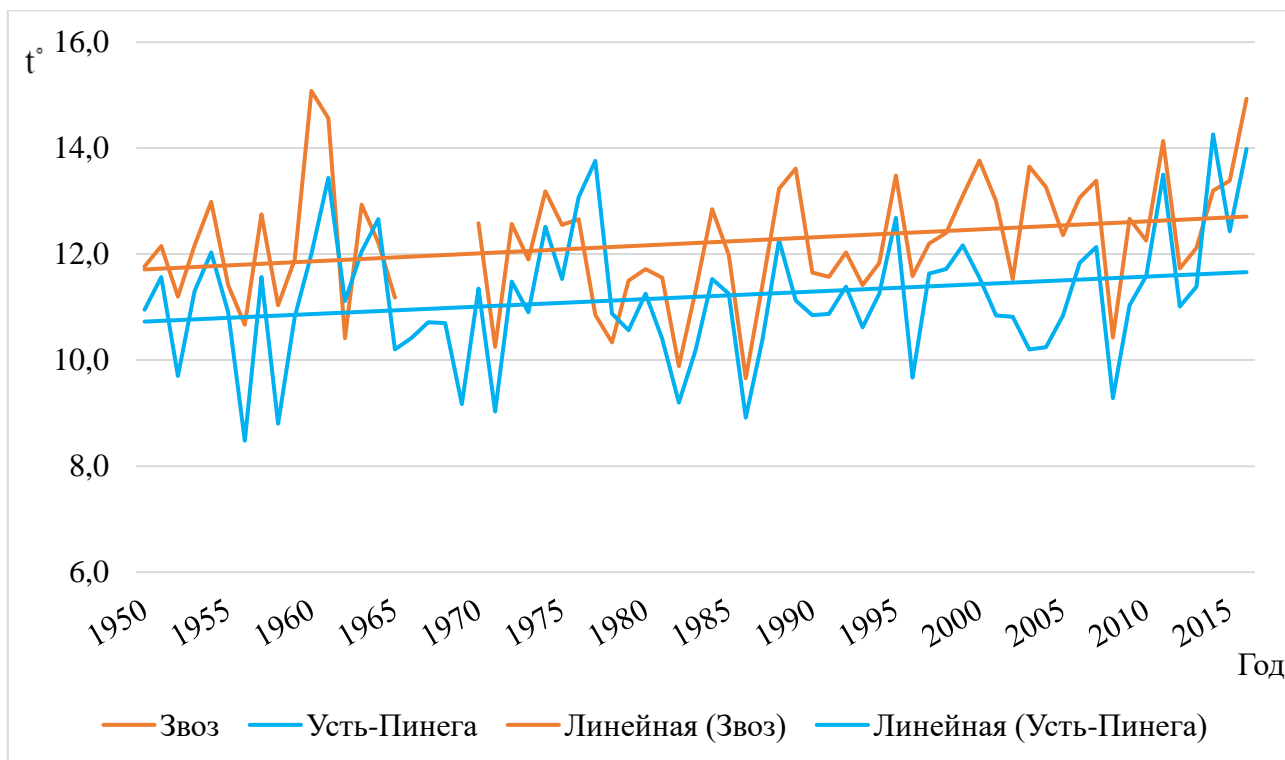


Рисунок 3.2 График временной изменчивости средних годовых температур воды с 1950 по 2016 гг. – р. Северная Двина после впадения р. Вага.

На примере створов д. Звоз и с. Усть-Пинега видно, что на реках северной части бассейна реки Северная Двина исследуемые характеристики также подчинены изменению климата за весь период наблюдений. Температуры воды в обоих створах повысилась на  $1,5^{\circ}$ .

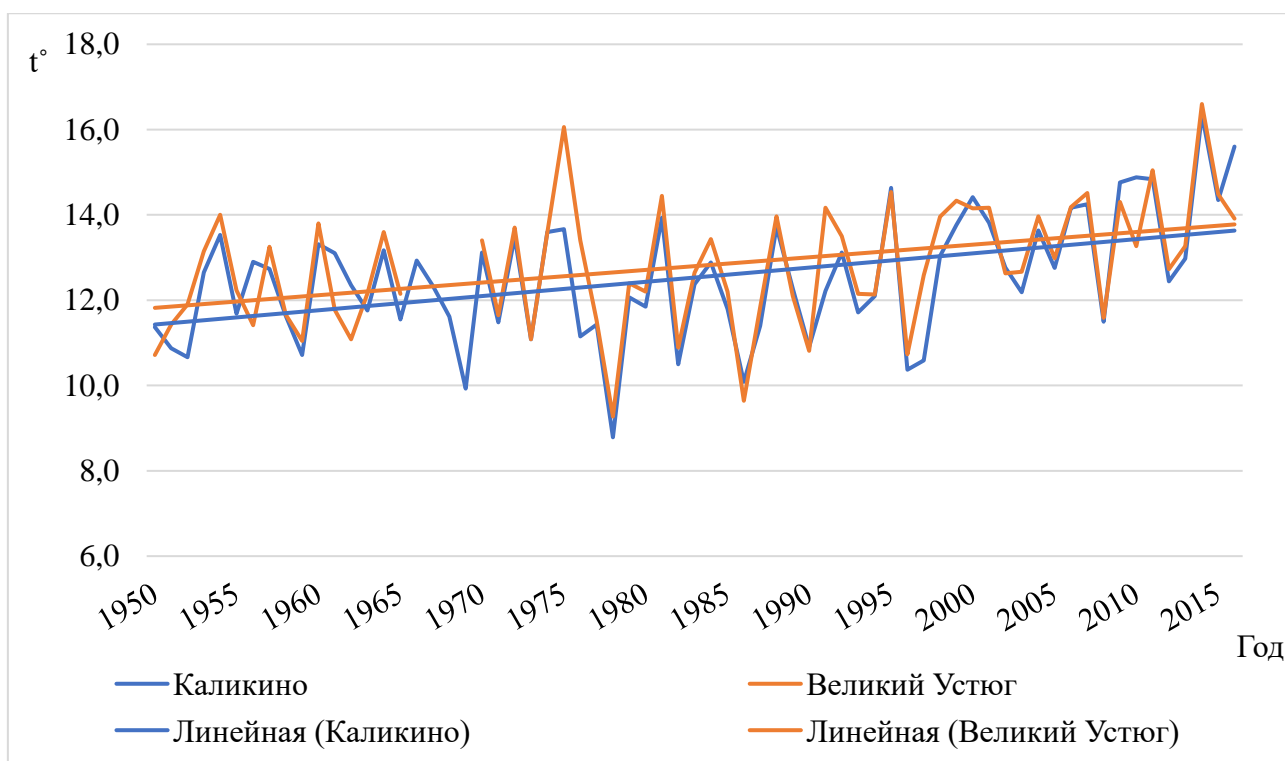


Рисунок 3.3 График временной изменчивости средних годовых температур воды с 1950 по 2016 гг. – р. Сухона.

В реке Сухона повысилась температура на 2° по ближайшим к началу реки Северная Двина створам.

Таким образом, из всех рассмотренных рядов наблюдений за температурой воды только для 1 из 10 створов тренд не меняется (д. Сидоровская). В остальных случаях тренды идут на повышение, что говорит о повышении температуры воды в бассейне реки Северная Двина, что обусловлено изменениями климата (повышение температуры от 0,5° до 2,5°).

### 3.2.1.2 Продолжительность ледостава

На рисунках 3.4-3.6 представлены наиболее показательные графики временной изменчивости рядов продолжительности ледостава. Графики для остальных рядов представлены в Приложении Б.

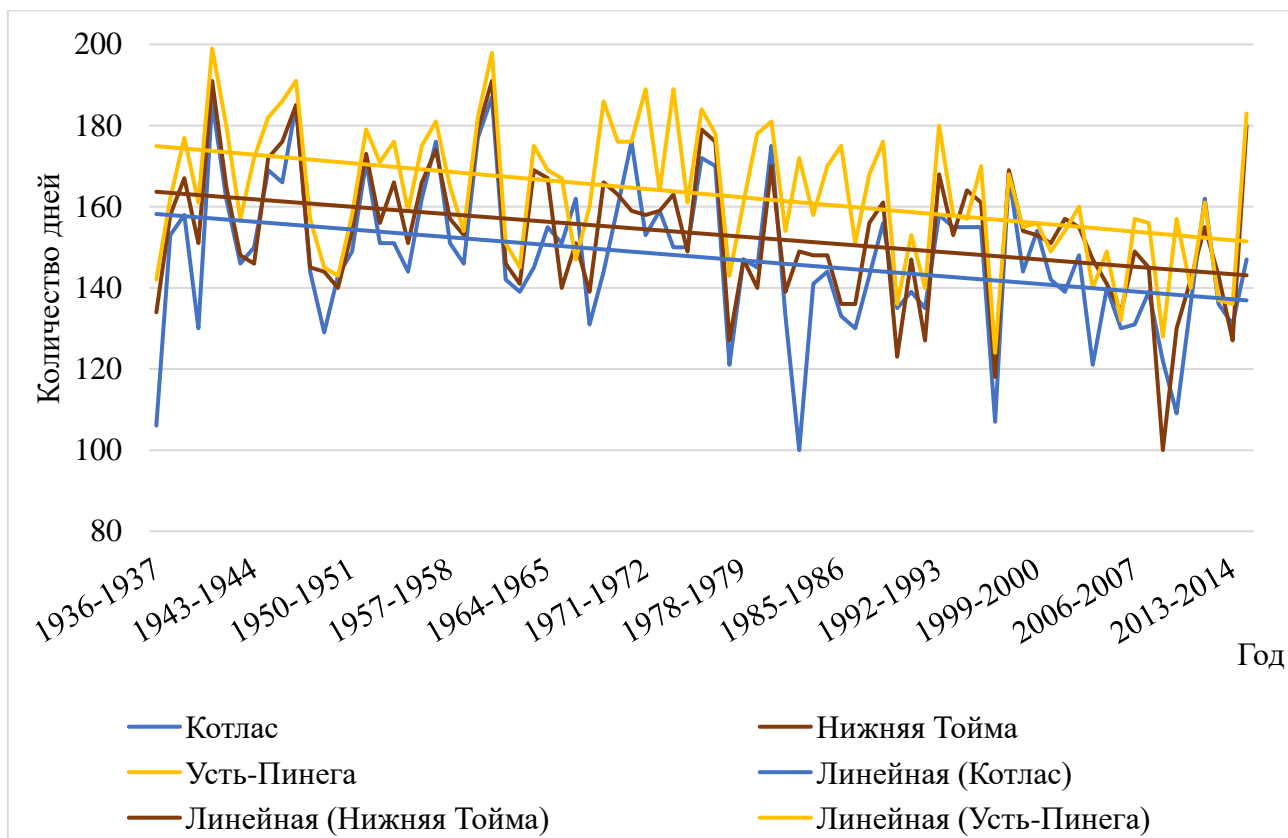


Рисунок 3.4 График временной изменчивости продолжительности ледостава с 1936 по 2015 гг. – р. Северная Двина.

Для большей репрезентативности рядов наблюдений для створов г. Котлас, д. Абрамково, д. Нижняя Тойма и с. Усть-Пинега взяты дополнительные 14 лет продолжительности ледостава. Тренды на понижение показывают, что за период в 70 лет продолжительность ледостава снизилась на протяжении всей реки Северная Двина на 20-25 дней.

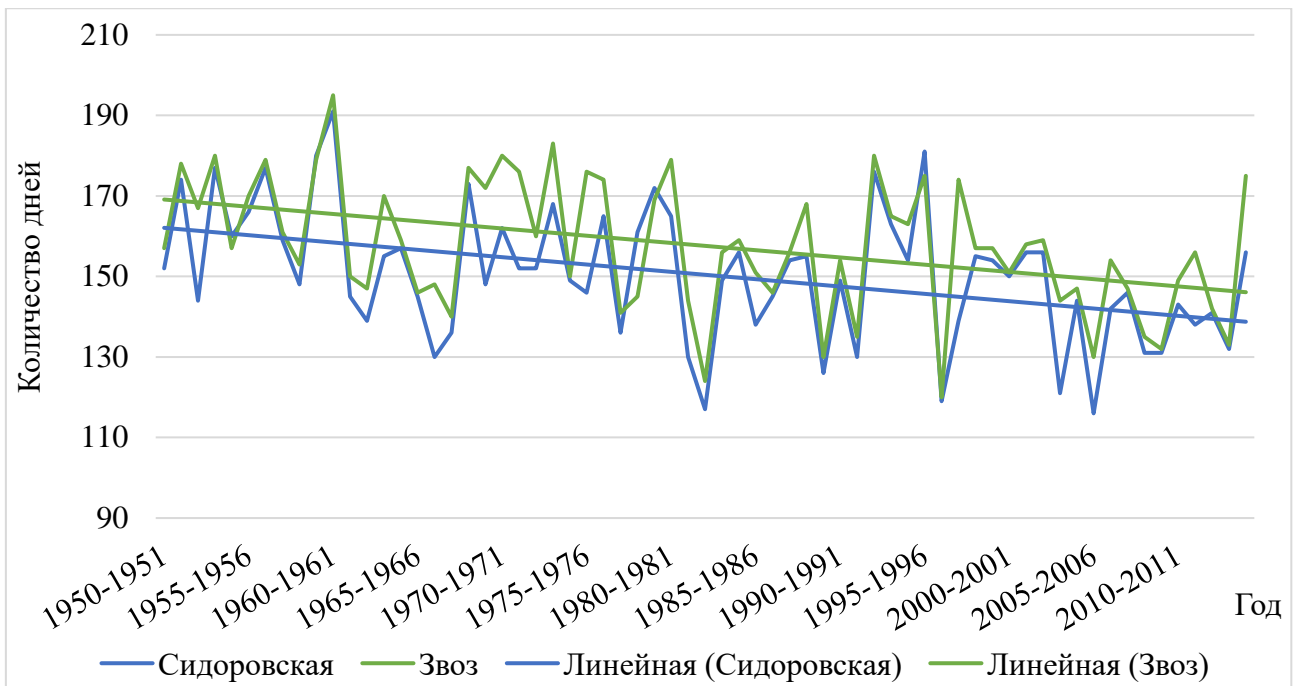


Рисунок 3.5 График временной изменчивости продолжительности ледостава с 1950 по 2015 гг. – р. Северная Двина.

Выборка в 66 лет также показывает уменьшение количества дней ледостава на 22-24 дня.

