



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

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

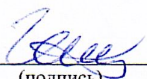
На тему **Усовершенствование методики**
прогноза максимальных
заторных уровней на р. Печора

Исполнитель Попова Анна Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Викторова Наталья Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«25» мая 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Физико-географическая характеристика района	6
1.1 Географическое положение	6
1.2 Рельеф и почвы.....	8
1.3 Растительность	11
1.4 Гидрографическая характеристика	11
1.5 Гидрологический режим	12
1.6 Ледовый режим	15
1.7 Климатическая характеристика.....	19
2 Методы прогноза наивысших уровней воды, связанных с ледовыми заторами	21
2.1 Эмпирический метод прогноза зажорных и заторных явлений.....	21
2.2 Методологические подходы к разработке методики прогноза максимального заторного уровня воды	25
2.3 Прогноз заторно-зажорных уровней воды на основе прогноза максимального расхода во время ледохода	28
2.4 Прогноз максимального заторного уровня воды на основе данных ледовой авиаразведки	30
2.5 Методика определения уровня воды выше головы затора между пунктами наблюдений	33
2.6 Методы прогноза максимальных заторных уровней на основе сетевых наблюдений.....	37
3 Разработка методики прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора в районе города Печора.....	40
3.1 Характеристика заторных участков	40
3.2 Исходные данные для методики прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора.....	44

3.3 Методика прогноза максимальных заторных уровней	47
3.4 Использование методов многомерной статистики для совершенствования методик прогнозирования	52
3.4.1 Метод k – средних.....	53
3.4.2 Метод иерархической классификации.....	66
3.4.3 Дискриминантный анализ	71
3.4.4 Факторный анализ.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	110
Приложение А. Исходные гидрометеорологические данные для разработки методики прогноза	113
Приложение Б. Исходные гидрометеорологические данные и результаты проверки методики на зависимом материале	124

ВВЕДЕНИЕ

Река Печора, являющаяся одной из крупнейших водных артерий Республики Коми, ежегодно сталкивается с проблемой ледовых заторов, которые становятся причиной подъема уровня воды превышающий опасную отметку в 700 сантиметров относительно нулевого уровня гидропоста Усть-Кожва, что приводит к выходу речных вод на пойму и затоплению хозяйственных и жилых объектов. В последние годы по наблюдениям Коми ЦГМС, отмечается увеличение частоты заторообразования в нижнем течении реки. Это приводит к регулярным подтоплениям в таких районах, как поселок Путеец, поселок Набережный, территория Кожвинской нефтебазы и других пониженных участков города Печоры. Кроме того, последствия заторов затрагивают транспортную инфраструктуру и городские коммуникации, что создает дополнительные проблемы для жизнеобеспечения населенного пункта.

Усиление заторной активности связано с изменением гидрологического режима реки и требует разработки новых подходов к прогнозированию и предотвращению паводковых ситуаций.

Цель работы – усовершенствование методики прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора.

Задачи исследования включают:

- 1) изучение физико-географических условий района исследования;
- 2) сбор исходных гидрологических и метеорологических данных, необходимых для разработки прогностической методики;
- 3) анализ условий формирования заторов на рассматриваемом участке и выбор наиболее информативных предикторов;
- 4) анализ существующих методик прогноза заторных уровней;
- 5) усовершенствование методики прогноза заторных уровней и оценка ее эффективности;

6) апробация методики на независимом материале.

Объектом исследования является река Печора, особенности формирования заторов на указанной реке и возможность успешного прогнозирования наивысших уровней.

Методической основой работы является использование физико-статистических методов анализа информации, в том числе и методы многомерного анализа.

Практическая значимость работы состоит в том, что ее результаты могут быть использованы в работе Коми ЦГМС при выпуске оперативных прогнозов, что позволит своевременно предупредить опасные явления и предотвратить ущербы.

1 Физико-географическая характеристика района

1.1 Географическое положение

Река Печора представляет собой крупнейший водный объект в регионе Русского Севера и занимает третье место по протяженности среди рек европейской части Российской Федерации. Водоток принадлежит к бассейновой системе Северного Ледовитого океана и протекает по территориям Республики Коми и Ненецкого автономного округа.

Исток реки расположен в районе Северного Урала, в непосредственной близости от природного объекта плато Маньпупунёр, в центральной части хребта Поясовый Камень. Географические координаты истока составляют 62°15' северной широты и 59°20' восточной долготы, при абсолютной высоте 676 метров над уровнем Баренцева моря.

Гидрографическая система завершается в акватории Баренцева моря, где формируется Печорская губа – залив, служащий устьем реки. Общая протяженность водного пути составляет 1814 километров, из которых 1596 километров проходит по территории Республики Коми.

В верхнем течении река характеризуется горной долиной. После соединения с рекой Усой происходит кардинальное изменение направления на западное с формированием двух значительных излучин. В данном участке ширина русла достигает 2 километров и более. В районе Усть-Цильмы происходит поворот на север, и водный объект направляется к Баренцеву морю.

Завершение гидрографического пути характеризуется формированием многорукавной дельты шириной до 45 километров в пределах Печорской губы, ширина которой варьируется от 40 до 120 километров. В районе разделения на Большую и Малую Печоры расположен остров площадью 16 на

33 километра, административно относящийся к Ненецкому автономному округу.

Территория острова находится на одном уровне с рекой, что обуславливает его затопление в период половодья. На территории острова имеются населенные пункты, сеть протоков и озер, а также участки заболоченной местности.

Водосборная площадь реки Печора охватывает 34 тысячи 571 водоток, в том числе реки и ручьи, а также свыше 60 тысяч озерных объектов. Крупнейшим притоком является река Уса протяженностью 565 километров.

Структура притоков характеризуется следующим образом: правые притоки (Илыч, Шугор, Уса) имеют горный характер и формируют основной режим питания реки, стекая с Уральского хребта. В низовьях происходит пополнение водного объекта за счет равнинных притоков (Шапкина, Колва). Левые притоки (Кожва, Ижма, Цильма) характеризуются равнинным характером течения.



Рисунок 1.1 – Географическая карта исследуемого района

1.2 Рельеф и почвы

Река Печора инициирует свой гидрологический путь в горной системе Поясового камня Уральского хребта. В начальной акватории фиксируется гористый рельеф с проявлением скальных выходов, характеризующийся наличием многочисленных порогов и перекатов при градиенте 3%. Береговая линия представлена крутыми скальными образованиями с участками узкого каньона.

В карстовой зоне междуречья Печоры и Большого Шежима выявлен комплекс спелеологических объектов, включающий пещеры, гроты и провалы, сформированные в известняковых пластах. Примечательным объектом является Шежимская пещера в окрестностях села Шежим. Отмечено

явление исчезновения водных потоков, включая реку Малый Шежим, в карстовых пустотах.

В 16 километрах выше впадения Большого Шежима на правом берегу расположен лог Иорданского с комплексом пещер (Медвежья, Ледяная, Туфовая). В районе Усть-Уньи, где происходит впадение в Печора реки Унья, наблюдается отступление скальных образований.

На отрезке от устья притока Илыч до Троицко-Печорска наблюдается асимметричное строение берегов: правый характеризуется горным рельефом, левый – пониженной высотной отметкой с аккумуляцией каменных гряд.

В акватории Троицко-Печорска река протекает в коренном берегу, ниже которого на протяжении 100 километров фиксируется низкая береговая линия.

Ниже поселка Вуктыл берега характеризуются коренными породами высотой 15 – 45 метров, непосредственно примыкающими к водной поверхности.

В районе впадения Щугора формируется берег высотой 75 –100 метров, сложенный мергелевыми плитами с каменисто-галечным составом. До Усть-Вои по высоким берегам прослеживаются выходы доломитов серого и зеленовато-серого цвета, ниже Соплекса – залежи точильного камня, разработка которых начата в XVII веке на Брусяноточильной горе.

Ниже Усть-Вои происходит трансформация береговой линии от высоких обрывистых участков к пологим низким берегам. В русле сохраняется значительное количество отмелей, кос и перекатов, при этом происходит постепенная смена каменисто-галечных образований на песчаные, расширяющиеся по площади. Тяжелый состав грунтов обеспечивает устойчивость русла к эрозионным процессам.

На участке от Усть-Усы до Усть-Цильмы левый берег характеризуется высокой отметкой с глинисто-каменной отмелью, вдающейся в русло. Правый берег постепенно повышается, демонстрируя глинистые откосы, покрытые темнохвойной растительностью, с прослойками торфа и включениями песчаника (особенно в районе Щельяюр).

Ниже впадения реки Ижмы правый берег, поросший таежными лесами, сохраняет свою обрывистость и высоту, постепенно снижаясь по направлению к Усть-Цильме. В этом районе оба берега становятся низменными.

Южнее Хабарихи правый берег приобретает характерную высокую и обрывистую форму. Его геологическое строение представлено серо-бурой моренной глиной с вкраплениями желтого песка и торфяных слоев. Особый рельеф берегу придают овраги, формирующие пирамидальные очертания. Исключением является лишь участок возле устья реки Сулы, где на поверхность выходят коренные породы.

В нижнем течении реки наблюдается нестабильность русла, которое преимущественно состоит из рыхлых песчаных наносов. Перераспределение стока по протокам («шарам») провоцирует оползневые процессы и размыв береговой линии вглубь материка на значительные расстояния.

В бассейне Верхней Печоры были открыты месторождения нефти и газа. В настоящее время в районе месторождения образован поселок городского типа Вуктыл.

1.3 Растительность

В верхнем и среднем течении, до соединения с рекой Уса, ландшафтный комплекс водосборного бассейна реки Печора характеризуется преобладанием лесных массивов, занимающих более 80% территории. Болотистые образования составляют приблизительно 10% площади.

К северу от этой акватории начинается тундровая зона. На протяжении своего течения река Печора неоднократно меняет направление, благодаря чему пересекает несколько природных зон: тайгу, лесотундру и тундру.

1.4 Гидрографическая характеристика

Река Печора, протянувшаяся на 1800 километров, имеет сложную извилистую структуру русла с многочисленными изменениями направления при сохранении общего южно-северного ориентира течения.

На своем протяжении водная артерия проходит через несколько природных зон: беря начало в горной местности, она затем протекает по заболоченным таежным равнинам, а в Заполярье пересекает обширные пространства Большеземельской тундры. Завершается путь реки формированием обширной дельты при впадении в Баренцево море, где располагается Печорская губа.

В районе устья река разделяется на три основных рукава: Печору, Каменный и Неволин Шар, формируя архипелаг в эстуарии, расположенный за Полярным кругом с преобладанием тундровой растительности.

Верхняя Печора характеризуется порожистостью и извилистостью при незначительной глубине. До впадения Илыча практически отсутствуют прямые и спокойные плесы. После села Якша наблюдается сужение русла с увеличением скорости течения и каменистым дном.

В месте соединения с Илычем формируется широкий разлив, напоминающий озеро. После этого соединения происходит почти двукратное

увеличение стока Печоры, расширение русла с 100 – 150 до 300 метров, а каменистое дно сменяется гравийно-галечным составом с примесью песка.

Ниже Троицко-Печорска наблюдается замедление течения. Границей Средней Печоры считается место впадения реки Подчерье (альтернативно – район поселка Вуктыл).

Ниже Вуктыла река демонстрирует интенсивное меандрирование, формируя многокилометровые петли – Войские меандры. На участке от Вуктыла до Усть-Вои зафиксировано 21 пережат и 1 порог – Щугорский.

После Усть-Вои Войские меандры завершаются, пойма реки расширяется до 3 километров с формированием заливных лугов.

После впадения Кожвы происходит значительное расширение долины Печоры: ширина поймы достигает 8 – 10 километров и более, а ширина русла варьируется от 500 до 1400 метров. Отмечается увеличение количества песчаных отмелей, кос и островов, появляются неустойчивые пережаты.

В нижнем течении Печора приобретает типично-равнинный характер, хотя и сохраняет наличие галечных и каменисто-галечных кос. Перед впадением Усы – крупнейшего притока (41.3 км³ воды в год) – ширина реки достигает 1000 метров.

Ниже Усы начинается Нижняя Печора, где происходит значительное увеличение водности и понижение температуры воды. В районе впадения Ижмы река разделяется на три основных рукава (шара).

Русловые процессы характеризуются многорукавностью с постоянным перераспределением стока между основным руслом и 101 протокой (шарами).

В дельте происходит разветвление на множество протоков, соединенных с озерами и старицами. Общая ширина дельты составляет 45 километров.

1.5 Гидрологический режим

Гидрологический режим реки Печора характеризуется смешанным типом питания с преобладанием снегового компонента (50 –80% от общего объема). Подземный сток составляет не более 15% от общего объема водных ресурсов. Среднегодовой расход воды зафиксирован на уровне 130 м³/с.

Режим стока демонстрирует выраженную сезонность: весеннее половодье сменяется летне-зимней меженью. Период половодья приходится на конец апреля – начало мая, достигая пика к середине мая в среднем течении и низовьях, продолжаясь до начала июня. Летняя межень наблюдается с середины июля по август, периодически прерываясь дождевыми паводками.

Ледостав устанавливается в конце октября и сохраняется до мая. Весеннее вскрытие начинается с верховьев и сопровождается заторами льда. В период таяния снегов наблюдается значительное повышение уровня воды, особенно в нижнем течении.

Судоходная навигация осуществляется до Троицко-Печорска, в весенний и осенний периоды – до Усть-Уньи. Морские суда могут подниматься до Нарьян-Мара (110 км от устья).

Весенний сток в Печорском бассейне составляет 55 – 80% от годового объема. В горных районах наблюдается подъем уровня воды на 5 –8 метров, в тундровых – 8 –10 метров. Для больших рек, включая Печору, характерен подъем на 7 –12 метров при скорости подъема до 3.5 метров в сутки.

Формирование весенних уровней воды определяется следующими факторами:

- величиной снегозапасов за зимний период
- интенсивностью снеготаяния
- степенью увлажненности почвы
- уровнем промерзания почвы

Весенний гидрограф демонстрирует многопиковость вследствие неодновременного стаивания снега в различных частях бассейна. После первого пика обычно наблюдается 1 – 3 дополнительных пика, определяющих

максимальный уровень воды. Частые возвраты холодов влияют на высоту подъема уровней и количество пиковых значений.