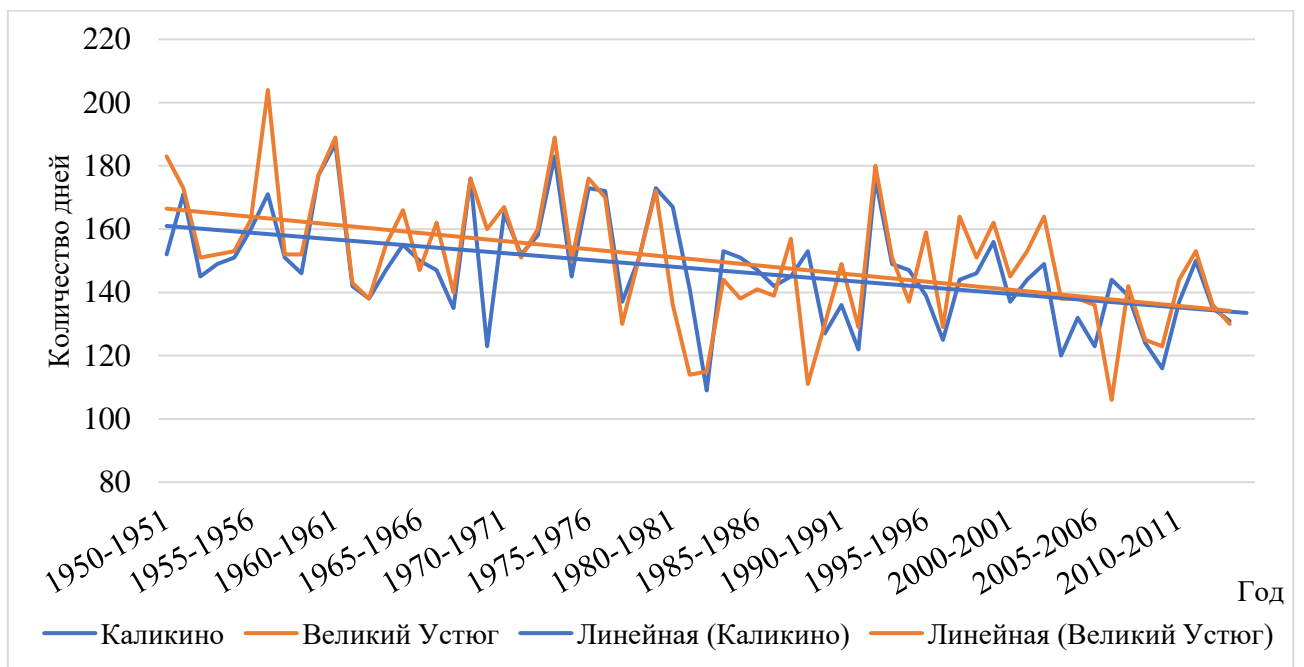


Рисунок 3.6 График временной изменчивости продолжительности ледостава с 1950 по 2014 гг. – р. Сухона.

Продолжительность ледостава реки Сухона по двум створам показывает более значительное изменение за 65 лет: уменьшение ледостава на 23-33 дня.

Все рассмотренные 10 рядов наблюдений продолжительности ледостава имеют тренды на понижение, что говорит об уменьшении количества дней с полным замерзанием рек бассейна реки Северная Двина, что в свою очередь объясняется изменением климата, а точнее его потеплением.

### 3.2.1.3 Максимальная толщина льда

На рисунках 3.7-3.8 представлены наиболее показательные графики временной изменчивости рядов максимальной толщины льда. Графики для остальных рядов представлены в Приложении Б.

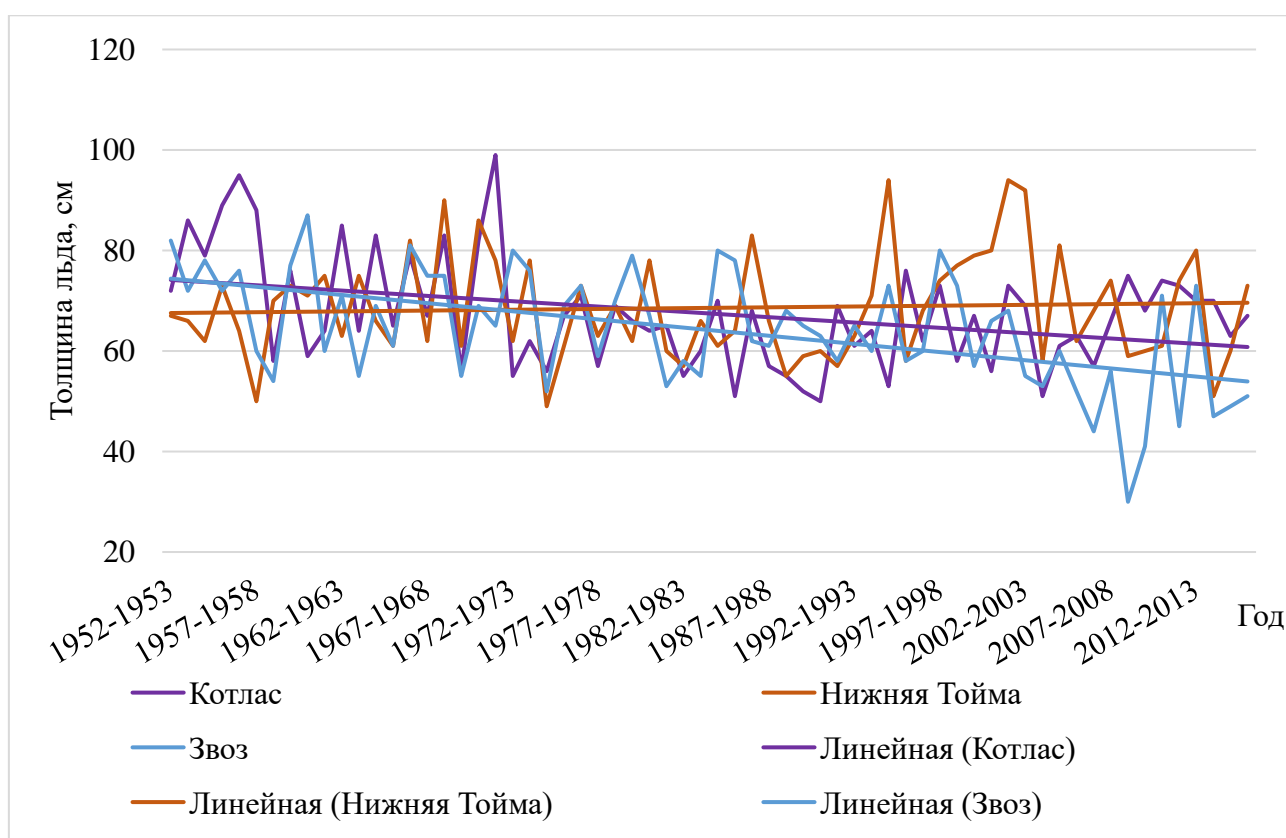


Рисунок 3.7 График временной изменчивости максимальной толщины льда с 1952 по 2016 гг. – р. Северная Двина.



Максимальная толщина льда не столь показательна при анализе влияния изменений климата. Только 2 створа реки Северная Двина (г. Котлас и д. Звоз) имеют тренды на понижение, остальные либо не меняются, либо вообще возрастают. Следует заметить, что северный створ д. Звоз характеризуется наибольшим снижением максимальных значений толщины льда.

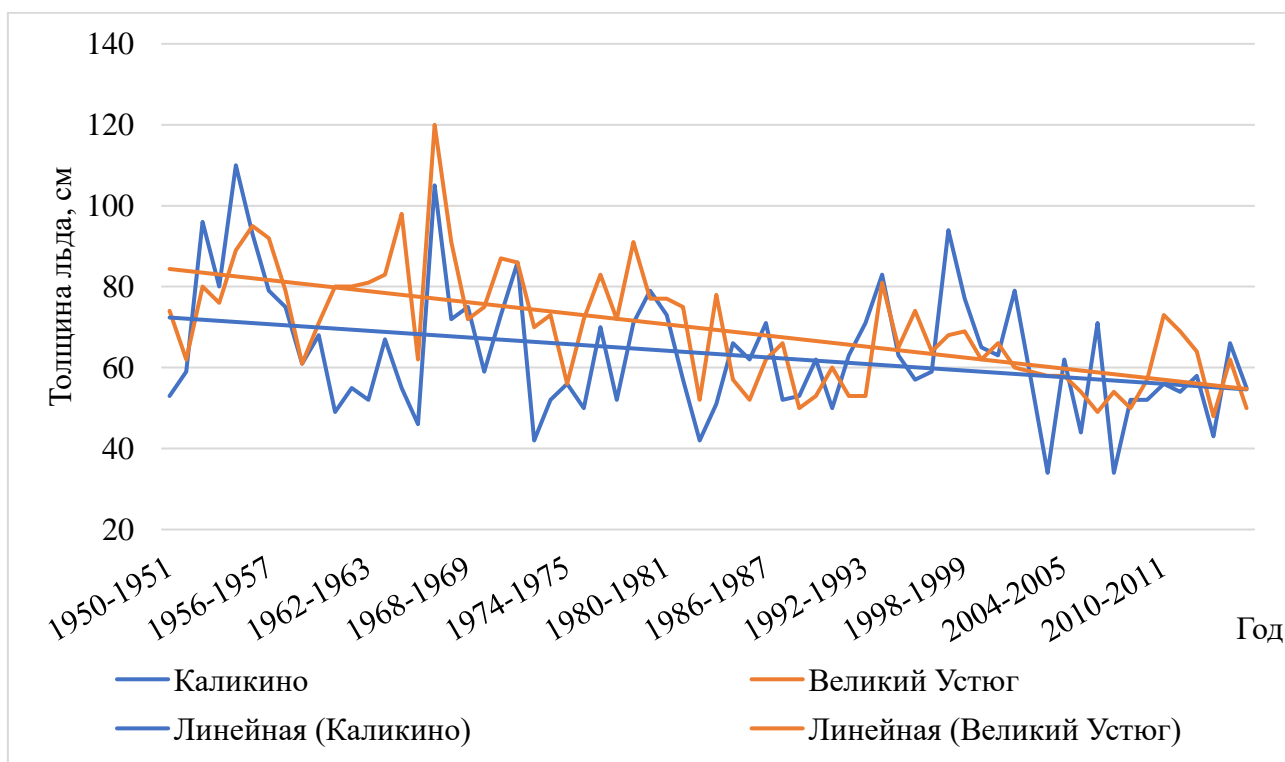


Рисунок 3.8 График временной изменчивости максимальной толщины льда с 1950 по 2016 гг. – р. Сухона.

Река Сухона характеризуется более устойчивой картиной изменения максимальной толщины льда за период наблюдений. Для рассматриваемых створов тренды идут на понижение, что все-таки говорит о снижении толщины льда.

С трендами рядов наблюдений максимальной толщины льда не так все однозначно. Из-за того, что эта характеристика разовая для каждого года, то ее значения не связаны с другими характеристиками, а изменение климата не столько сильно, чтобы резко уменьшить толщину льда.

Для бассейна реки Северная Двина большинство рядов по максимальной толщине льда не отображают изменений за период наблюдений, либо тренды на понижение не так существенны (максимальное изменение составляет уменьшение толщины льда на 20 сантиметров).

### 3.2.2 Статистическая оценка тренда

Для оценки тренда используется коэффициент корреляции между значениями исходного ряда и порядковыми номерами или критерий Спирмэна.

#### 3.2.2.1 Оценка тренда по коэффициенту корреляции

Для оценки тренда используется следующая формула коэффициента корреляции:

$$r_{xi} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})(i - i_{cp})}{(n-1)\sigma_x\sigma_i} \quad (3.8)$$

где  $i$  – порядковый номер члена ряда,  $\sigma_x$  и  $\sigma_i$  – средние квадратические отклонения ряда  $X$  и порядковых номеров  $i$  [10].

Если значение  $r_{xi}$  окажется значимым, то очевидно наличие тренда, который тоже будет считаться значимым, а ряд будет нестационарным.

Оценка значимости коэффициента корреляции решается с помощью нулевой гипотезы, имеющей следующий вид:

$$H_0: r = 0 \quad (3.9)$$

Если  $r > t_\alpha * \sigma_{r0}$ , где:

$$t_\alpha * \sigma_{r0} = t_\alpha * \sqrt{\frac{1}{n-1}} \quad (3.10)$$

то нулевая гипотеза (3.9) опровергается и коэффициент корреляции значим.

Значения  $r$  меняются в пределах от -1 до 1. Отрицательный знак говорит об обратной связи между процессами, а положительный знак – о прямой связи, т.е. о синхронных процессах. Если  $r = 0$ , то связи нет; если  $r = \pm 1$ , то связь функциональная.

В таблицах 3.4-3.6 представлены значения коэффициентов корреляции, их значимость по формуле 3.10 и вывод о стационарности рядов температуры воды, продолжительности ледостава и максимальной толщине льда.

Таблица 3.4 Оценка коэффициента корреляции между значениями рядов температуры воды и порядковыми номерами.

Створ	$r$	Значимость $r$	Стационарность ряда
г. Котлас	0,265	Значим	Нестационарный
д. Абрамково	0,355	Значим	Нестационарный
д. Нижняя Тойма	0,172	Не значим	Стационарный
д. Сидоровская	0,009	Не значим	Стационарный
р. п. Березник	0,291	Значим	Нестационарный
д. Звоз	0,270	Значим	Нестационарный
с. Усть-Пинега	0,224	Значим	Нестационарный
д. Каликино	0,447	Значим	Нестационарный
г. Великий Устюг	0,410	Значим	Нестационарный
д. Федяково	0,512	Значим	Нестационарный

Из таблицы 3.4 видно, что только 2 ряда температуры воды по оценке  $r$  являются стационарными. Положительный знак  $r$  показывает повышение значений. Только для д. Федяково связь близка к функциональной.

Таблица 3.5 Оценка коэффициента корреляции между значениями рядов продолжительности ледостава и порядковыми номерами.

Створ	$r$	Значимость $r$	Стационарность ряда
г. Котлас	-0,349	Значим	Нестационарный
д. Абрамково	-0,317	Значим	Нестационарный
д. Нижняя Тойма	-0,363	Значим	Нестационарный
д. Сидоровская	-0,418	Значим	Нестационарный
р. п. Березник	-0,388	Значим	Нестационарный
д. Звоз	-0,415	Значим	Нестационарный
с. Усть-Пинега	-0,412	Значим	Нестационарный
д. Каликино	-0,476	Значим	Нестационарный
г. Великий Устюг	-0,484	Значим	Нестационарный
д. Федяково	-0,428	Значим	Нестационарный

Все ряды продолжительности ледостава являются нестационарными, т. е. они непостоянны во времени, а значит, в них прослеживается изменчивость за весь период наблюдений. Знак «-» коэффициента корреляции показывает на понижение значений рассматриваемых рядов, а сами значения  $r$  говорят о не тесной связи ( $|r| < 0,5$ ).

Таблица 3.6 Оценка коэффициента корреляции между значениями рядов максимальной толщины льда и порядковыми номерами.

Створ	$r$	Значимость $r$	Стационарность ряда
г. Котлас	-0,357	Значим	Нестационарный
д. Абрамково	0,026	Не значим	Стационарный
д. Нижняя Тойма	0,057	Не значим	Стационарный
д. Сидоровская	0,039	Не значим	Стационарный
р. п. Березник	-0,193	Не значим	Стационарный
д. Звоз	-0,525	Значим	Нестационарный
с. Усть-Пинега	-0,211	Значим	Нестационарный
д. Каликино	-0,336	Значим	Нестационарный
г. Великий Устюг	-0,613	Значим	Нестационарный
д. Федяково	-0,211	Не значим	Стационарный

Из таблицы 3.6 видно, что ряды максимальной толщины льда не имеют общей тенденции: 7 створов показывают понижение значений; а 3 повышение, близкое к отсутствию связи вообще. Для двух рядов (д. Звоз и г. Великий Устюг) связь близка к функциональной.

### 3.2.2.2 Оценка тренда по критерию Спирмэна

Ранговый критерий Спирмэна – один из часто используемых критериев при исследовании зависимости процесса от времени:

$$\rho = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (3.11)$$

где  $d_i$  – разность между порядковым номером и рангом каждого значения ряда  $n$ .

Если связь отсутствует, то  $\rho=0$ ; при прямой связи, т.е. при постепенном нарастании  $X$ ,  $\rho=1$ ; при обратной связи, т.е. постепенном уменьшении  $X$ ,  $\rho=-1$  [7].

Как и коэффициент корреляции, критерий Спирмэна проверяется на значимость по формуле 3.10, если  $\rho > t_{\alpha} * \sigma_{\rho}$ , то критерий значим, тренд значим и ряд считается нестационарным.

В таблицах 3.7-3.9 представлены значения критерия Спирмэна, их значимость и вывод о стационарности рядов температуры воды, продолжительности ледостава и максимальной толщины льда.

Таблица 3.7 Оценка критерия Спирмэна для рядов температуры воды.

Створ	$\rho$	Значимость $\rho$	Стационарность ряда
г. Котлас	0,271	Значим	Нестационарный
д. Абрамково	0,434	Значим	Нестационарный
д. Нижняя Тойма	0,265	Значим	Нестационарный
д. Сидоровская	0,103	Не значим	Стационарный
р. п. Березник	0,286	Значим	Нестационарный
д. Звоз	0,325	Значим	Нестационарный
с. Усть-Пинега	0,204	Не значим	Стационарный
д. Каликино	0,431	Значим	Нестационарный
г. Великий Устюг	0,464	Значим	Нестационарный
д. Федяково	0,486	Значим	Нестационарный

8 рядов температуры воды по критерию Спирмэна являются нестационарными, а значит непостоянными во времени. Все значения критерия показывают постепенное нарастание значений за период наблюдений, что подтверждают тренды на повышение (кроме д. Сидоровская, где связь крайне не тесная).

Таблица 3.8 Оценка критерия Спирмэна для рядов продолжительности ледостава.

Створ	$\rho$	Значимость $\rho$	Стационарность ряда
г. Котлас	-0,349	Значим	Нестационарный
д. Абрамково	-0,275	Значим	Нестационарный
д. Нижняя Тойма	-0,308	Значим	Нестационарный
д. Сидоровская	-0,390	Значим	Нестационарный
р. п. Березник	-0,360	Значим	Нестационарный
д. Звоз	-0,396	Значим	Нестационарный
с. Усть-Пинега	-0,389	Значим	Нестационарный
д. Каликино	-0,493	Значим	Нестационарный
г. Великий Устюг	-0,477	Значим	Нестационарный
д. Федяково	-0,379	Значим	Нестационарный

Ряды продолжительности ледостава как следует из таблицы 3.8 являются нестационарными рядами, отрицательный знак критерия Спирмэна указывает на постепенное понижение значений.

Таблица 3.9 Оценка критерия Спирмэна для рядов максимальной толщины льда.

Створ	$\rho$	Значимость $\rho$	Стационарность ряда
г. Котлас	-0,247	Значим	Нестационарный
д. Абрамково	0,077	Не значим	Стационарный
д. Нижняя Тойма	0,013	Не значим	Стационарный
д. Сидоровская	0,020	Не значим	Стационарный
р. п. Березник	-0,250	Значим	Нестационарный
д. Звоз	-0,484	Значим	Нестационарный
с. Усть-Пинега	-0,146	Не значим	Стационарный
д. Каликино	-0,252	Значим	Нестационарный
г. Великий Устюг	-0,624	Значим	Нестационарный
д. Федяково	-0,115	Не значим	Стационарный

Аналогичная ситуация с рядами максимальной толщины льда (таблица 3.9), где 3 створа (д. Абрамково, д. Нижняя Тойма и д. Сидоровская) практически не имеют связи, а остальные постепенно уменьшаются за рассматриваемый период наблюдений.

Результаты проверки стационарности исходных рядов температуры воды, продолжительности ледостава и максимальной толщины льда по совокупности двух оценок представлены в таблице 3.10. Стационарным считается тот ряд, для которого по оценке коэффициента корреляции и критерия Спирмэна тренды не значимы. Если хотя бы одна оценка говорит о значимости тренда, то ряд нестационарный.

Таблица 3.10 Оценка стационарности исходных рядов.

Створ	Температура воды	Продолжительность ледостава	Макс. толщина льда
г. Котлас	Нестационарный	Нестационарный	Нестационарный
д. Абрамково	Нестационарный	Нестационарный	Стационарный
д. Нижняя Тойма	Нестационарный	Нестационарный	Стационарный
д. Сидоровская	Стационарный	Нестационарный	Стационарный
р. п. Березник	Нестационарный	Нестационарный	Нестационарный
д. Звоз	Нестационарный	Нестационарный	Нестационарный
с. Усть-Пинега	Нестационарный	Нестационарный	Нестационарный
д. Каликино	Нестационарный	Нестационарный	Нестационарный
г. Великий Устюг	Нестационарный	Нестационарный	Нестационарный
д. Федяково	Нестационарный	Нестационарный	Стационарный

Из таблицы 3.10 видно, что стационарными рядами являются всего 5 из 30 рассматриваемых, причем 4 из них относятся к максимальной толщине льда. Рисунки 3.1-3.8 подтверждают вывод о том, что для этих 5 стационарных створов тренды не меняются.



83,3% рассматриваемых значений являются нестационарными, а значит, имеют тенденцию к изменению во времени, что можно связать с влиянием изменяющегося климата.

### 3.3 Оценка однородности рядов наблюдений

Ряды наблюдений могут быть однородными и неоднородными. Однородность – принадлежность рассматриваемых рядов или всех частей одного ряда к одной генеральной совокупности [10].

Проверка однородности рядов наблюдений производится с помощью гипотез того или иного вида. Критерий Стьюдента – оценка гипотез об однородности по математическому ожиданию и критерий Фишера – оценка гипотез об однородности по дисперсии, являются одними из самых распространенных критериев для оценки параметрических гипотез однородности [11].

#### 3.3.1 Определение даты нарушения однородности

Для установки даты нарушения однородности рядов наблюдений используется методика, основанная на построении интегральных кривых.

Интегральные кривые представляют собой графическое отображение зависимости:

$$W_i = f(i) \quad (3.12)$$

где  $W_i$  – нарастающая сумма значений ряда  $X$  от первого до  $i$ -го члена ряда [12].

На рисунках 3.9-3.14 представлены наиболее показательные интегральные кривые рядов наблюдений для установки дат нарушения однородности. Интегральные кривые всех исходных данных расположены в Приложении В.

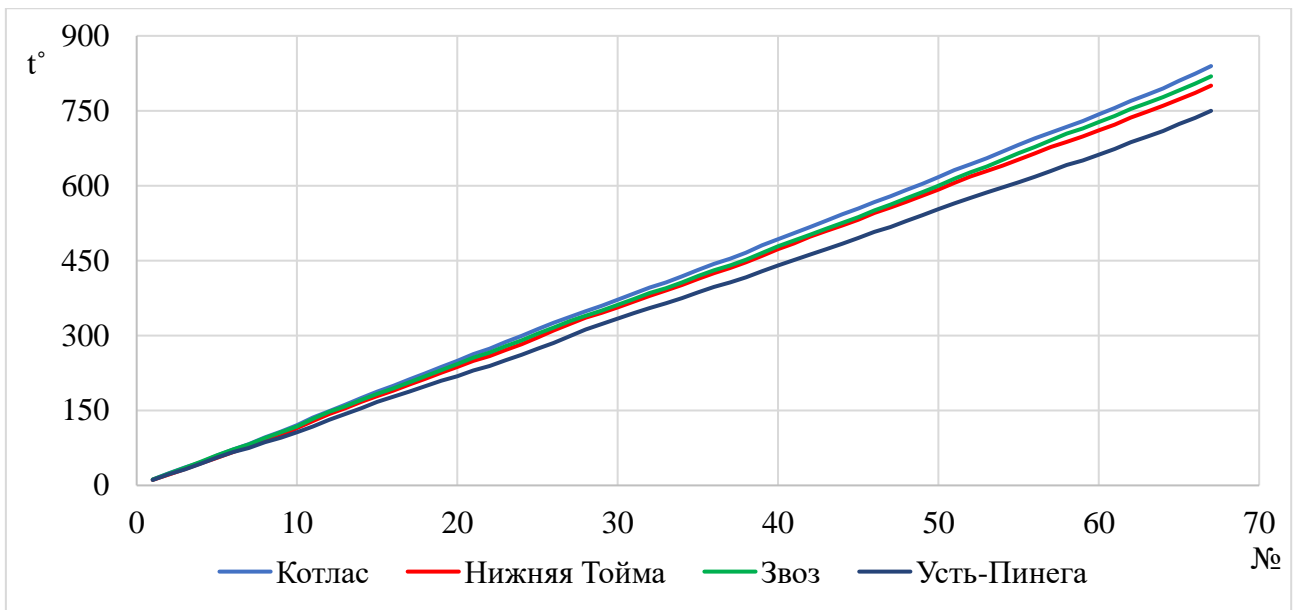


Рисунок 3.9 Интегральные кривые рядов температуры воды для створов реки Северная Двина.

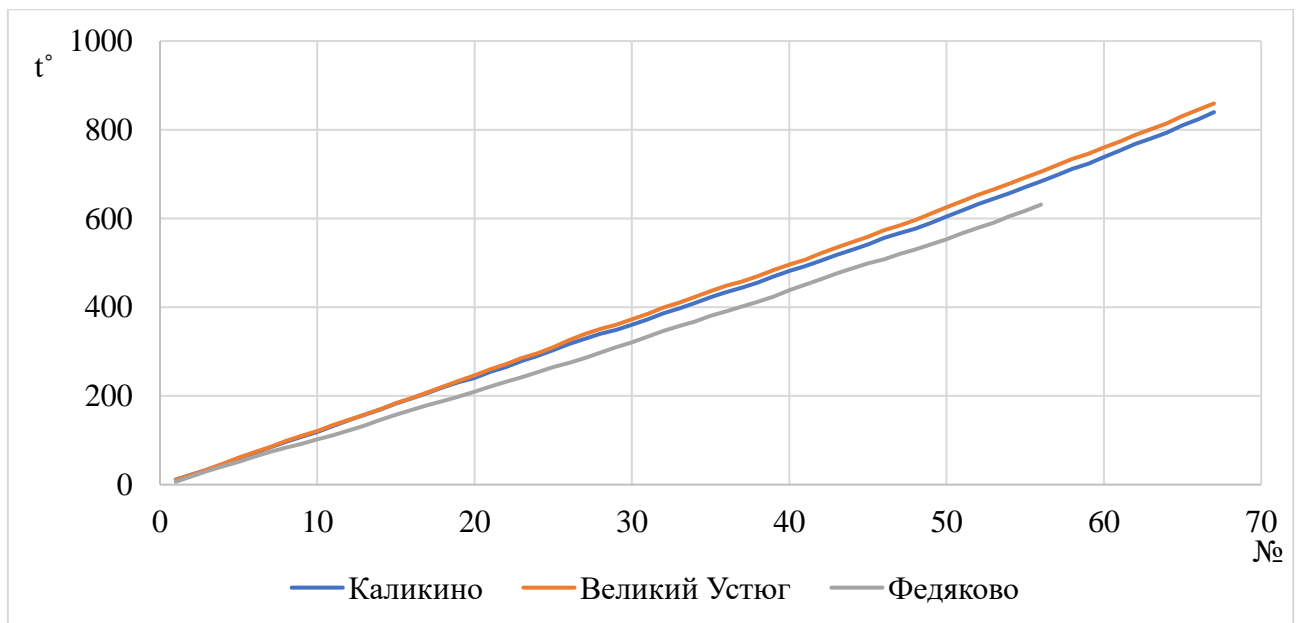


Рисунок 3.10 Интегральные кривые рядов температуры воды для створов рек Сухона и Вычегда.

Интегральные кривые рядов температуры воды по всем створам характеризуются либо отсутствием перегибов, либо незначительными отклонениями в основном в 2000-х годах.

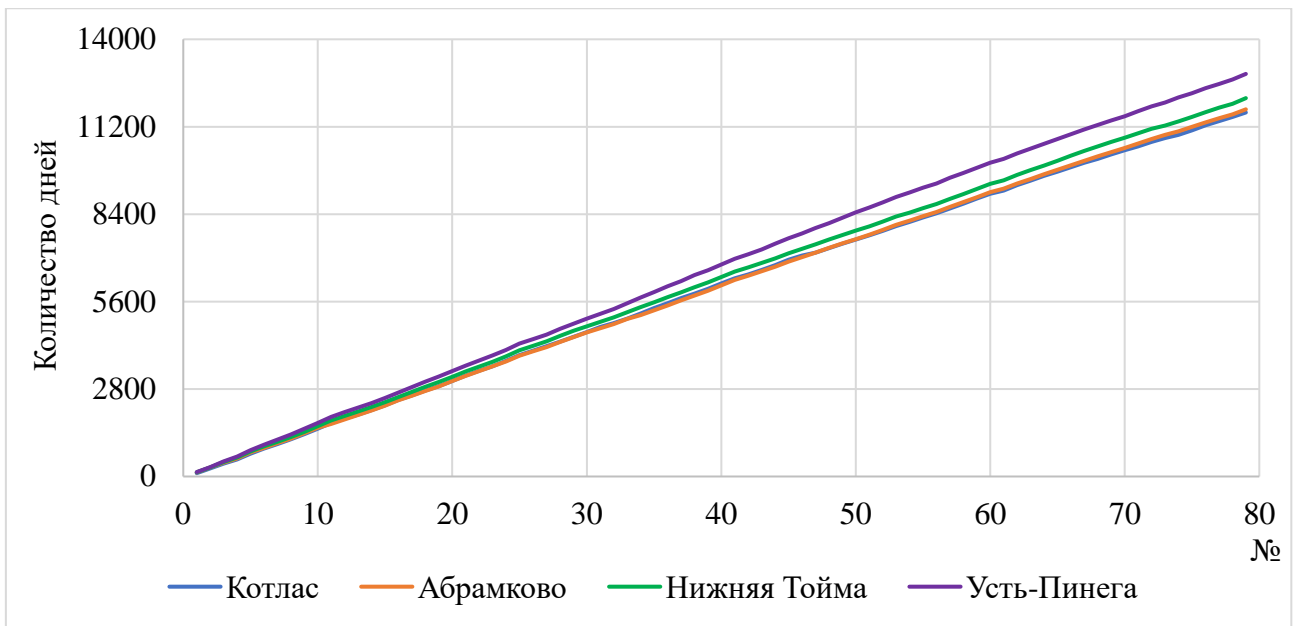


Рисунок 3.11 Интегральные кривые рядов продолжительности ледостава для створов реки Северная Двина.

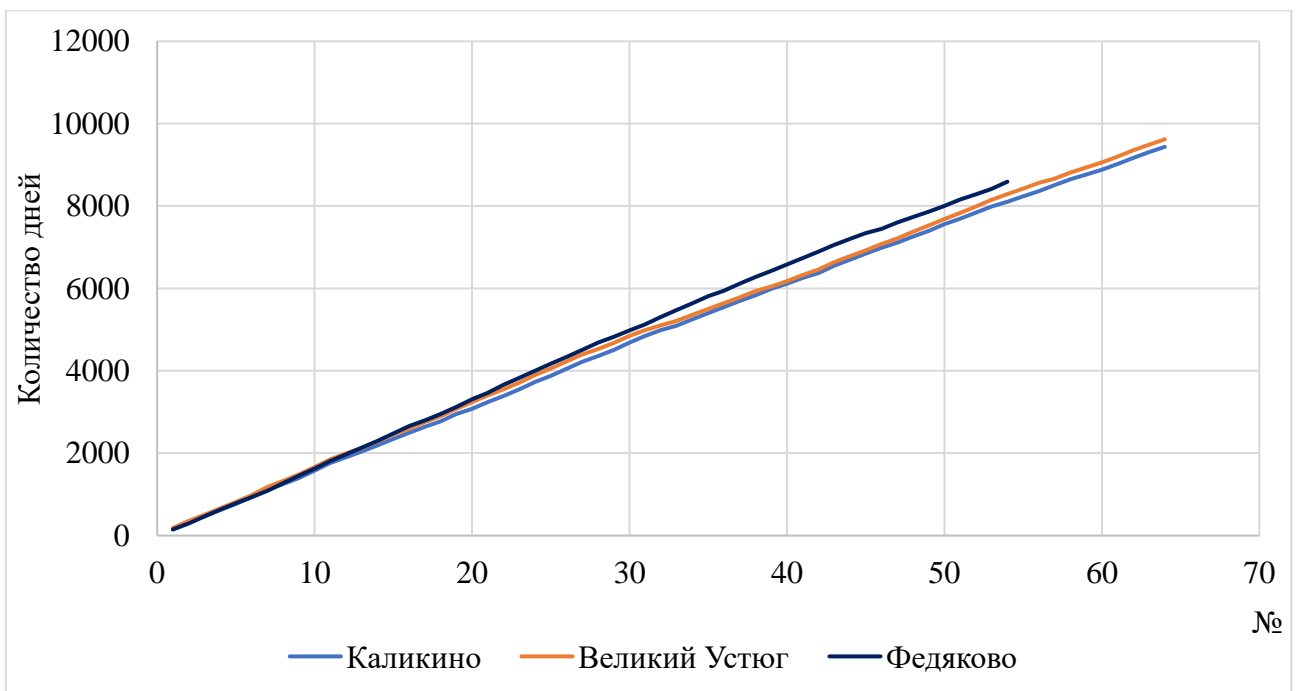


Рисунок 3.12 Интегральные кривые рядов продолжительности ледостава для створов рек Сухона и Вычегда.