Левые притоки (Северная Мылва, Кожва, Ижма) с объемом стока до 25% служат индикаторами снеготаяния в равнинной части бассейна, но не оказывают существенного влияния на общий подъем уровня воды.

Быстрая реакция на температурные колебания характерна для правых притоков и верховьев Печоры, что обусловлено:

- слабой регулирующей способностью горной и увалистой части бассейна;
- значительными уклонами поверхности;
- ограниченной русловой емкостью;
- высокими снегозапасами.

Формирование гидрологического режима Печоры преимущественно определяется правобережными притоками (Илыч, Щугор, Уса), вследствие чего гидрограф основной реки повторяет характеристики гидрографов данных притоков с постепенным сглаживанием зубчатости по длине водотока.

Асинхронность снеготаяния в бассейнах правых притоков обусловлена различиями в высотном положении территорий и температурном режиме. В частности, окончание половодья в районе Усть-Щугора происходит позднее, чем у Троицко-Печорска, что объясняется более высоким расположением бассейна реки Щугор относительно бассейнов Илыча и верховьев Печоры. Временной разрыв непостоянен и зависит от синоптических условий.

Несмотря на географическую удаленность (крайний северо-восток), река Уса демонстрирует схожую с Печорой в районе Усть-Щугора форму гидрографа в 50% случаев. Характер половодья на Усе отличается меньшей высотой первой волны при более значительных последующих подъемах.

При интенсивном снеготаянии на Нижней Печоре происходит наложение двух волн максимального уровня воды – со Средней Печоры и реки Усы. Это приводит к превышению неблагоприятных отметок и подтоплению населенных пунктов от Усть-Уса до Ермицы.

Продолжительность половодья в Печорском бассейне коррелирует с количеством осадков в этот период.

Дождевые паводки характеризуются стремительностью, иногда превосходя весеннее половодье по высоте подъема воды. Показатели модуля дождевого стока у пристани Якша составляют: осенью $-18 \text{ л/(с*км}^2\text{)}$, а летом $- 25.4 \text{ л/(с*км}^2\text{)}$. Для сравнения, в период летней межени модуль стока на Верхней Печоре снижается до $3 \text{ л/(с*км}^2\text{)}$. Продолжительность летней межени на Верхней Печоре варьируется от 13 до 137 суток и периодически прерывается дождевыми паводками.

1.6 Ледовый режим

Ледовый режим реки Печора

Печора — крупная река с высокой скоростью течения, относящаяся к третьему типу замерзания. Лёд в ней формируется по всей глубине: шуга кристаллизуется и соединяется, образуя сплошной покров.

Вышеуказанные природные явления обеспечивают полное очищение реки ото льда, при этом каждый этап данного процесса подлежит детальному описанию и документированию.

Ледовый режим в период замерзания

В соответствии с установленными метеорологическими наблюдениями, процесс формирования начального ледового покрова начинается в прибрежных зонах при достижении нулевой отметки температуры воздуха, что соответствует общепризнанным географическим закономерностям процесса образования льда. Однако формирование прочного ледяного покрова происходит только при устойчивом понижении температуры до значений ниже нуля, а именно до минус четырнадцати градусов цельсия.

Согласно архивным данным, первоначально были зафиксированы два участка реки, где образование первичного льда происходило в октябре месяце. В настоящее время, вследствие наблюдаемого повышения температурных

показателей в Северном регионе, формирование ледового покрова по всей акватории реки начинается в конце октября.

Статистическое исследование показало сильную взаимосвязь между временем замерзания реки, уровнем воды и появлением льда. Величина этой связи подтверждается высокими коэффициентами корреляции: 0.78 для сроков образования льда и 0.63 для уровня воды.

Наблюдения за рекой показали, что первые признаки обледенения проявляются вдоль всего русла в виде береговых наледи и различных типов ледового покрова – от редкого до плотного. На крупных реках, включая реку Печора, наблюдается характерное явление повышения уровня воды во время ледохода, особенно в местах сужения русла, где скапливаются льдины.

Статистический анализ показывает интересную закономерность: частота осенних ледоходов на Печоре увеличивается по направлению от устья к истоку. В районе Усть-Унья фиксируется 41% случаев, между Усть-Кожва и Усть-Цильма этот показатель достигает максимальных сто процентов, а ближе к устью снижается до 35%. Продолжительность осеннего ледохода варьируется в зависимости от участка реки. В верховьях она составляет 7 – 10 дней, в центральной части растягивается до 13 дней, а на участке от села Ермицы до устья сокращается до 4 дней. В исключительных случаях продолжительность может достигать 30 дней.

Современные данные с гидрометеорологических станций свидетельствуют о нарастающей тенденции к удлинению периода осеннего ледохода на протяжении последних лет. Примечательно, что эта тенденция не затрагивает участок между Щельяюром и Усть-Цильмой. Важно отметить, что в 2006 – 2007 годах в верхнем течении и в 2013 – 2014 годах в среднем течении были зарегистрированы беспрецедентные показатели ледохода за всю историю наблюдений.

Ледовый режим в период ледостава

Современные гидрометеорологические исследования показывают, что период от появления первых ледяных образований до формирования

устойчивого ледостава (продолжительностью не менее 10 дней) может растянуться на два месяца. При стандартных температурных условиях (не ниже минус 34°C) этот процесс занимает 10 – 12 дней в нижнем и верхнем течении, увеличиваясь до 20 дней в среднем течении. Продолжительность данного периода определяется площадью водосборного бассейна и уровнем воды на момент замерзания.

Анализ временных показателей демонстрирует стабильность переходного периода в нижнем и среднем течении. В верхнем течении зафиксировано статистически значимое увеличение продолжительности на 3 дня. На участке между Усть-Усой и Усть-Кожвой наблюдается обратная тенденция, обусловленная снижением уровня воды в переходный период.

Корреляционный анализ подтверждает высокую согласованность сроков замерзания реки по всей длине (коэффициент корреляции 0.81). При формировании ледостава на Печоре отмечается значительное повышение уровня воды в первые 8 – 11 дней, достигая максимальных значений в верховьях. Этот подъем уровня воды связан с уменьшением пропускной способности русла во время формирования ледостава и может существенно влиять на высоту весеннего ледохода, особенно при образовании зажоров.

Согласно данным Каталога заторных и зажорных участков рек, на Печоре идентифицировано двенадцать зажорных участков. Длительные наблюдения показывают, что зажорные явления происходят с частотой около 90% на всех гидрологических постах, за исключением района у села Оксино, где этот показатель составляет примерно 50%. Высота заторов на Печоре и её притоках (Ижме, Суле и Цильме) может достигать от трех с половиной до пяти метров.

Характерной особенностью Печоры является то, что кратковременные зажоры не оказывают существенного влияния на весенний ледоход, что усложняет долгосрочное прогнозирование весеннего уровня воды. Статистический анализ длительных наблюдений не выявил значимых тенденций, связанных с уровнем воды.

После установления устойчивого ледостава начинается активное наращивание ледяного покрова. Максимальной толщины лед достигает в марте – апреле, причем распределение максимальной толщины льда зависит от географической широты: показатель увеличивается с юга на север.