Интегральные кривые рядов продолжительности ледостава имеют более значительные перегибы, чем у температуры воды. Большинство перегибов относятся к 80-м годам (подробнее указано в ниже приведенной таблице 3.11).

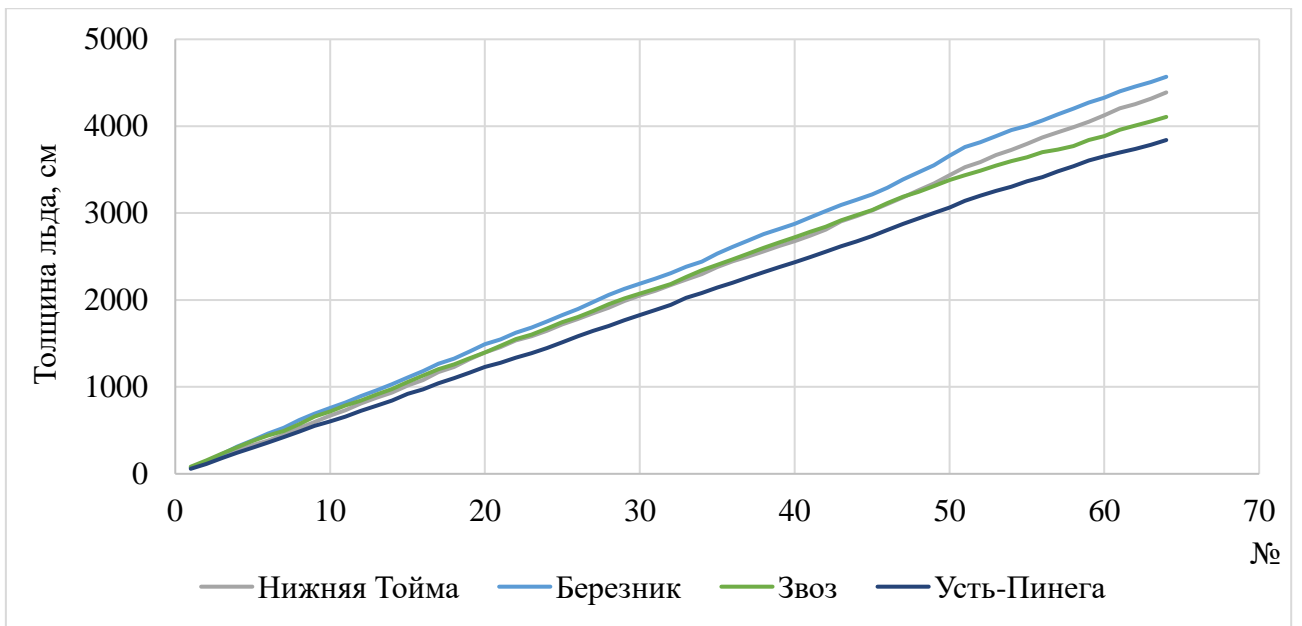


Рисунок 3.13 Интегральные кривые рядов максимальной толщины льда для створов реки Северная Двина.

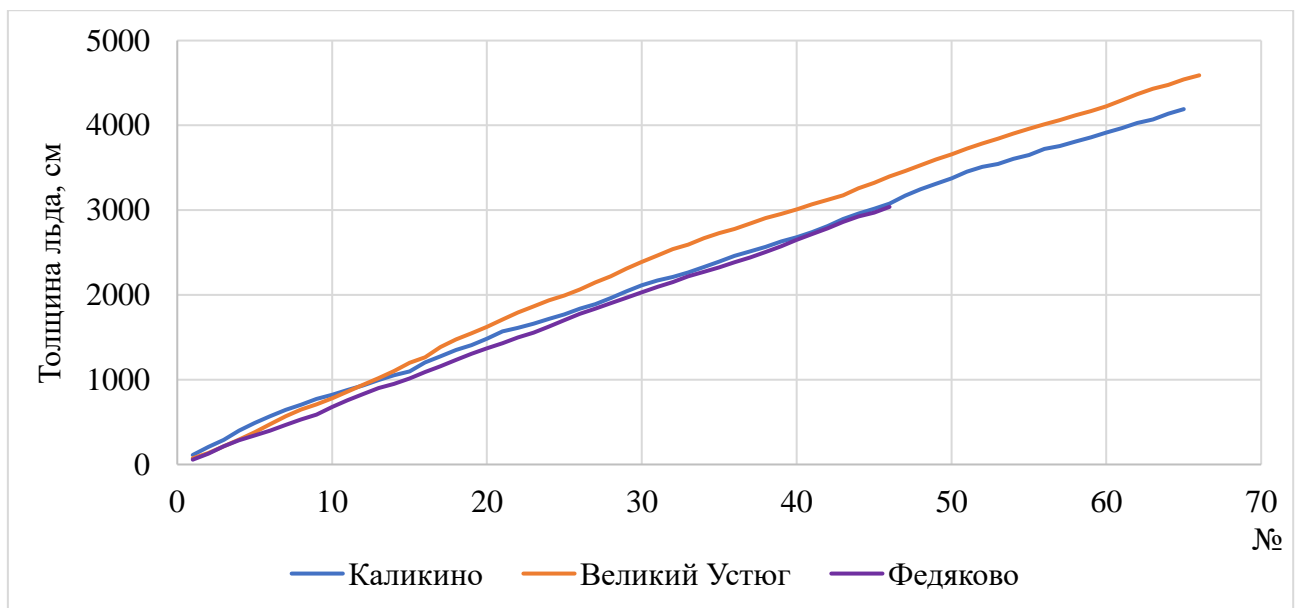


Рисунок 3.14 Интегральные кривые рядов максимальной толщины льда для створов рек Сухона и Вычегда.

Интегральные кривые максимальной толщины льда в большинстве неоднородны, множество перегибов говорит об существенных изменениях в значениях рядов.

В таблице 3.11 сведены все года, в которые происходят значительные нарушения однородности рассматриваемых рядов.

Таблица 3.11 Основные года нарушений однородности рядов температур воды, продолжительности ледостава и максимальной толщине льда за весь период наблюдений.

Створ	Температура воды	Продолжительность ледостава	Макс. толщина льда
г. Котлас	-	1982-2015	1957-1978, 1989-2016
д. Абрамково	2010-2016	1985-2015	2002-2006
д. Нижняя Тойма	1999-2016	1970-2015	2002-2016
д. Сидоровская	-	1981-2015	1973-2016
р. п. Березник	2000-2016	1987-2015	1993-1999, 2011-2016
д. Звоз	2005-2016	1997-2015	1993-2016
с. Усть-Пинега	-	1992-2015	2013-2016
д. Каликино	2006-2016	1990-2015	1953-1963, 1982-2016
г. Великий Устюг	2007-2016	1983-2015	1967-1985, 1991-2016
д. Федяково	2000-2016	2007-2015	2001-2016

Интегральные кривые позволяют оценить как распределение характеристики в пространстве, так и динамику изменения значений во времени, последнее особенно актуально для данной работы.

Для рядов температуры воды характерны перегибы из-за повышенных значений температур, но интегральные кривые изменяются незначительно за весь период наблюдений. Ряды продолжительности ледостава со второй половины интегральных кривых идут на понижение, особенно значительные изменения у створов г. Котлас и г. Великий Устюг. А вот значения максимальной толщины льда не имеют столь однозначной направленности, для некоторых створов перегибы практически отсутствуют (д. Абрамково, с. Усть-Пинега, д. Федяково), а для некоторых идут на повышение (д. Сидоровская).

Если говорить об оценке однородности по интегральным кривым, то можно сделать вывод о неоднородности большинства рядов. Однородными являются следующие ряды: по температуре воды – г. Котлас, д. Сидоровская и с. Усть-Пинега; по максимальной толщине льда – д. Нижняя Тойма, с. Усть-Пинега и д. Федяково.

### 3.3.2 Оценка гипотез об однородности по критерию Стьюдента

Нулевая гипотеза для критерия Стьюдента:

$$H_0: m_{x1} = m_{x2} \quad (3.13)$$

Статистика  $t$  Стьюдента – нормированная разность средних значений двух рядов наблюдений. В случае если действительные значения СКО сопоставляемых рядов неизвестны, величина статистики  $t$  рассчитывается по формуле 3.14:

$$t^* = \frac{m_{x1} - m_{x2}}{\sigma^*} * \sqrt{\frac{n_1 * n_2}{n_1 + n_2}} \quad (3.14)$$

где

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) * \sigma_{x1}^2 + (n_2 - 1) * \sigma_{x2}^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}} \quad (3.15)$$

С помощью таблиц ординат значений  $t$  распределения Стьюдента при различном числе степеней свободы:

$$v = n_1 + n_2 - 2 \quad (3.16)$$

может быть определено критическое для данной нулевой гипотезы (3.13) значение  $t$ . Если  $t^* \leq t$ , то гипотеза не опровергается и все значения ряда принадлежат к одной генеральной совокупности [11].

В таблицах 3.12-3.14 представлены расчеты критерия Стьюдента для рядов наблюдений по температуре воды, продолжительности ледостава и максимальной толщине льда. Также в таблицах указан результат оценки нулевой гипотезы (3.13) и сделан вывод об однородности рядов.

Таблица 3.12 Расчет критерия Стьюдента для рядов температуры воды.

Створ	$\sigma^*$	$t^*$	$t$	Однородность ряда
г. Котлас	1,091	-1,645	1,67	Однородный
д. Абрамково	1,136	-2,486	1,67	Неоднородный
д. Нижняя Тойма	1,171	-0,821	1,67	Однородный
д. Сидоровская	1,011	0,279	1,67	Однородный
р. п. Березник	1,107	-1,989	1,67	Неоднородный
д. Звоз	1,109	-1,897	1,67	Неоднородный
с. Усть-Пинега	1,229	-0,968	1,67	Однородный
д. Каликино	1,378	-2,941	1,67	Неоднородный
г. Великий Устюг	1,354	-2,365	1,67	Неоднородный
д. Федяково	1,280	-3,728	1,673	Неоднородный

Большинство рядов температуры воды являются неоднородными по критерию Стьюдента, что можно объяснить аномальными повышениями температуры воды в некоторые годы по сравнению со средними значениями.

Таблица 3.13 Расчет критерия Стьюдента для рядов продолжительности ледостава.

Створ	$\sigma^*$	$t^*$	$t$	Однородность ряда
г. Котлас	16,619	3,774	1,67	Неоднородный
д. Абрамково	14,039	2,670	1,67	Неоднородный
д. Нижняя Тойма	15,450	3,726	1,67	Неоднородный
д. Сидоровская	15,390	3,236	1,67	Неоднородный
р. п. Березник	16,110	3,242	1,67	Неоднородный
д. Звоз	15,053	3,606	1,67	Неоднородный
с. Усть-Пинега	15,497	3,825	1,67	Неоднородный
д. Каликино	14,607	4,710	1,67	Неоднородный
г. Великий Устюг	17,591	5,067	1,67	Неоднородный
д. Федяково	16,350	3,546	1,674	Неоднородный

Ряды продолжительности ледостава неоднородны во всех створах бассейна реки Северная Двина. Как на интегральных кривых, так и при оценке критерия Стьюдента, ледостав является наиболее показательным рядом наблюдений в плане изменения климата. Для каждого створа характерно большое количество значений меньших среднего за весь период наблюдений.

Таблица 3.14 Расчет критерия Стьюдента для рядов максимальной толщины льда.

Створ	$\sigma^*$	$t^*$	$t$	Однородность ряда
г. Котлас	10,496	2,787	1,67	Неоднородный
д. Абрамково	11,164	-0,425	1,67	Однородный
д. Нижняя Тойма	10,585	-0,508	1,67	Однородный
д. Сидоровская	15,543	-0,722	1,67	Однородный
р. п. Березник	11,990	0,511	1,67	Однородный
д. Звоз	10,839	3,033	1,67	Неоднородный
с. Усть-Пинега	7,602	0,806	1,67	Однородный
д. Каликино	15,299	1,875	1,67	Неоднородный
г. Великий Устюг	11,127	4,779	1,67	Неоднородный
д. Федяково	9,022	1,444	1,678	Однородный

Большинство рядов максимальной толщины льда однородны. По отношению к среднему большинство значений приближены к нему, кроме следующих створов: г. Котлас, д. Звоз, д. Каликино и г. Великий Устюг.

Критерий Стьюдента основан на оценке гипотезе об однородности рядов наблюдений по среднему значению. По полученным результатам 20 из 30 рядов опровергают нулевую гипотезу, а значит являются неоднородными, что говорит о повышенных (для рядов температуры воды и максимальной толщины льда) или пониженных (для рядов продолжительности ледостава) значениях в сравнении с математическим ожиданием.



### 3.3.3 Оценка гипотез об однородности по критерию Фишера

Нулевая гипотеза для критерия Фишера:

$$H_0: D_{x1} = D_{x2} \quad (3.17)$$

Статистика  $F$ , называемая дисперсионным отношением или критерием Фишера, высчитывается по формуле 3.18:

$$F^* = \frac{D_1}{D_2} \quad (3.18)$$

В числителе формулы 3.18 всегда берется большее значение.

С помощью таблиц ординат значений распределения  $F$  при различном числе степеней свободы:

$$v = n - 1 \quad (3.19)$$

и разных уровнях значимости  $\alpha$  может быть определено критическое для данной нулевой гипотезы (3.17) значение  $F$ . Если  $F^* < F$ , то гипотеза не опровергается и ряд можно считать однородным [11].

В таблицах 3.15-3.17 представлены расчеты критерия Фишера для рядов температуры воды, продолжительности ледостава и максимальной толщине льда, и сделан вывод об однородности рядов при оценке по этому критерию.

Таблица 3.15 Расчет критерия Фишера для рядов температуры воды.

Ряд	Д	F*	F	Однородность ряда
г. Котлас	1,06	1,25	1,578	Однородный
	1,32			
д. Абрамково	1,37	1,13	1,574	Однородный
	1,21			
д. Нижняя Тойма	1,61	1,53	1,574	Однородный
	1,05			
д. Сидоровская	1,18	1,52	1,574	Однородный
	0,78			
р. п. Березник	1,09	1,24	1,578	Однородный
	1,35			
д. Звоз	1,27	1,06	1,574	Однородный
	1,19			
с. Усть-Пинега	1,64	1,19	1,574	Однородный
	1,38			
д. Каликино	1,46	1,59	1,578	Неоднородный
	2,32			
г. Великий Устюг	1,73	1,12	1,578	Однородный
	1,93			
д. Федяково	1,57	1,09	1,649	Однородный
	1,71			

Ряды температуры воды по критерию Фишера в своем большинстве не опровергают гипотезу и считаются однородными, кроме створа д. Каликино, который является неоднородным, с значениями превышающими среднее на 2-4°. Для остальных створов значения не значительно превосходят математическое ожидание.