Ледовый режим в период вскрытия

Процесс разрушения ледяного покрова на реках начинается при температуре выше нуля градусов, первоначально затрагивая подвижки и закраины льда. Как правило, устойчивый ледостав завершается к концу апреля – началу мая, хотя иногда вскрытие может происходить даже при отрицательных температурах.

Средняя продолжительность ледостава составляет 183 дня, однако этот период постепенно сокращается, особенно заметно это в среднем течении реки. Существует прямая зависимость между датой начала ледостава и его общей продолжительностью, что важно для долгосрочного прогнозирования.

Деградация ледяного покрова обычно начинается за несколько дней до весеннего ледохода. В этот период уровень воды обычно повышается, но возможны и снижения, приводящие к низкому уровню воды во время ледохода. При достижении критического уровня воды начинается движение льда. Максимальный подъем воды может наблюдаться как в середине, так и в конце ледохода, в зависимости от погодных условий и характера таяния льда. В местах впадения крупных притоков максимальные уровни часто фиксируются при вторичном ледоходе.

Пиковый уровень воды во время ледохода может наблюдаться как в середине, так и в конце этого периода — это зависит от погодных условий и особенностей вскрытия льда. В местах впадения крупных притоков максимальные уровни часто фиксируются при повторном ледоходе. Резкий подъём воды в начале ледохода случается редко и обычно вызван заторами льда.

В бассейне реки Печора идентифицировано 15 потенциально заторных участков. Многолетние исследования показали снижение частоты и интенсив-

ности заторных явлений. Показатели повторяемости заторов по ключевым участкам распределились следующим образом: Усть-Унья – 23%, Якша – 39%, Троицко-Печорск – 39%, Усть-Цильма – 35%, Усть-Щугор – 39%, Усть-Уса – 17%, Усть-Кожва – (максимальный показатель по реке), Мутный, Материк – 31%. Ермацы – 47%, Оксино – 20%,

Продолжительность очищения реки ото льда варьируется в зависимости от широты и влияния притоков. Вторичный ледоход может существенно замедлить этот процесс. Например, из-за притока Усы очищение Печоры занимает на два дня больше времени, чем очищение ото льда на участке Мутного Материка.

Традиционно процесс освобождения реки ото льда происходит в период с 10 мая (в верхнем течении) до 24 мая (в нижнем течении). Однако существует исключение – участок возле деревни Усть-Уса, где завершение ледохода приходится примерно на 27 мая. Несмотря на то, что колебания дат и уровней воды не достигают статистической значимости, между этими параметрами сохраняется устойчивая корреляционная зависимость.

1.7 Климатическая характеристика

В северо-восточном регионе Российской Федерации, на территории Республики Коми, в районе бассейна реки Печоры, наблюдаются климатические условия, характерные для субарктической зоны. Метеорологические показатели данного региона формируются под воздействием как умеренных, так и арктических воздушных потоков.

Температурный режим характеризуется продолжительным холодным периодом с преобладанием отрицательных значений. В зимний сезон среднемесячные показатели термометра составляют около минус 20°C, при этом часто фиксируются понижения до минус 30°C и ниже. Летний период отличается кратковременностью и умеренными температурами, в среднем около +16°C. Годовой температурный ход демонстрирует среднее значение

минус 2.7°C. Экстремальные показатели зафиксированы на отметках +35°C (1954 год) и минус 55°C (1973 год). Продолжительность периода с положительными температурами составляет 93 дня, при этом продолжительность холодного периода достигает 220 – 230 дней, что является одним из наиболее высоких показателей в России.

Гидрометеорологические характеристики демонстрируют следующий режим: годовое количество осадков находится в диапазоне 500 – 700 мм с преобладанием жидких осадков в теплый период. Формирование снежного покрова начинается в конце календарной осени, достигая в среднем по бассейну 30 – 40 см, а в предгорьях Уральского хребта до 150 см.

Ветровой режим территории характеризуется преобладанием потоков северного и северо-восточного направлений в теплое время года, с инверсией на южные и юго-западные в холодный период. Средняя годовая скорость ветра варьируется от 7 – 8 м/с в прибрежных зонах до 2.5 – 3.5 м/с в южных районах Северного края, с максимумами в зимний период.

Фенологические наблюдения показывают, что весенний период начинается в марте, однако полная деградация снежного покрова происходит к концу мая. В урбанизированных зонах процесс таяния протекает интенсивнее вследствие антропогенного воздействия, в то время как в тундровой зоне отставание составляет 2 – 4 недели относительно городских территорий.

2 Методы прогноза наивысших уровней воды, связанных с ледовыми заторами

Прогноз максимальных уровней воды во время ледовых заторов осуществляется с помощью комплекса методов. Основные аспекты прогнозирования включают определение возможных мест образования затора, вычисление максимального подъёма уровня воды и оценку продолжительности существования затора. Эти методы активно используются в гидрологии для определения потенциальных превышений критических уровней воды. В статье изучаются главные принципы прогнозирования, а также специализированные методы.

Затор – это скопление льдин в русле реки, которое приводит к уменьшению живого сечения водотока и вызывает быстрое повышение уровня воды в зоне затора, а также повышение уровня на участках выше по течению. Основная опасность заторов заключается в их способности вызывать стремительные наводнения. За короткий период уровень воды может подняться на несколько метров, что часто приводит к выходу реки из берегов и затоплению прибрежных территорий.

2.1 Эмпирический метод прогноза зажорных и заторных явлений

Анализируя процессы образования зажоров и заторов, которые возникают во время замерзания и вскрытия рек, В.А. Бузин отмечает, что эти природные явления представляют серьёзную опасность для многих водных артерий России. Ледяные скопления в руслах рек не только нарушают естественный сток, но и становятся причиной масштабных наводнений. Уровень воды при заторах может подниматься на 3 – 5 метров, а в отдельных случаях достигать 10 метров. На реках бассейнов Енисея, Северной Двины, Амура и Лены заторные явления часто приводят к более высоким уровням

воды, чем во время весеннего половодья или летних паводков. Особенно разрушительными оказываются зимние наводнения, когда лед выходит на берег и уничтожает инфраструктуру в зоне затопления. При этом материальный ущерб от подобных ситуаций обычно оказывается гораздо существеннее, чем от летних паводков. Помимо этого, образование зажоров нередко приводит к сокращению водопритока ниже ледяных преград, что вызывает проблемы с водоснабжением населенных пунктов и промышленных предприятий, усугубляя общий экономический ущерб. В то же время в некоторых случаях зажоры и заторы могут оказывать положительное влияние, например, способствуя обводнению пойменных территорий и повышению урожайности лугов [18].

Несмотря на значительную изученность проблемы, процессы образования ледяных скоплений остаются слабо управляемыми. Это делает актуальными вопросы разработки методов расчета и прогнозирования зажорных и заторных явлений, особенно в условиях активного роста строительства и объемов водопользования в Сибири, в северных регионах Европейской части России и на Дальнем Востоке. Для решения этих задач необходимо детальное изучение механизмов формирования заторов и зажоров, а также факторов, их вызывающих.