Таблица 3.16 Расчет критерия Фишера для рядов продолжительности ледостава.

Ряд	Д	F*	F	Однородность ряда
г. Котлас	280,92	1,04	1,531	Однородный
	271,35			
д. Абрамково	200,51	1,04	1,531	Однородный
	193,57			
д. Нижняя Тойма	208,74	1,29	1,531	Однородный
	269,47			
д. Сидоровская	231,71	1,04	1,59	Однородный
	241,85			
р. п. Березник	246,64	1,10	1,59	Однородный
	272,05			
д. Звоз	220,06	1,06	1,59	Однородный
	232,91			
с. Усть-Пинега	236,03	1,04	1,531	Однородный
	244,41			
д. Каликино	237,74	1,26	1,582	Однородный
	188,97			
г. Великий Устюг	354,58	1,34	1,582	Однородный
	264,31			
д. Федяково	196,46	1,72	1,666	Неоднородный
	338,18			

Только створ д. Федяково является неоднородным по критерию Фишера из всех рядов продолжительности ледостава. Значения у этого ряда превосходят среднее на 20-25 дней, т.е. рассеивание относительно математического ожидания довольно большое.

Таблица 3.17 Расчет критерия Фишера для рядов максимальной толщины льда.

Ряд	Д	F*	F	Однородность ряда
г. Котлас	158,37	2,56	1,593	Неоднородный
	61,96			
д. Абрамково	99,35	1,51	1,593	Однородный
	149,93			
д. Нижняя Тойма	88,09	1,54	1,593	Однородный
	136,00			
д. Сидоровская	175,64	1,75	1,593	Неоднородный
	307,51			
р. п. Березник	81,62	2,52	1,593	Неоднородный
	205,92			
д. Звоз	97,43	1,41	1,593	Однородный
	137,54			
с. Усть-Пинега	39,14	1,95	1,593	Неоднородный
	76,45			
д. Каликино	303,97	1,85	1,582	Неоднородный
	164,16			
г. Великий Устюг	173,82	2,35	1,582	Неоднородный
	73,82			
д. Федяково	97,53	1,49	1,744	Однородный
	65,26			

В рядах максимальной толщине льда по критерию Фишера преобладает неоднородность: для 6 из 10 створов нулевая гипотеза опровергается. А значит для значений створов д. Абрамково, д. Сидоровская, д. Звоз и д. Федяково возможные отклонения от математического ожидания не столько велики.

Критерий Фишера основан на оценке гипотезы об однородности по дисперсии, что говорит об рассеивании значений относительно математического ожидания. 22 из 30 рядов не опровергают нулевую гипотезу и считаются однородными за весь период наблюдений.

Результаты проверки однородности рядов наблюдений по температуре воды, продолжительности ледостава и максимальной толщине льда представлены в таблице 3.18. Однородным считается тот ряд, для которого по обоим критериям (Стьюдента и Фишера) нулевые гипотезы не опровергаются.

Таблица 3.18 Оценка однородности исходных рядов.

Створ	Температура воды	Продолжительность ледостава	Макс. толщина льда
г. Котлас	Однородный	Неоднородный	Неоднородный
д. Абрамково	Неоднородный	Неоднородный	Однородный
д. Нижняя Тойма	Однородный	Неоднородный	Однородный
д. Сидоровская	Однородный	Неоднородный	Неоднородный
р. п. Березник	Неоднородный	Неоднородный	Неоднородный
д. Звоз	Неоднородный	Неоднородный	Неоднородный
с. Усть-Пинега	Однородный	Неоднородный	Неоднородный
д. Каликино	Неоднородный	Неоднородный	Неоднородный
г. Великий Устюг	Неоднородный	Неоднородный	Неоднородный
д. Федяково	Неоднородный	Неоднородный	Однородный

Расчеты показали, что для 77% рядов наблюдений гипотеза однородности опровергается, что говорит о климатических периодах с заметным потеплением или отсутствием изменений вообще. Из таблицы 3.18 видно, что однородными являются ряды: температуры воды в створах – г. Котлас, д. Нижняя Тойма, д. Сидоровская и с. Усть-Пинега; максимальной толщины льда – д. Абрамково, д. Нижняя Тойма, д. Федяково.

Если сравнивать результаты критериев и интегральные кривые, то для большинства рядов выводы об однородности совпадают. Однако ряды температуры воды в д. Нижняя Тойма и максимальной толщины льда в д. Абрамково однородны только по критериям Стьюдента и Фишера.

Неоднородность большинства рядов и показывает, что изменение климата происходило, но не в течение всего периода наблюдений (1950-2016 гг.), а за более короткие промежутки с перерывами отсутствия изменений. Наиболее ярко выражено потепление в начале 80-х годов.

Примером такого изменения может служить рисунок 3.15, на котором приведены отдельные тренды для температуры воды д. Абрамково (подобные

тренды можно построить для всех рядов наблюдений, но именно у данного ряда нет пропусков в значениях, а также он является нестационарным и неоднородным).

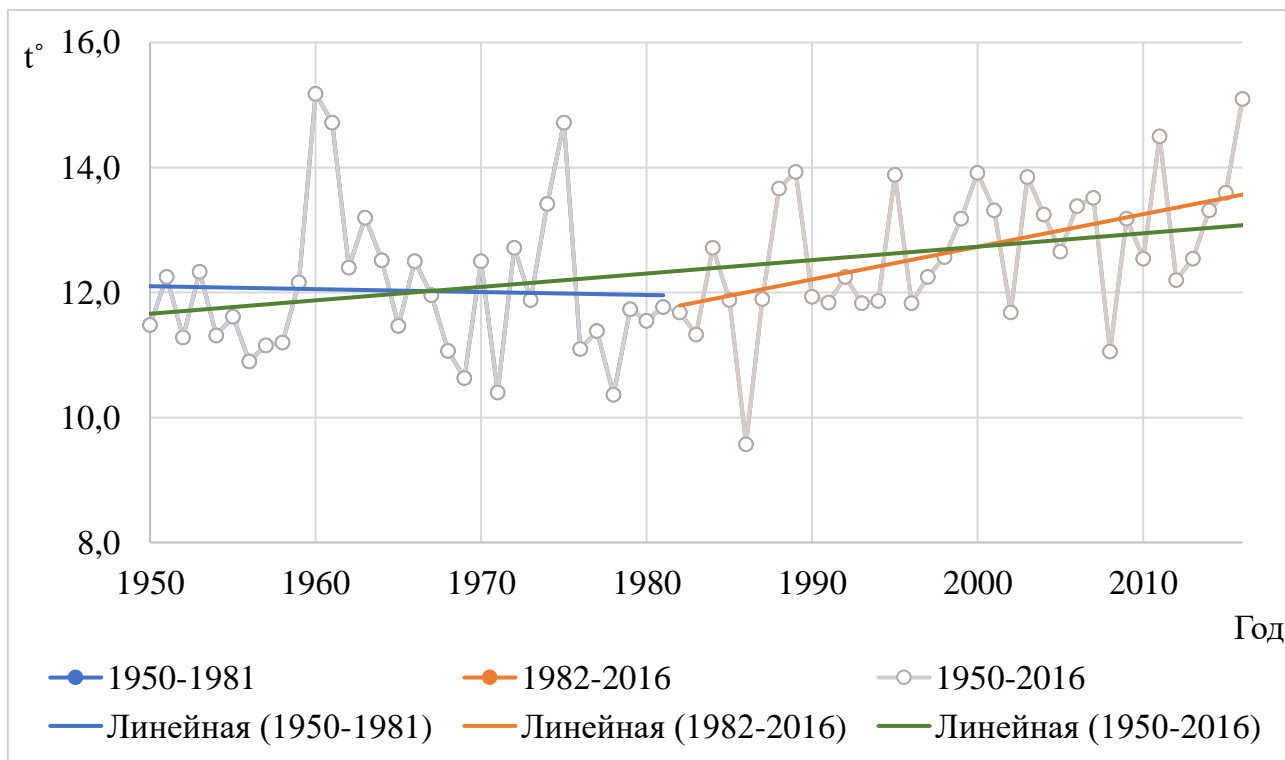


Рисунок 3.15 Тренды за различные периоды наблюдений температуры воды – р. Северная Двина – д. Абрамково.

На рисунке 3.15 показаны тренды для периодов: 1950-1981, 1982-2016 и их общий с 1950 по 2016 гг. До 1981 года тренд скорее шел на понижение, т.е. уменьшение температуры воды, а уже с 1982 года - на увеличение.

Такое разделение тренда показывает, в какой период начала возрастать температура воды, а именно с начала 80-х, что соответствует данным по изменению климата, приведенным ранее.

## Заключение

В выпускной квалификационной работе были рассмотрены изменения климата на примере бассейна реки Северная Двина. Анализ данных по температуре воды и продолжительности ледостава выявил неоднородность климатических изменений за многолетний период наблюдений, что соответствует интервалам, упомянутым Груза Г.В. и Раньковой Э.Я: легкое похолодание 1946-1975 гг. и заметное потепление 1976-2016 гг.

Река Северная Двина, расположенная в Европейской части России, является примером естественного изменения гидрологического режима, вызванного потеплением климата, поскольку здесь отсутствуют крупные города с промышленными объектами и сбросами сточных вод.

На всей протяженности реки значения средней температуры воды за период наблюдений повышаются примерно на 1-2°, а особенно заметно ее увеличение с 1980-х годов. Тип термического режима реки не изменился, но в ближайшем будущем при развитии такой тенденции может смениться подтип, и тогда река будет относиться к подтипу *II б*, где разница между температурой воздуха и воды будет отрицательна только в апреле. Продолжительность ледостава уменьшилась в среднем на 25 дней, за счет более позднего начала замерзания рек и их более раннего вскрытия.

Выполненные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. Анализ основных числовых характеристик исходных рядов наблюдений показал, что все ряды обладают низкой вариативностью. Положительная асимметрия наблюдается у температуры воды и максимальной толщины льда, а отрицательная - у продолжительности ледостава.

2. Тренд является хорошим показателем динамики изменения процессов. По данным температуры воды большинство рядов имеют тренды на повышение, по продолжительности ледостава у всех рядов тренды понижаются, только у рядов максимальной толщины льда картина неоднозначная (тренда либо нет, либо несущественное понижение).

Оценка стационарности исходных рядов наблюдений показала, что 83,3% рассматриваемых значений являются нестационарными, а значит, имеют тенденцию к изменению во времени.

3. Интегральные кривые являются достоверным методом проверки как пространственных, так и временных изменений. Для рядов температуры воды интегральные кривые изменяются незначительно за весь период наблюдений. Ряды продолжительности ледостава со второй половины интегральных кривых идут на понижение. А вот значения максимальной толщины льда не имеют столь однозначной направленности, для некоторых створов перегибы практически отсутствуют, а для некоторых идут на повышение.

Оценка однородности показала, что для 77% рядов наблюдений гипотеза однородности опровергается, что говорит о различных периодах изменения климата: заметном потеплении или отсутствии изменений вообще. Если сравнивать результаты критериев и интегральные кривые, то для большинства рядов выводы об однородности совпадают.

Таким образом, изменение климата прослеживается в бассейне реки Северная Двина. Как показали оценки исходных рядов, практически все значения меняются во времени и у большинства отмечаются изменения, обусловленные заметным потеплением климата, которое началось в 1980-х годах.

Наиболее показательные ряды наблюдений – средняя температура воды за период открытого русла и продолжительность ледостава:

- Изменение температуры воды является прямым следствием потепления климата, которое оценивается по приповерхностной температуре. Только колебания температуры воды более сглаженные и происходят с опозданием во времени. Так, годом начала интенсивного потепления атмосферного воздуха считается 1976, а увеличение температуры воды стало происходить только в начале 1980-х годов.



- Потепление на территории России происходит наиболее заметно в зимний сезон, а также при переходах с осени и на весну. Это является причиной переносов сроков ледообразования на более поздние даты и ледоразрушения на более ранние даты. За счет этих сокращений и происходит уменьшение продолжительности ледостава.

Ряды по максимальной толщине льда не показывают столь успешно изменение в климате, что может быть связано со следующими причинами:

- Максимальная толщина льда является разовой величиной за период замерзания реки, зависящая только от погодных условий в определенный год, когда могут быть как мягкие многоснежные зимы, так и суровые малоснежные. Изменение климата не так велико, чтобы уменьшить число аномально холодных и теплых зим.

- Неодновременное установление ледостава на р. Северная Двина или замерзание воды, сопровождающееся торошением и подсовами льда, приводит к неодинаковой толщине льда на разных участках реки. В течение зимы различия в мощности льда могут и сгладиться, но к этому моменту максимальное значение уже будет зафиксировано.

При продолжении работы с темой изменения климата на примере бассейна реки Северная Двина необходимо вместо максимальной толщины льда взять средние значения, которые будут более наглядны.

## Список использованных источников

- 1 Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха // Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2012. – 194 с.
- 2 Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления. Ретроспективный анализ и сценарии. М.: ГЕОС, 2010. - 220 с.
- 3 Сумачев А. Э. Изменение климата и его влияние на гидрологический режим Северной Двины // Труды II Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». – 2018. – С. 609-612.
- 4 Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Гидрологические последствия изменений климата: Труды Британско-Российской конференции / Изд-во ООО «Пять плюс», г. Барнаул. – 2009. – С. 143-151.
- 5 Доклад об особенностях климата территории Российской Федерации за 2018 год. – Москва, 2019. – 79 стр.
- 6 Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край // Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 663 с.
- 7 Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Архангельской области за 2017 год // Министерство природных ресурсов и лесопромышленного комплекса Архангельской области. – 2018. – С. 45-48.
- 8 Душкова Д. О., Евсеев А. В. Анализ техногенного воздействия на геосистемы Европейского Севера России // Арктика и Север. – 2011. – №. 4.
- 9 Соколова Е. М. Термический режим рек СССР // Тр. ГГИ. – 1951. – №. 30. – С. 84.
- 10 Шелутко В. А. Численные методы в гидрологии // Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 238 с.
- 11 Шелутко В. А. Методы обработки и анализа гидрологической информации: Учебно-метод. пособие // СПб, 2007. – 192 с.

12 Урусова Е. С. Оценка загрязненности реки Охта в пределах Санкт-Петербурга на основе применения интегральных кривых // Общество. Среда. Развитие. – 2015, №4. – С. 171-175.

## Приложения

### Исходные данные

Таблица А.1. Исходные ряды средних значений температуры воды за период открытого русла с 1950 по 2016 гг.