Прогнозирование зажорных явлений, например, на р. Северная Двина, используется следующее уравнение:

$$H_z = 0,226 (Q_{кр} \cdot T_{лх})^{0,7} + 100, \quad (2.1)$$

где $Q_{кр}$ – расход воды у перемещающейся вниз по течению кромки ледяного покрова $Q_{кр} = Q_0 \cdot e^{-k_3 T_{лх}}$,

k_3 – коэффициент, зависящий от погодных условий в период замерзания.

Для рек, которые впадают в большие озера и имеют регулируемое течение, возможно составление более раннего прогноза. Это становится

возможным благодаря анализу взаимосвязи между критическим расходом воды и средним уровнем воды в озере в период перед наступлением ледостава

$$T_{\text{лх}} = D + \frac{L}{V_{\text{кр}}}, \quad (2.2)$$

где D – период между датами начала ледостава в нижнем створе (у кромки) и ледохода в верхнем по течению створе;

L – расстояние от гидрологического поста до кромки ледяного покрова в день составления прогноза;

$V_{\text{кр}}$ – скорость перемещения кромки по течению, которая находится по зависимости:

$$V_{\text{кр}} = -r \frac{\theta}{V}, \quad (2.3)$$

где r – эмпирический коэффициент;

θ – температура воздуха, прогнозируемая синоптическими методами;

V – скорость течения на участках между расчетным створом и кромкой.

Для прогноза зажорных явлений используются пятидневный и месячный прогнозы погоды.

На реках Амур, Ангара, Селенга и Сухона существует прямая зависимость между максимальным уровнем воды во время зажоров и пиком уровня в начале ледостава. Благодаря этой взаимосвязи специалисты могут составлять достаточно точные прогнозы относительно максимального уровня воды при заторах за несколько месяцев до наступления этого явления [18].

По уравнению 2.4 можно рассчитать заблаговременность максимального заторного уровня воды:

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{V_{\theta}} + D_{\text{н}} + D_{\text{в}}, \quad (2.4)$$

где V_{θ} – скорость перемещения фронта потепления;

$D_{\text{в}}$ и $D_{\text{н}}$ – длительность периода таяния льда в верхнем и нижнем бьефе соответственно.

Если многолетние данные наблюдений отсутствуют, максимальные уровни зажора и затора определяются по уравнению 2.5:

$$Q'_{\text{кр}} = \frac{Q_{\text{кр}}}{K_{Q_3}}, \quad (2.5)$$

K_{Q_3} – зимний коэффициент, который определяется с помощью зависимости от разницы уклона водной поверхности при свободном ото льда русле и критического значения уклона, рассчитанного по формуле.

При этом длительность осеннего ледохода и зимний коэффициент находятся по следующим формулам:

$$T_{\text{лх}} = -10,9 \frac{Q_{\text{кр}}^{0,5}}{Q_{\text{зн}} \cdot B^{0,1}} \left(\frac{J Q_{\text{кр}}}{n_p} \right)^{0,375}, \quad (2.6)$$

$$K_{Q_3} = 8,13 \left(\frac{\varphi t_{\text{л}}}{B} \right)^{0,38} \cdot (K_{Q_{\text{лс}}} - 1) + 1, \quad (2.7)$$

где φ – отношение прочности льда в последний день ледостава и прочности льда в начале его таяния;

$K_{Q_{\text{лс}}}$ – значение зимнего коэффициента при максимальном уровне воды в начале ледостава.

Для определения $Q_{\text{кр}}$ есть два способа. Первый способ основывается на методе соответственных по ледовым фазам расходов воды и применяется в случае бесприточного участка реки выше по течению, а второй строится на теории о том, что процесс формирования льда длится несколько дней, такой метод используется для рек, где расстояние между створами более двухсот километров или на этом участке впадает крупная река, которая вскрывается раньше, и влияет на процесс образования заторов.

Оценка эффективности методов прогноза максимальных заторных и зажорных уровней производилась по критериям $\frac{S_H}{\sigma_{\Delta H}}$ и $\frac{S_H}{\sigma_H}$, при этом S_H — средняя квадратическая ошибка проверочных прогнозов, σ_H — среднее квадратическое отклонение прогнозируемого уровня от нормы, $\sigma_{\Delta H}$ — отклонение от нормы величины изменения прогнозируемого уровня за период заблаговременности прогноза. Значения этих критериев для методик прогнозов на отдельных реках изменяются от 0.35 до 0.72. Обеспеченность прогнозов больше природной обеспеченности на 10 – 30% [18].

Результат показал, что метод прогнозирования максимальных уровней зажоров показывает более худший результат, нежели метод прогнозирования уровня заторов воды из-за использования недостаточно точного прогноза погоды. О надежности метода можно судить только после 7 – 10 лет испытаний.

Разработанные методы нашли практическое применение при проектировании гидротехнических сооружений, таких как дамбы, мосты и причалы. Они также используются в региональных управлениях Росгидромета и гидрометслужбах ряда европейских стран. Успешные прогнозы были сделаны для наводнений на Печоре (1981 г.), Даугаве (1980 г.), Северной Двине (1979 г.), Амуре (1986 г.), Днестре (1976 г.). Заблаговременность прогнозов составляет 3 – 6 суток, что позволяет снизить ущерб на 40 – 70% [18].

2.2 Методологические подходы к разработке методики прогноза максимального заторного уровня воды

Изучая заторные процессы в бассейне Верхнего Амура Н.И. Горошкова, А.В. Стриженок предложили методический подход к прогнозу максимальных заторных уровней [19].

В бассейне Верхнего Амура ежегодно фиксируются ледовые явления, наиболее опасными из которых являются заторы льда. Механизм формирования заторных наводнений активируется во время весеннего половодья при высоком уровне воды, в момент скопления большого количества ледовых масс в русле, который значительно уменьшает пропускную способность, следовательно, это приводит к быстрому повышению уровня воды.

Чтобы повысить эффективность прогнозирования наводнений, связанных с заторами, для потенциально опасных участков Верхней реки Амур, была разработана усовершенствованная методика, учитывающая современные климатические изменения. Необходимость обновления объясняется тем, что предыдущая методика была создана более 30 лет назад, и с тех пор в бассейне реки Амур произошли значительные климатические и антропогенные изменения.

Статистический анализ показал важность этих изменений для формирования максимального уровня воды во время ледостава на реке Амур между сёлами Покровка и Сергеевка. Исследование также продемонстрировало изменение степени воздействия разных факторов на формирование ледяных заторов.

Данные исследований внесли позитивный вклад в оперативную работу в дальневосточные региональные центры при прогнозе заторных явлений [19].

Долгосрочный прогноз осуществлялся с помощью уравнения 2.8:

$$H_{\text{лх}} = a_0 + a_1 H_{\text{лс}} , \quad (2.8)$$

Для участка реки Амур было необходимо вести общий учет осеннего и весеннего факторов:

$$H_{\text{лх}} = a_0 + a_1 H_{\text{лс}} + a_2 H_Q , \quad (2.9)$$

где H_Q — уровень, характеризующий водность реки в период ледохода и определенный методом графической срезки.

Оценка методов прогнозирования проводилась по двум критериям: отношению среднеквадратичной ошибки прогнозов (S) к вариации прогнозируемого уровня (σ) и отношению погрешности S к изменению уровня за период заблаговременности прогноза (σ_Δ). Полученные значения отношений $\frac{S}{\sigma}$ и $\frac{S}{\sigma_\Delta}$ оказались меньше 0.8, что подтверждает эффективность используемого метода до момента ввода Зейской ГЭС в эксплуатацию. Предельно допустимое значение погрешности прогноза определялось как $0.2A_{\text{макс}}$, где $A_{\text{макс}}$ — максимальная амплитуда колебаний заторных уровней в конкретном пункте наблюдений [19].

Принимая во внимание значительное воздействие стока других рек на формирование максимальных уровней на участке реки Амур, была определена следующая зависимость для прогнозирования показателя весенней водности (H_Q):

$$H_Q = a_0 + a_1 H_{\text{ш}} + a_2 I_{\text{ш}} + a_3 H_A, \quad (2.10)$$

где $H_{\text{ш}}$ — уровень воды;

$I_{\text{ш}}$ — интенсивность роста уровня;

H_A — уровень на день выпуска прогноза.

До момента ввода в эксплуатацию Зейской ГЭС качество прогнозирования оценивалось как удовлетворительное. Несмотря на снижение эффективности методики вследствие изменения гидрологических условий формирования стока в реке Амур в зимний и весенний периоды, данный метод продолжал применяться Управлением гидрометеорологической службы Дальнего Востока вплоть до 1986 года.

В настоящее время приоритетным направлением является совершенствование методик прогнозирования заторных наводнений с учетом современных климатических изменений и антропогенных факторов

воздействия. Интеграция климатических и антропогенных параметров в процесс прогнозирования может способствовать повышению точности прогнозов на 5 – 15% [19].

2.3 Прогноз заторно-зажорных уровней воды на основе прогноза максимального расхода во время ледохода

Методика, учитывающая гидравлические характеристики потока, коэффициент затора и накопление льда относительно пропускной способности русла, получена О.Г. Савичевым и В.А. Лыгониной в ходе научно-исследовательской работы по разработке и апробации методик определения заторных уровней воды реки Томь в районе города Томска. Исследования показали, что в нижнем течении реки Томь существует высокий риск наводнений, связанный с естественными условиями формирования водного и ледового режима, способствующими образованию ледовых заторов и зажоров. В рамках исследования разработаны рекомендации по минимизации рисков наводнений в нижнем течении реки Томь [20].

На первой стадии проводится прогнозирование максимального расхода воды во время ледохода с учётом общего количества влаги, накопленной в течение весенне-зимнего периода. Затем проводится оценка расхода воды с учётом двух ключевых аспектов: влияния ледяного покрова и временного промежутка между пиком половодья и началом ледохода. Все расчёты выполняются с использованием особой формулы, которая позволяет принимать во внимание эти факторы и гарантировать точность результатов:

$$Q' = Q \frac{\eta}{K_w}, \quad (2.11)$$

где η – отношение расходов воды при ледоходе и на пике половодья;

K_w – коэффициент, учитывающий изменение гидравлических характеристик потока при ледоставе; коэффициент η определялся по зависимости от модульного коэффициента по эмпирической формуле, полученной для гидроствора на р. Томь у г. Томска:

$$\eta = 96,406 \left(\frac{Q}{1031} \right)^{-2,835}. \quad (2.12)$$

По формулам Шези и Маннинга определены связи между отметкой уровня воды Z , с одной стороны, расходом воды Q , средней глубиной h_a и шириной потока B , с другой [20].

Расчет заторно-зажорные уровни воды $H_{з,р\%}$ осуществлялось по формуле:

$$Z_{Q_{с,р\%}} = \left(\mu J_{Q_{с,р\%}}^{0,3} - 1 \right) h_{Q_{с,р\%}} + H_{Q_{с,р\%}} \quad (2.13)$$

где $Z_{Q_{с,р\%}}$, $h_{Q_{с,р\%}}$, $J_{Q_{с,р\%}}$ – уровень воды, глубина и уклон водной поверхности при расходе воды $Q_{с,р\%}$ и свободном от льда русле;

μ – коэффициент заторности (зажорности).

При решении второй задачи использовался полуэмпирический метод, согласно которому увеличение уровня воды в период заторов и зажоров (ΔZ_s) находится в прямой зависимости от количества скоплений льда (Δs) с учетом пропускной способности речного русла [20]:

$$\Delta_s = \beta_1 \frac{M_s - \Pi_s}{\rho_s V_a B}, \quad (2.14)$$

где M_s – поступления ледяных образований в заданный створ (льда M_L или шуги M_C ; в общем случае используется обозначение M_s); Π_s – способности потока к его переносу (льда Π_L или шуги Π_C ; в общем случае Π_s); β_1 –

коэффициент, учитывающий форму русла; ρ_s – плотность ледовых образований; Va – средняя скорость течения; B – ширина потока.

В ходе анализа данных, предоставленных ТЦГМС, были идентифицированы два характерных года, в течение которых зафиксировано наличие заторных уровней воды в условиях современного русла, сформированного под воздействием разработки карьеров песчано-гравийного материала. Апробация методики прогноза с применением необходимых параметров продемонстрировала высокую степень точности получаемых результатов [20].

2.4 Прогноз максимального заторного уровня воды на основе данных ледовой авиаразведки

Инновационные методики краткосрочного прогнозирования максимальных заторных уровней воды в рамках исследования представлены в работе В.А. Бузина «Закономерности формирования и прогноза максимального уровня воды при заторе льда». В работе представлен комплексный анализ факторов, влияющих на формирование уровня воды при заторных явлениях. Исследование базируется на интегральном рассмотрении гидродинамических и тепловых компонентов, определяющих условия прорыва ледовых заторов. Предложенная прогностическая модель формирования заторов построена на основе уравнения баланса ледяного материала и предусматривает использование данных о характеристиках ледохода на участках выше по течению реки и её притоках, получаемых посредством ледовой авиаразведки [21].

Следует отметить, что методология прогнозирования максимального заторного уровня воды, базирующаяся на данных ледовой авиаразведки, была разработана А.С. Рудневым и базируется на систематизации типов заторов льда в соответствии с характеристиками их головной части. Классификация А. С. Руднева предполагает прямую связь между типом затора и степенью

превышения максимального заторного уровня над уровнем воды до начала движения ледяного покрова. Типология включает три категории заторов, каждая из которых характеризуется определённой градацией превышения уровня воды. Необходимо отметить, что данный метод прогнозирования характеризуется ограниченной точностью, которая является существенно ниже по сравнению с методиками, основанными на локальных прогностических зависимостях максимального заторного уровня от значений, влияющих на процесс заторообразования.

Чтобы повысить точность прогнозирования максимального уровня воды во время затора на основе данных авиационной разведки льдов, важно принимать во внимание особенности движения льда на верхних участках реки и её притоках, которые определяют объём ледяных масс в заторе:

$$W_{\text{л}} = 86400 \sum_0^n \varphi_{\text{л}} d_{\text{л}} V_{\text{л}} B_{\text{л}}, \quad (2.15)$$

где $\varphi_{\text{л}}$ — густота ледохода, оцениваемая в долях единицы;

$d_{\text{л}}$ — толщина льдин

$V_{\text{л}}$ — скорость перемещения льдин

$B_{\text{л}}$ — ширина зоны ледохода

n — число суток формирования затора

Использование формулы (2.15) для прямого прогнозирования максимального заторного уровня воды неосуществимо вследствие отсутствия данных о продолжительности формирования затора и скорости перемещения льдин к верхней кромке ледового скопления ($V_{\text{л}}$). При этом следует учитывать, что для составления прогноза доступны только данные воздушной ледовой разведки, включающие параметры: длина ледового скопления, протяженность и ширина участка реки с ледоходом, а также плотность ледового покрова [21].