Год	г. Котлас, °С	д. Абрамково, °С	д. Нижняя Тойма, °С	д. Сидоровская, °С	р.п. Березник, °С	д. Звоз, °С	с. Усть-Пинега, °С	д. Каликино, °С	г. Великий Устюг, °С	д. Федяково, °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1950	11,8	11,5	11,1	11,5	11,5	11,8	11,0	11,4	10,7	-
1951	12,4	12,3	10,6	12,2	11,8	12,2	11,6	10,9	11,4	-
1952	11,5	11,3	10,8	10,9	10,9	11,2	9,7	10,7	11,9	-
1953	10,7	12,3	11,9	12,2	11,7	12,2	11,3	12,7	13,2	-
1954	13,3	11,3	10,8	12,8	12,8	13,0	12,0	13,5	14,0	-
1955	12,0	11,6	11,2	11,3	11,1	11,4	10,9	11,7	12,2	-
1956	11,3	10,9	11,5	10,6	10,3	10,7	8,5	12,9	11,4	-
1957	13,4	11,2	10,7	12,5	10,7	12,8	11,6	12,7	13,3	-
1958	11,6	11,2	10,3	10,8	9,5	11,0	8,8	11,6	11,7	-
1959	12,4	12,2	15,5	13,7	11,8	11,9	10,8	10,7	11,0	-
1960	15,3	15,2	14,5	14,7	14,8	15,1	12,0	13,3	13,8	-
1961	13,3	14,7	14,1	14,3	12,5	14,6	13,4	13,1	11,8	6,6
1962	12,6	12,4	11,6	11,8	10,3	10,4	11,1	12,4	11,1	11,5
1963	13,7	13,2	12,6	12,8	12,7	12,9	12,1	11,8	12,2	12,3
1964	13,0	12,5	11,7	11,9	12,1	12,2	12,7	13,2	13,6	11,0
1965	11,5	11,5	10,9	11,0	11,4	11,2	10,2	11,6	12,2	10,2
1966	-	12,5	-	-	-	-	10,4	12,9	-	11,2
1967	-	12,0	-	-	-	-	10,7	12,3	-	11,0
1968	-	11,1	-	-	-	-	10,7	11,6	-	9,1
1969	-	10,6	-	-	-	-	9,2	9,9	-	8,6
1970	13,1	12,5	12,1	12,2	12,5	12,6	11,4	13,1	13,4	10,6
1971	11,1	10,4	9,7	9,9	10,4	10,3	9,0	11,5	11,7	9,1
1972	13,2	12,7	12,2	12,2	12,3	12,6	11,5	13,5	13,7	11,2
1973	12,2	11,9	11,6	11,6	11,4	11,9	10,9	11,1	11,1	10,8
1974	13,6	13,4	13,2	13,1	12,5	13,2	12,5	13,6	13,6	12,7
1975	13,2	14,7	14,3	14,2	12,3	12,6	11,5	13,7	16,1	11,8
1976	11,5	11,1	12,6	12,7	12,1	12,7	13,1	11,2	13,4	10,4
1977	11,5	11,4	12,6	12,8	10,3	10,9	13,8	11,4	11,5	10,8
1978	10,8	10,4	9,9	10,1	10,0	10,3	10,9	8,8	9,3	9,5
1979	12,2	11,7	11,0	11,3	11,1	11,5	10,6	12,1	12,4	10,5
1980	11,9	11,6	11,3	11,5	11,4	11,7	11,3	11,9	12,2	10,7
1981	12,2	11,8	11,4	11,4	11,2	11,6	10,4	13,9	14,5	11,4
1982	10,3	11,7	11,1	11,3	9,8	9,9	9,2	10,5	10,9	10,7
1983	12,1	11,3	10,8	10,8	11,3	11,3	10,2	12,4	12,6	10,3
1984	13,2	12,7	12,1	12,3	11,1	12,9	11,5	12,9	13,4	11,7
1985	12,3	11,9	11,6	11,8	12,0	12,0	11,3	11,8	12,2	11,0

Окончание таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1986	10,0	9,6	10,6	10,5	9,8	9,7	8,9	10,1	9,6	9,9
1987	12,4	11,9	11,2	11,4	11,4	11,4	10,4	11,4	11,8	10,8
1988	14,4	13,7	13,1	13,3	13,4	13,2	12,3	13,7	14,0	12,3
1989	12,5	13,9	13,3	13,4	11,8	13,6	11,1	12,3	12,1	12,4
1990	12,1	11,9	11,5	11,6	11,7	11,7	10,9	10,9	10,8	10,7
1991	12,3	11,8	13,4	11,5	11,4	11,6	10,9	12,2	14,2	12,8
1992	12,9	12,3	11,6	11,7	12,1	12,0	11,4	13,1	13,5	12,9
1993	12,3	11,8	11,2	11,3	11,4	11,4	10,6	11,7	12,2	10,7
1994	12,0	11,9	11,5	11,7	11,7	11,8	11,3	12,1	12,1	10,5
1995	12,6	13,9	13,2	13,4	13,3	13,5	12,7	14,6	14,5	12,5
1996	11,7	11,8	11,1	9,9	10,0	11,6	9,7	10,4	10,7	10,5
1997	12,4	12,3	11,7	12,0	12,3	12,2	11,6	10,6	12,6	11,0
1998	12,6	12,6	11,9	12,2	12,4	12,4	11,7	13,0	14,0	10,8
1999	13,5	13,2	12,4	12,8	13,2	13,1	12,2	13,8	14,3	11,4
2000	14,2	13,9	13,3	11,8	13,8	13,8	11,6	14,4	14,2	14,3
2001	11,3	13,3	12,7	12,9	12,8	13,0	10,8	13,8	14,2	12,5
2002	12,3	11,7	10,9	11,0	11,6	11,5	10,8	12,8	12,6	12,4
2003	13,6	13,9	11,0	11,4	11,6	13,7	10,2	12,2	12,7	12,8
2004	13,3	13,3	12,7	11,1	11,4	13,3	10,2	13,6	14,0	11,9
2005	12,5	12,7	11,9	12,1	10,8	12,4	10,8	12,8	13,0	11,3
2006	11,7	13,4	12,5	12,8	12,7	13,1	11,8	14,2	14,2	8,9
2007	11,9	13,5	10,8	12,8	13,8	13,4	12,1	14,3	14,5	12,1
2008	11,4	11,1	10,4	10,3	10,6	10,4	9,3	11,5	11,6	10,1
2009	13,4	13,2	12,3	12,3	10,9	12,7	11,0	14,8	14,3	11,6
2010	12,5	12,5	11,8	12,0	12,0	12,3	11,6	14,9	13,3	11,2
2011	14,6	14,5	14,0	12,1	12,1	14,1	13,5	14,8	15,1	13,5
2012	12,3	12,2	11,5	11,8	11,6	11,7	11,0	12,4	12,7	12,8
2013	12,6	12,5	11,8	12,0	12,1	12,1	11,4	13,0	13,3	-
2014	15,7	13,3	12,9	12,8	14,7	13,2	14,3	16,4	16,6	14,4
2015	13,8	13,6	13,1	13,1	12,8	13,4	12,4	14,4	14,5	12,3
2016	15,3	15,1	14,5	12,8	14,7	14,9	14,0	15,6	13,9	14,0

Таблица А.2 Исходные ряды продолжительности ледостава с 1936 по 2015

гг.

Года	г. Котлас, дни	д. Абрамково, дни	д. Нижняя Тойма, дни	с. Усть- Пинега, дни
1	2	3	4	5
1936-1937	106	129	134	142
1937-1938	153	156	158	162
1938-1939	158	161	167	177
1939-1940	130	134	151	161
1940-1941	186	189	191	199
1941-1942	162	147	165	180
1942-1943	146	148	148	157
1943-1944	150	149	146	172
1944-1945	169	171	172	182
1945-1946	166	172	176	186
1946-1947	185	130	185	191
1947-1948	144	142	145	157
1948-1949	129	141	144	145
1949-1950	143	146	140	143
1950-1951	149	151	154	158
1951-1952	171	171	173	179
1952-1953	151	146	156	171
1953-1954	151	155	166	176
1954-1955	144	149	151	159
1955-1956	162	165	166	175
1956-1957	176	171	174	181
1957-1958	151	155	157	165
1958-1959	146	150	153	154
1959-1960	177	158	179	182
1960-1961	187	176	191	198
1961-1962	142	144	146	151
1962-1963	139	141	141	145
1963-1964	145	158	169	175
1964-1965	155	159	167	169
1965-1966	151	148	140	167
1966-1967	162	134	151	147
1967-1968	131	139	139	160
1968-1969	144	163	166	186
1969-1970	160	123	163	176
1970-1971	176	153	159	176
1971-1972	153	155	158	189
1972-1973	159	159	159	164
1973-1974	150	160	163	189
1974-1975	150	147	149	161
1975-1976	172	175	179	184
1976-1977	170	172	176	178

Окончание таблицы А.2

1	2	3	4	5
1977-1978	121	134	127	143
1978-1979	147	151	147	161
1979-1980	145	138	140	178
1980-1981	175	167	170	181
1981-1982	133	138	139	154
1982-1983	100	146	149	172
1983-1984	141	151	148	158
1984-1985	144	151	148	170
1985-1986	133	133	136	175
1986-1987	130	136	136	151
1987-1988	143	157	156	168
1988-1989	156	162	161	176
1989-1990	135	132	123	136
1990-1991	139	150	147	153
1991-1992	135	127	127	140
1992-1993	158	172	168	180
1993-1994	155	155	153	158
1994-1995	155	153	164	157
1995-1996	155	161	161	170
1996-1997	107	113	118	124
1997-1998	168	160	169	168
1998-1999	144	147	154	155
1999-2000	154	156	153	156
2000-2001	142	140	151	149
2001-2002	139	144	157	154
2002-2003	148	141	155	160
2003-2004	121	142	147	140
2004-2005	140	139	141	149
2005-2006	130	131	134	132
2006-2007	131	145	149	157
2007-2008	139	147	145	156
2008-2009	122	127	100	128
2009-2010	109	120	130	157
2010-2011	136	143	142	140
2011-2012	162	137	155	161
2012-2013	136	132	143	137
2013-2014	131	126	127	136
2014-2015	147	162	180	183

Таблица А.3 Исходные ряды продолжительности ледостава с 1950 по 2015

гг.

Года	д. Сидоровская, дни	р.п. Березник, дни	д. Звоз, дни	д. Каликино, дни	г. Великий Устюг, дни	д. Федяково, дни
1	2	3	4	5	6	7
1950-1951	152	152	157	152	183	-
1951-1952	174	173	178	171	173	-
1952-1953	144	150	167	145	151	-
1953-1954	177	171	180	149	152	-
1954-1955	160	153	157	151	153	-
1955-1956	166	166	170	160	163	-
1956-1957	177	176	179	171	204	-
1957-1958	159	159	161	151	152	-
1958-1959	148	153	153	146	152	-
1959-1960	180	181	179	177	177	-
1960-1961	191	193	195	187	189	-
1961-1962	145	167	150	142	143	148
1962-1963	139	141	147	138	138	146
1963-1964	155	160	170	147	155	170
1964-1965	157	156	159	155	166	163
1965-1966	145	143	146	150	147	160
1966-1967	130	133	148	147	162	147
1967-1968	136	135	140	135	140	152
1968-1969	173	174	177	176	176	185
1969-1970	148	158	172	123	160	180
1970-1971	162	128	180	165	167	174
1971-1972	152	165	176	152	151	182
1972-1973	152	158	160	158	160	162
1973-1974	168	176	183	183	189	167
1974-1975	149	149	150	145	150	160
1975-1976	146	173	176	173	176	178
1976-1977	165	168	174	172	170	184
1977-1978	136	133	141	137	130	135
1978-1979	161	146	145	151	151	155
1979-1980	172	170	169	173	172	177
1980-1981	165	171	179	167	136	184
1981-1982	130	144	144	141	114	159
1982-1983	117	118	124	109	115	192
1983-1984	149	152	156	153	144	167
1984-1985	156	158	159	151	138	174
1985-1986	138	145	151	147	141	173
1986-1987	145	142	146	142	139	164
1987-1988	154	135	156	145	157	171
1988-1989	155	163	168	153	111	174



Окончание таблицы А.3

1989-1990	126	128	130	127	130	145
1990-1991	149	150	154	136	149	155
1991-1992	130	136	135	122	129	148
1992-1993	176	176	180	176	180	179
1993-1994	163	161	165	149	151	170
1994-1995	154	158	163	147	137	160
1995-1996	181	171	175	139	159	175
1996-1997	119	117	120	125	129	129
1997-1998	139	169	174	144	164	173
1998-1999	155	142	157	146	151	160
1999-2000	154	154	157	156	162	146
2000-2001	150	145	151	137	145	158
2001-2002	156	157	158	144	153	156
2002-2003	156	158	159	149	164	156
2003-2004	121	135	144	120	138	163
2004-2005	144	144	147	132	138	150
2005-2006	116	128	130	123	136	134
2006-2007	142	151	154	144	106	106
2007-2008	146	140	147	139	142	157
2008-2009	131	114	135	124	125	128
2009-2010	131	121	132	116	123	134
2010-2011	143	139	149	137	144	135
2011-2012	138	152	156	150	153	158
2012-2013	141	142	142	135	136	126
2013-2014	132	131	133	131	130	132
2014-2015	156	174	175	-	-	176

Таблица А.4 Исходные ряды максимальной толщины льда с 1950 по 2016

гг.

Года	г. Котлас, см	д. Абрамково, см	д. Нижняя Тойма, см	д. Сидоровская, см	р.п. Березник, см	д. Звоз, см	с. Усть-Пинега, см	д. Каликино, см	г. Великий Устюг, см	д. Федяково, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1950-1951	-	-	-	-	-	-	-	53	74	-
1951-1952	-	-	-	-	-	-	-	59	62	-
1952-1953	72	66	67	54	75	82	58	96	80	-
1953-1954	86	68	66	89	62	72	55	80	76	-
1954-1955	79	64	62	80	89	78	68	110	89	-
1955-1956	89	70	73	92	85	72	61	93	95	-
1956-1957	95	72	64	85	74	76	61	79	92	-
1957-1958	88	66	50	64	80	60	57	75	79	-
1958-1959	58	60	70	66	66	54	63	61	61	-
1959-1960	76	73	73	72	86	77	62	68	71	-
1960-1961	59	88	71	87	74	87	66	49	80	-
1961-1962	64	76	75	69	68	60	52	55	80	-
1962-1963	85	68	63	63	63	71	56	52	81	-
1963-1964	64	62	75	61	73	55	65	67	83	-
1964-1965	83	71	66	66	65	69	60	55	98	-
1965-1966	65	63	61	73	71	61	58	46	62	-
1966-1967	79	78	82	69	79	81	79	105	120	-
1967-1968	67	64	62	64	72	75	52	72	91	-
1968-1969	83	68	90	94	85	75	69	75	72	-
1969-1970	56	64	61	80	60	55	58	59	75	57
1970-1971	82	88	86	86	78	69	64	73	87	71

Продолжение таблицы А.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1971-1972	99	81	78	81	86	65	66	86	86	88
1972-1973	55	62	62	60	57	80	48	42	70	69
1973-1974	62	65	78	65	75	76	59	52	73	59
1974-1975	56	59	49	50	59	52	51	56	56	55
1975-1976	67	59	61	32	71	69	58	50	72	70
1976-1977	71	72	73	65	72	73	68	70	83	64
1977-1978	57	73	63	67	73	59	68	52	72	57
1978-1979	69	87	69	84	79	70	65	71	91	87
1979-1980	66	90	62	64	80	79	56	79	77	80
1980-1981	64	68	78	65	70	67	63	73	77	72
1981-1982	65	59	60	74	62	53	60	57	75	72
1982-1983	55	44	57	67	58	58	60	42	52	49
1983-1984	60	73	66	58	62	55	59	51	78	66
1984-1985	70	73	61	73	75	80	81	66	57	74
1985-1986	51	68	64	52	57	78	55	62	52	68
1986-1987	68	67	83	68	92	62	63	71	62	76
1987-1988	57	69	66	63	80	61	55	52	66	72
1988-1989	55	70	55	73	72	68	61	53	50	64
1989-1990	52	68	59	60	72	65	59	62	53	61
1990-1991	50	65	60	61	62	63	61	50	60	67
1991-1992	69	50	57	54	58	58	54	63	53	56
1992-1993	61	81	63	66	73	65	60	71	53	72
1993-1994	64	100	71	105	72	60	62	83	81	77
1994-1995	53	75	94	66	70	73	63	63	65	73

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1995-1996	76	61	58	68	62	58	56	57	74	62
1996-1997	62	70	68	63	60	60	60	59	64	64
1997-1998	73	83	74	112	80	80	73	94	68	66
1998-1999	58	50	77	81	95	73	67	77	69	61
1999-2000	67	77	79	82	80	57	63	65	62	65
2000-2001	56	81	80	81	80	66	63	63	66	58
2001-2002	73	94	94	123	113	68	62	79	60	67
2002-2003	69	94	92	95	98	55	79	57	59	52
2003-2004	51	57	58	58	56	53	59	34	58	55
2004-2005	61	72	81	86	69	60	54	62	58	59
2005-2006	63	65	62	58	71	52	50	44	54	56
2006-2007	57	52	68	58	48	44	60	71	49	66
2007-2008	66	60	74	76	63	56	50	34	54	66
2008-2009	75	69	59	74	70	30	64	52	50	75
2009-2010	68	66	60	74	66	41	61	52	57	70
2010-2011	74	75	61	76	71	71	65	56	73	68
2011-2012	73	78	74	68	53	45	49	54	69	74
2012-2013	70	81	80	92	74	73	43	58	64	66
2013-2014	70	52	51	62	55	47	40	43	48	43
2014-2015	63	66	60	42	53	49	51	66	62	69
2015-2016	67	70	73	72	60	51	53	55	50	-

Таблица А.5 Исходные ряды среднегодовых значений температуры воздуха с 1950 по 2015 гг.