При формировании заторов льда общий подъем уровня воды над меженным уровнем (A_3) складывается из двух компонентов: подъема, вызванного увеличением расхода воды, и подъема, вызванного сужением

русла из-за аккумуляирования льда и гидравлическим сопротивлением его нижней части (ΔH_3).

Составляющая общего подъема уровня воды определяется по уравнению 2.16:

$$\Delta H_3 = 0,9h_{\text{ск}} + \int_0^{L_{\text{ск}}} \left(\frac{Q^2}{K^2} - I_0 \right) dL, \quad (2.16)$$

где $h_{\text{ск}}$ и $L_{\text{ск}}$ — толщина скопления льда и его длина (м);

Q — расход воды (м³/с)

K — модуль расхода (м³/с)

I_0 — уклон водной поверхности при свободной ото льда реке

Р. В. Донченко вывел формулу, которая описывает взаимосвязь между глубиной водного потока у верхней кромки скопления льда h_3 и глубиной реки, свободной ото льда h_0 и том же, что и при заторе, расходе воды:

$$h_3 = 17,3h_0I_0^{0,3}, \quad (2.17)$$

Преобразовывая формулу, она принимает следующий вид:

$$A_3 = \frac{\Delta H_3}{0,418 + 1180I_0}. \quad (2.18)$$

Протяжённость ледового скопления в основном зависит от интенсивности и продолжительности ледохода над верхней кромкой затора и может быть предсказана с использованием следующей формулы 2.19:

$$L_{\text{ск}} = L_{\text{ск},0} + \frac{B}{r} \sum_{i=1}^n \varphi_{\text{л},i} L_{\text{л},i} B_{\text{л},i}. \quad (2.19)$$

где $L_{\text{ск},0}$ — начальная длина скопления;

- $L_{ск,0}$ – ширина реки в заторном участке;
 r – коэффициент упаковки льда, равные отношению толщины скопления $d_{ск}$ к толщине подплывающих к нему льдин $d_{л}$;
 $\varphi_{л,i}$ – густота ледохода на расположенных выше по течению участков реки и её притоков с ледотранзитом до затора;
 $L_{л,i}$ и $B_{л,i}$ – длина и ширина участка реки с густотой или дохода $\varphi_{л,i}$.

Коэффициент уплотнения льдин r определяется с использованием уравнения равновесия ледяного покрова у верхней границы затора, представленного в подвижной системе координат, и вычисляется по следующей формуле:

$$r = \frac{\varphi_{л}(V_{л}-V_{ск})}{V_{ск}(1-\varepsilon)}, \quad (2.20)$$

где $V_{ск}$ – скорость перемещения вверх по течению верхней кромки скопления льда.

Вышеизложенные формулы представляют собой фундаментальную основу методики прогнозирования максимального уровня воды при заторах льда, использующей данные ледовой авиаразведки. Максимальная заблаговременность прогноза по ним равна периоду формирования ледового затора. Результаты авторской проверки подтвердили достоверность прогнозов на уровне более 70% [21].

2.5 Методика определения уровня воды выше головы затора между пунктами наблюдений

В соответствии с научным исследованием, представленным в работе Банщиковой Л.С. «Наводнения на реках, вызванные заторами льда, методика их мониторинга и оценки риска», ледовые заторы являются широко

распространенным гидрологическим явлением на реках Российской Федерации. Особенность этого явления заключается в том, что уровень воды быстро и значительно поднимается выше места образования затора. Зафиксированные показатели часто значительно превышают критические значения, характерные для весеннего половодья и ливневых паводков, что создаёт условия для возникновения чрезвычайных ситуаций в районах, прилегающих к рекам. В контексте активного освоения северных регионов Российской Федерации особую актуальность приобретают вопросы организации системы мониторинга и оценки рисков наводнений заторного происхождения с целью минимизации их негативных последствий. В исследовании представлена методика, которая позволяет определять уровень воды на участках между наблюдательными пунктами с использованием данных стационарных и временных гидрологических постов. Методика также обеспечивает возможность определения пространственного положения головы затора на различных этапах его формирования [22].

Если имеются предварительные поперечные профили речного русла на потенциально опасных участках без регулярных гидрологических наблюдений, метод позволяет провести всесторонний анализ, включая определение местоположения затора и толщину ледяного покрова. Для определения толщины льда используется уравнение, которое учитывает пропускную способность русла реки во время ледостава:

$$\frac{Q^2}{\Delta H} = \frac{L(\omega - 0,9t_{\text{СК}}B)}{n_p^2 [B(a^{3/2} + 1)]^{4/3}}, \quad (2.21)$$

где Q – расход воды под скоплением льда;

ΔH – перепад уровня воды на участке стеснения русла скоплением льда длиной L (участок с повышенным уклоном водной поверхности);

- ω – площадь поперечного сечения русла, соответствующая средней отметке уровня на этом участке (H_{cp});
- $t_{ск}$ – толщина скопления льда;
- B – ширина реки по нижней поверхности льда при уровне H_{cp} ;
- α – отношение коэффициента шероховатости нижней поверхности скопления льдин (n_l) к коэффициенту шероховатости русла (n_p).

Правая часть этого уравнения представляет собой функциональную связь между двумя переменными: уровнем воды и толщиной ледяного покрова. Если использовать различные значения ω и $t_{ск}$, то с помощью этого уравнения для участка $L_{ск}$, вычисляя $Q^2/\Delta H$, можно построить кривую [22]:

$$t_{ск} = f\left(H_{cp}, \frac{Q^2}{\Delta H}\right). \quad (2.22)$$

Используя имеющиеся данные о расходе и уровне воды на различных участках реки в разные периоды времени, мы оцениваем толщину ледяного покрова с помощью кривой. После проведения аналогичных расчётов для остальных участков реки мы определяем общую массу льда в заторах. Анализ уровней воды между створами позволяет оценить зоны затопления территорий, прилегающих к реке.

Апробацию методики проводилась на примере рек Лена, Северная Двина, Печора, Пинега и Ловать, используя многолетние данные наблюдений. Методика была проверена на предмет определения местоположения головы затора, динамики уровней выше головы затора и площади затопления прибрежных территорий.

Для проверки точности расчёта максимальных уровней выше затора льда использовались многолетние данные наблюдений на следующих участках: река Лена (от посёлка Витим до города Олёкминск) – восемь пунктов наблюдений за сорок лет; река Северная Двина (от села Медведки до села Усть-Пинега) – девять пунктов наблюдений за сорок лет; река Печора (от села

Якша до деревни Мутный Материк) – семь пунктов наблюдений за тридцать семь лет. Статистический анализ показал следующие среднеквадратические отклонения между наблюдаемыми и расчётными заторными уровнями для контрольных пунктов: река Северная Двина от $\pm 12\%$ до $\pm 30\%$, река Лена от $\pm 10\%$ до $\pm 25\%$, река Печора колеблется от $\pm 18\%$ до $\pm 29\%$. [22].