Год	г. Котлас, °С	г. Шенкурск, °С	г. Архангельск, °С	г. Великий Устюг, °С
1	2	3	4	5
1950	1,3	1,8	1,5	1,4
1951	1,6	2,0	1,4	1,8
1952	1,2	1,8	0,7	1,4
1953	1,6	2,0	1,4	1,7
1954	2,2	2,7	2,2	2,3
1955	-0,2	-0,1	-1,2	0,0
1956	0,0	0,3	-0,4	-0,1
1957	2,6	2,8	1,9	2,7
1958	0,3	0,4	-0,7	0,3
1959	2,0	2,1	1,3	1,9
1960	1,2	1,5	0,7	1,2
1961	2,5	2,9	2,2	2,5
1962	2,8	2,7	1,6	2,7
1963	0,6	0,7	-0,1	0,5
1964	1,9	2,1	1,1	1,8
1965	1,2	1,3	0,1	0,9
1966	-0,1	-0,3	-1,8	-0,2
1967	3,0	3,0	2,2	2,8
1968	-0,1	0,3	-1,1	0,0
1969	-1,0	-0,3	-1,4	-0,9
1970	1,9	1,9	1,2	1,8
1971	0,3	0,3	-0,7	0,7
1972	1,8	2,3	1,8	2,1
1973	1,2	1,5	0,6	1,5
1974	3,0	3,5	2,7	3,2
1975	2,5	3,0	2,5	2,7
1976	0,2	0,5	0,1	0,2
1977	1,7	2,1	1,1	1,9
1978	-0,3	-0,4	-1,3	-0,2
1979	0,8	1,0	0,4	0,9
1980	1,0	1,3	0,3	1,2
1981	3,1	3,3	1,8	3,2
1982	1,5	1,9	0,8	0,3
1983	2,5	2,8	1,6	2,7
1984	1,8	2,4	1,6	1,7
1985	0,1	-0,3	-1,5	0,3
1986	0,7	1,0	0,5	0,8
1987	0,1	-0,1	0,0	0,4
1988	2,1	2,2	1,2	2,2
1989	3,4	3,9	3,2	3,5
1990	2,5	2,7	1,7	2,7

*Окончание Таблицы А.5*

1	2	3	4	5
1991	2,6	2,7	1,6	2,8
1992	1,6	1,9	1,3	1,8
1993	1,4	1,4	0,7	1,4
1994	1,7	1,8	1,0	1,7
1995	3,5	3,7	2,3	3,4
1996	1,7	1,9	1,4	1,7
1997	0,9	1,2	0,3	1,3
1998	0,8	1,1	-0,3	1,1
1999	1,7	2,0	0,8	2,0
2000	3,0	3,4	2,6	3,1
2001	1,6	1,7	0,9	1,8
2002	1,3	1,6	0,5	1,5
2003	2,9	3,1	2,2	2,9
2004	2,5	2,8	2,0	2,6
2005	3,5	3,7	2,8	3,4
2006	1,7	2,3	1,5	2,0
2007	3,0	3,6	2,9	3,0
2008	3,6	3,7	2,7	3,6
2009	2,3	2,7	1,5	2,4
2010	1,7	1,9	0,9	1,8
2011	2,9	3,4	2,7	2,9
2012	1,8	2,1	1,4	1,8
2013	3,2	3,5	3,0	3,4
2014	2,7	3,2	2,4	2,8
2015	3,8	4,2	3,1	3,8
2016	3,1	3,7	3,1	3,2

## Приложение Б

### Графики временной изменчивости рядов наблюдений

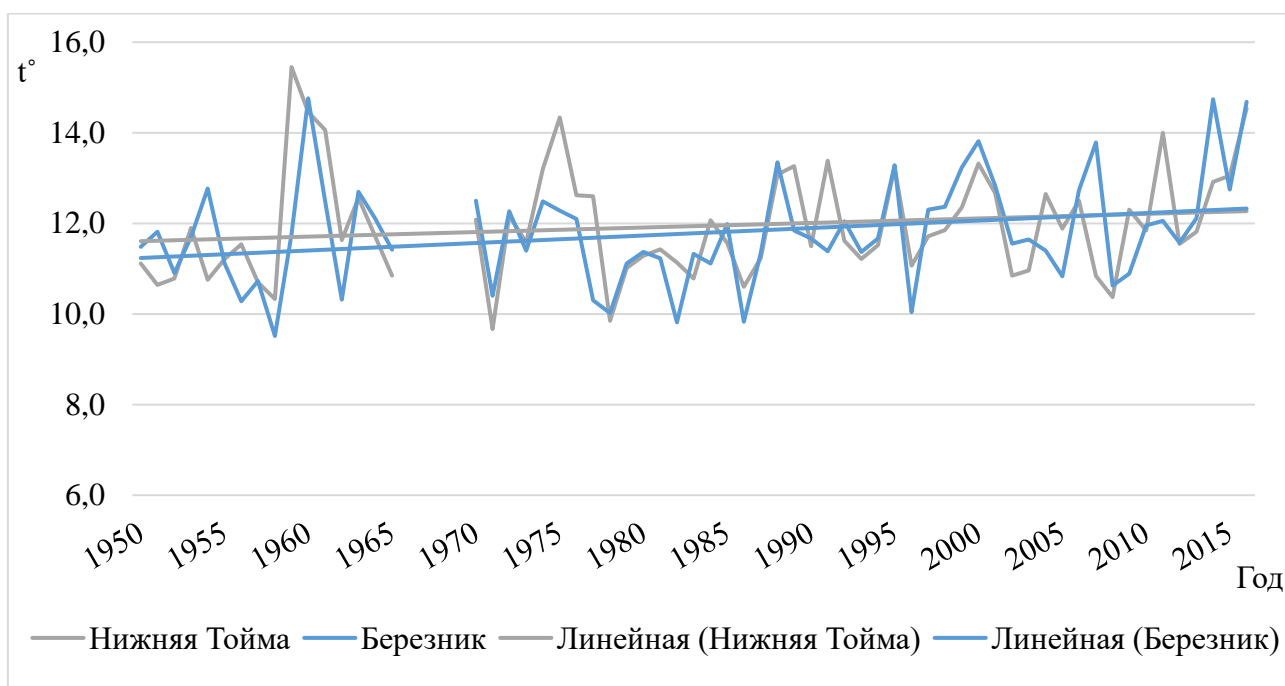


Рисунок Б.1 График временной изменчивости средних годовых температур воды с 1950 по 2016 гг. – р. Северная Двина.

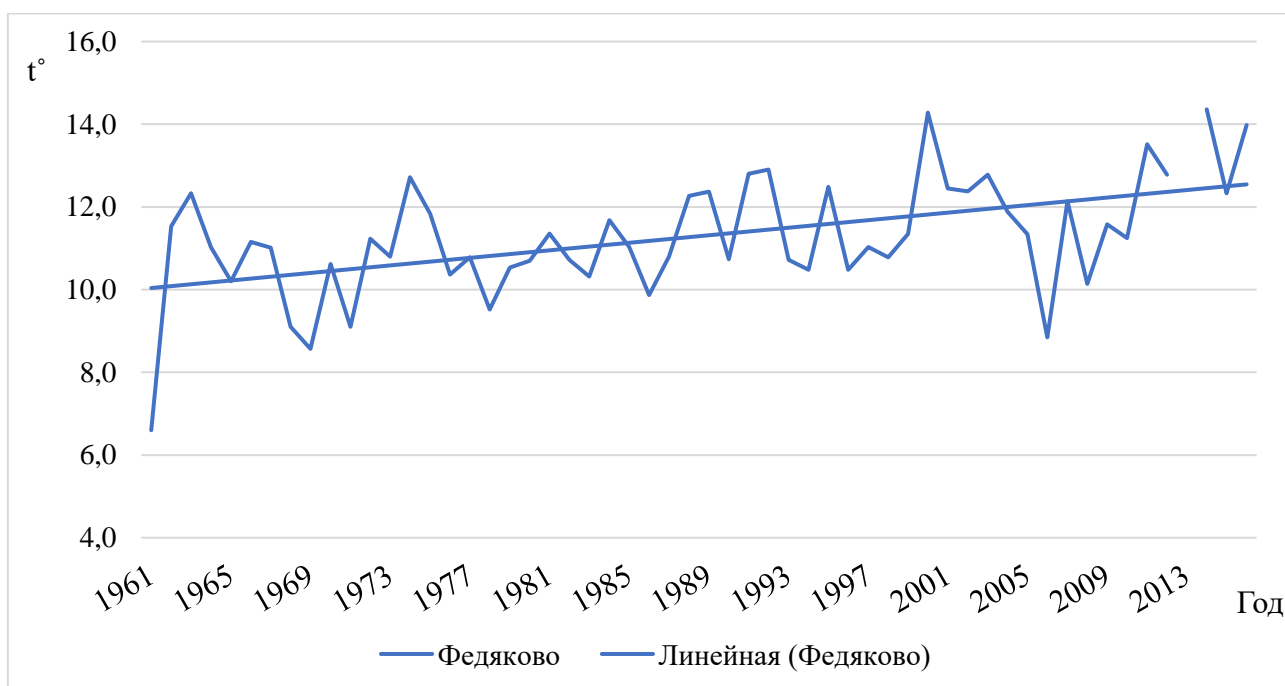


Рисунок Б.2 График временной изменчивости средних годовых температур воды с 1961 по 2016 гг. – р. Вычегда.

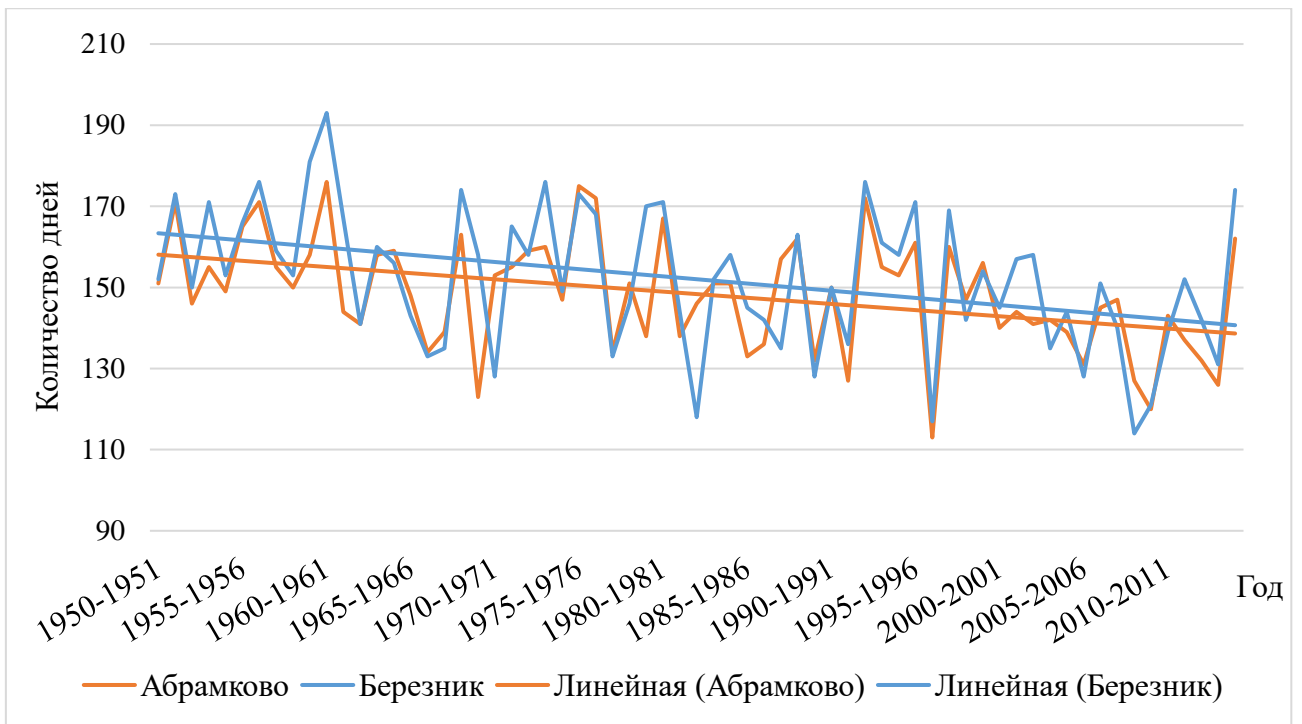


Рисунок Б.3 График временной изменчивости продолжительности ледостава с 1950 по 2016 гг. – р. Северная Двина.

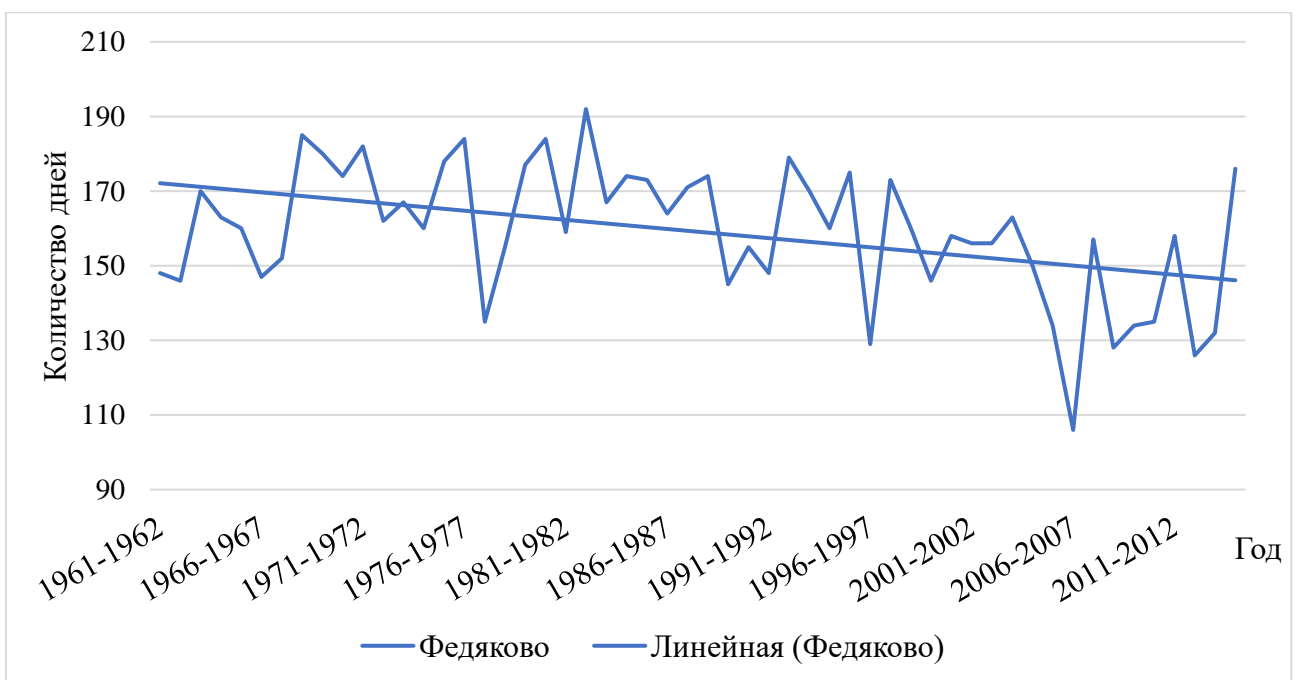


Рисунок Б.4 График временной изменчивости продолжительности ледостава с 1961 по 2015 гг. – р. Вычегда.



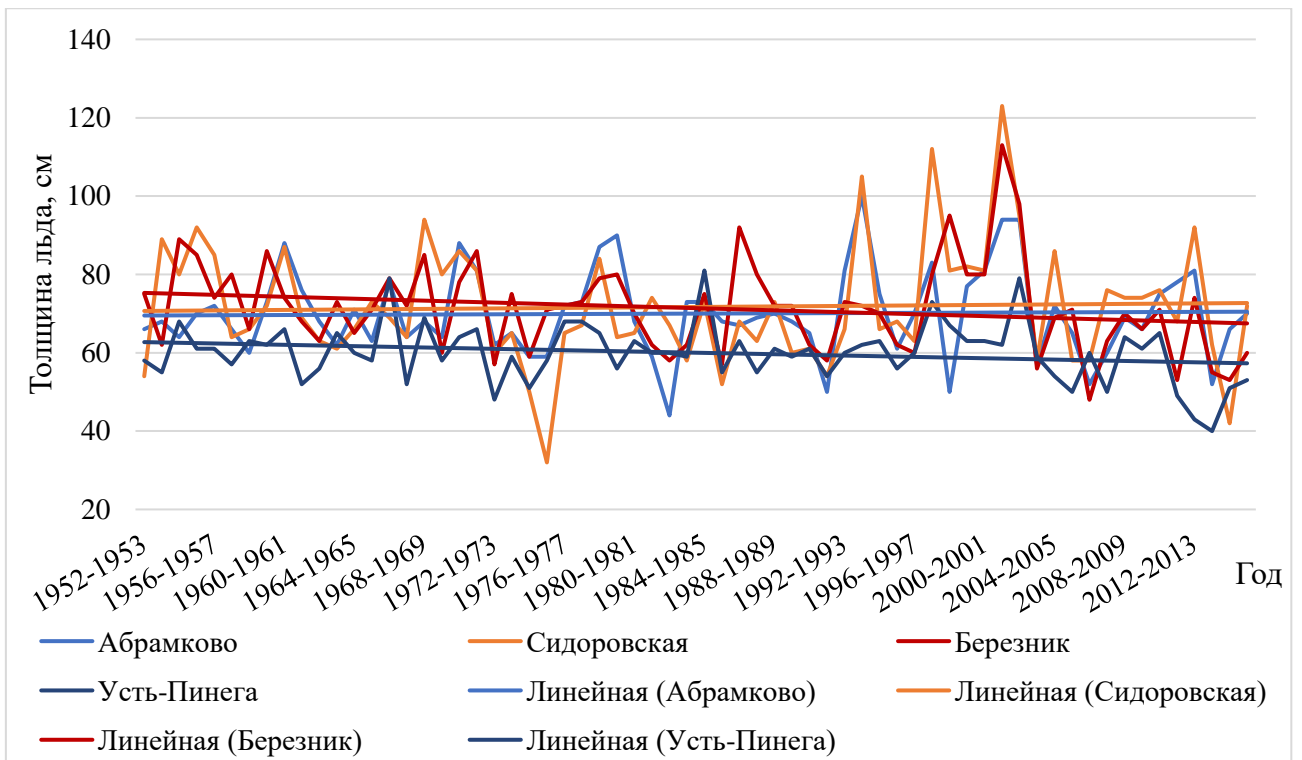


Рисунок Б.5 График временной изменчивости максимальной толщины льда с 1952 по 2016 гг. – р. Северная Двина.

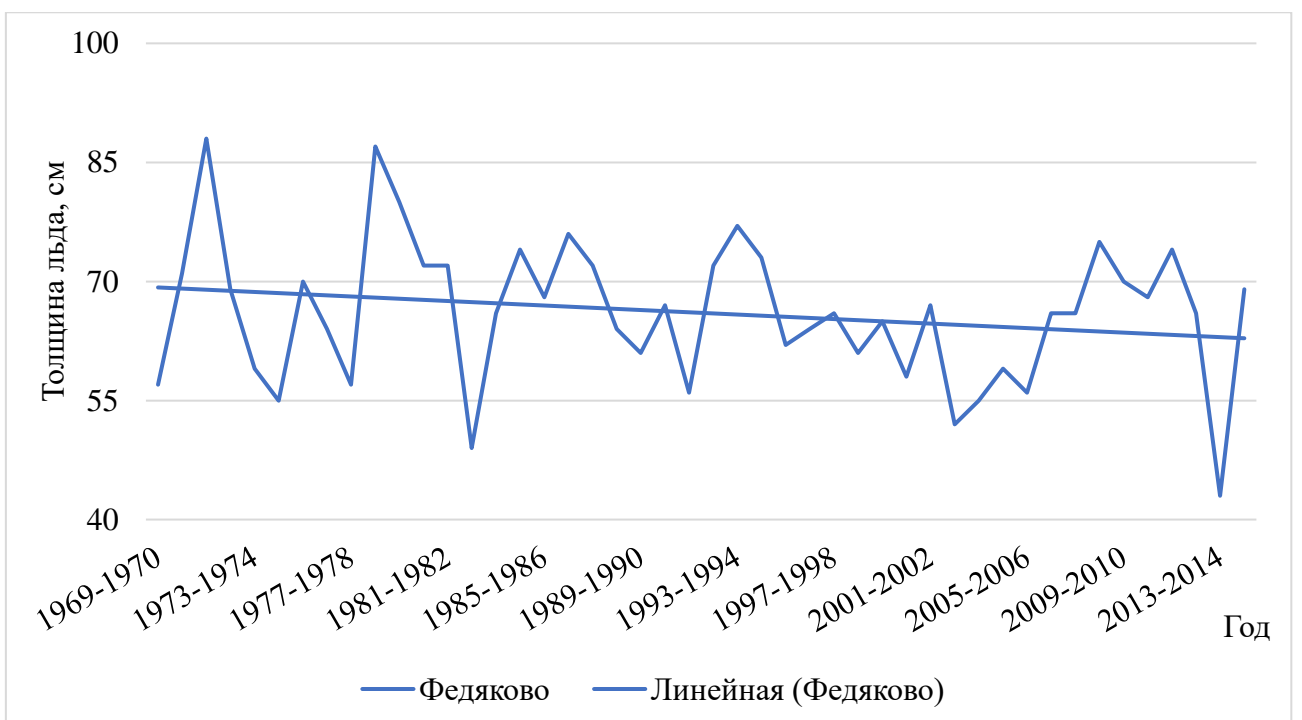


Рисунок Б.6 График временной изменчивости максимальной толщины льда с 1969 по 2015 гг. – р. Вычегда.

## Приложение В

### Интегральные кривые исходных рядов наблюдений

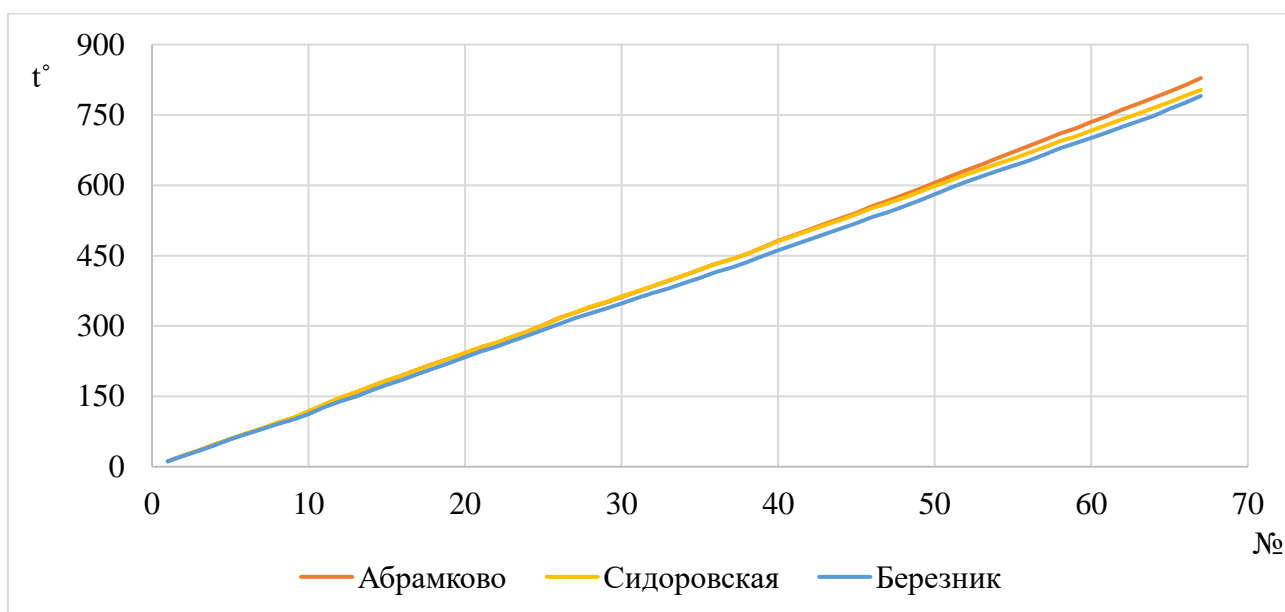


Рисунок В.1 Интегральные кривые рядов температуры воды – р. Северная Двина.

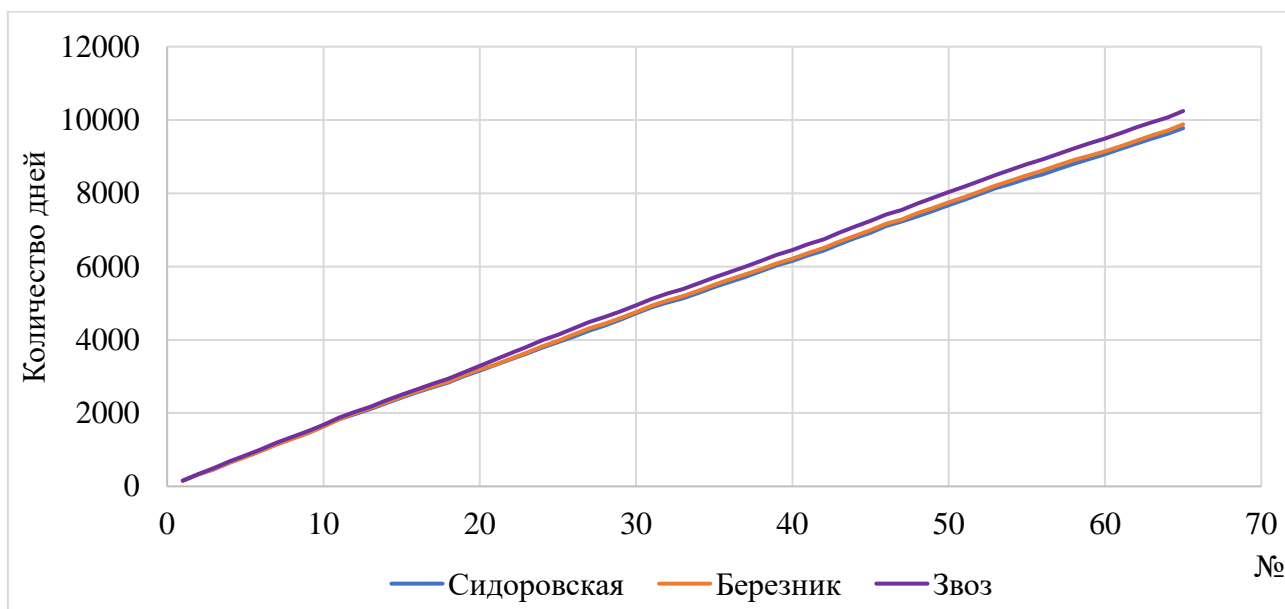


Рисунок В.2 Интегральные кривые рядов продолжительности ледостава – р. Северная Двина.

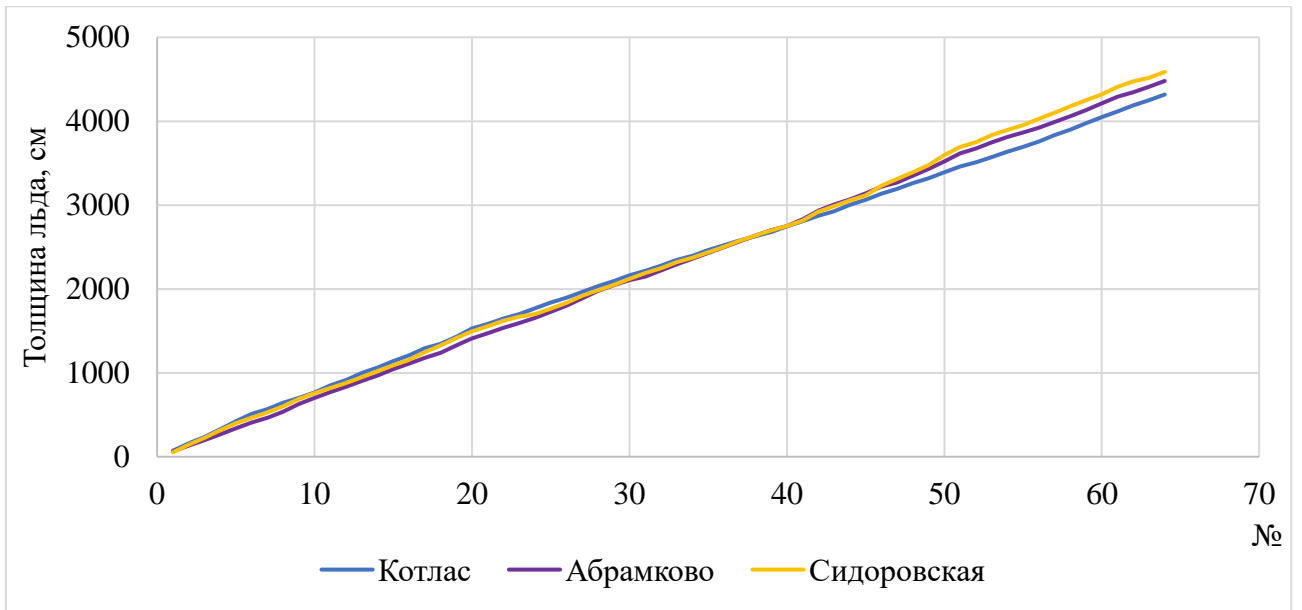


Рисунок В.3 Интегральные кривые рядов максимальной толщины льда – р.  
Северная Двина.