Важно учесть, что точность определения изменений затора, уровней воды выше затора и характеристик заторов существенно зависит от количества пунктов наблюдения за уровнями воды. Поэтому рекомендуется создание дополнительных временных гидрологических постов на затороопасных участках средних и крупных рек во время их вскрытия. Важно соблюдать установленное расстояние между постами, которое соответствует нормативам:

$$\Delta L = \frac{\sigma_{H_3}}{I_0}, \quad (2.23)$$

где σ_{H_3} – среднее квадратическое отклонение максимального заторного уровня от среднего значения в створе опорного гидрологического поста,

I_0 – уклон водной поверхности на участке между гидрологическими постами при свободном ото льда русле.

На средних реках это расстояние ориентировочно может составлять от 25 до 30 км, на больших реках – до 50 км.

Предложенная методика позволяет оперативно отслеживать динамику формирования ледяного затора за счёт анализа сдвигов направления изохрон на определённом участке реки. Это даёт возможность своевременно принимать решения и реализовывать меры по предотвращению заторных явлений, направленные на снижение их масштабов и интенсивности.

Используя данные за многие годы, полученные с использованием представленной методики, становится возможным проведение обоснованного

планирования противопаводковых мероприятий на участках реки, характеризующихся повышенной затороопасностью. Такой подход обеспечивает возможность прогнозирования потенциально опасных ситуаций и принятия превентивных мер по их предотвращению [22].

2.6 Методы прогноза максимальных заторных уровней на основе сетевых наблюдений

Методика прогноза максимальных заторных уровней и продолжительности стояния затора, основанная на данных сетевых наблюдений, разработана С.В. Шаночкин и В.М. Саковичем [23]. В результате проведенных исследований были получены регрессионные зависимости, которые характеризуются достаточной степенью обоснованности и готовы к внедрению в оперативную практику. Для повышения эффективности прогнозирования предлагается осуществлять систематические специальные наблюдения на характерных заторных участках, что позволит улучшить качество получаемых данных и точность прогнозируемых показателей.

Прогностическая схема основана на зависимости представлена в уравнении 2.24:

$$H_{\text{мах зтр}} = 0,88H_{\text{л-в}} + 0.21Q_{\text{Твскр}} + 266, \quad (2.24)$$

где $H_{\text{л-в}}$ – максимальный уровень при установлении ледостава у г. Великий Устюг;

$Q_{\text{Твскр}}$ – расход воды на дату вскрытия р. Сухоны у в/п Тотьма.

Основной датой для прогнозирования считается дата начала ледохода на реке Сухона в районе города Тотьма. Расчет расхода воды производится с использованием функциональной зависимости $Q = f(H)$ в период вскрытия водоема, при этом учитываются особенности ледовой обстановки, включая положение кромки льда. Прогноз, основанный на данной зависимости, имеет

заблаговременность в течение двух суток. Для повышения точности долгосрочного прогнозирования применяется усовершенствованная формула, в которой традиционный второй фактор заменён актуальными данными о толщине ледяного покрова [23]:

$$H_{\max \text{зтр}} = 1,53H_{\text{л-в}} - 2,41h_{\text{л}} + 541, \quad (2.25)$$

где $h_{\text{л}}$ – толщина ледяного покрова.

Уравнение прогноза, основанное на данных предикторах, представлено в уравнение 2.26:

$$H_{\max \text{зтр}} = 0,33H_{\text{л-в}} + 0,23Q_{T_{\text{вскр}}} + 5,87 \sum t^{\circ}_{\text{зтр}} + 1,44T_{\text{зтр}} + 236, \quad (2.26)$$

и характеризуется коэффициентом множественной корреляции $R=0,86$.

Добавление толщины льда в качестве дополнительного предиктора улучшает качество аппроксимации, и коэффициент множественной корреляции достигает значения $R = 0.88$. Если данные о суммарной температуре воздуха за период существования затора отсутствуют, можно использовать альтернативную зависимость (уравнение 2.27):

$$H_{\max \text{зтр}} = 0,81H_{\text{л-в}} + 0,25Q_{T_{\text{вскр}}} + 1,3T_{\text{зтр,час}} - 2,61h_{\text{л}} + 337, \quad (2.27)$$

Уравнение 2.27 оценивается коэффициентом множественной корреляции R , равным 0.82.

Для прогнозирования продолжительности стояния затора были разработаны два варианта регрессионных уравнений:

$$T_{\text{зтр}} = 0,28H_{\text{л-в}} + 0,38h_{\text{л}} + 0,98T_{\text{п.л-л.в}} - 1,7\sum -0^{\circ}_{\text{вскр}} - 2,6\sum^{\circ}_{\text{зтр}} - 2,5t^{\circ}_{\text{зтр}} + 7,4$$

$$T_{\text{зтр}} = 0,26H_{\text{л-в}} + 0,059H_{\text{подв}} + 0,98T_{\text{п.л-л.в}} - 1,8\sum -0^{\circ}_{\text{зтр}} T_{\text{вскр}} - 2,1t^{\circ}5_{\text{дн}} - 2,7\sum t^{\circ}_{\text{зтр}} + 5$$

- где $H_{л-в}$ – максимальный уровень воды в начальный период ледостава;
- $H_{подв}$ – уровень воды на момент первой подвижки льда в районе г. Великий Устюг;
- $Q_{Твскр}$ – расход воды на дату вскрытия р. Сухоны у г. Тотьмы;
- $\sum -0^{\circ}_{вскр}$ – сумма отрицательных значений температуры воздуха во время похолоданий за период от даты перехода через 0° к положительным значениям до даты вскрытия;
- $t^{\circ 5}_{дн}$ – средняя температура воздуха за 5 дней до вскрытия;
- $\sum t^{\circ}_{зтр}$ – сумма средних суточных значений температуры воздуха за период стояния затора;
- $T_{зтр}$ – продолжительность периода стояния затора в часах;
- $h_{л}$ – максимальная толщина льда;
- $T_{п.л.-л-в}$ – продолжительность осеннего ледохода (период от даты появления льда до даты ледостава) [23].

Коэффициенты множественной корреляции, равные 0.68 и 0.72, указывают на высокое качество уравнений. Это подтверждает обоснованность представленных регрессионных зависимостей, которые готовы к использованию в повседневной жизни. Для увеличения эффективности прогнозирования рекомендуется проводить систематические специальные наблюдения на проблемных участках и лабораторные эксперименты с использованием гидравлических моделей и полигонов. Этот комплекс мероприятий позволит изучить влияние метеорологических условий на физико-механические характеристики льда [23].

3 Разработка методики прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора в районе города Печора

3.1 Характеристика заторных участков

Процесс вскрытия льда на реке Печора имеет четко выраженную направленность – от истока к устью. В ходе движения ледового покрова в южном направлении наблюдается многократное прохождение через зоны ледостава, что приводит к формированию заторов и, как следствие, возможному существенному повышению уровня воды. На участке между Усть-Щугором и Троицко-Печорском ледовые заторы носят кратковременный характер и не приводят к серьёзным последствиям, поскольку вблизи берегов отсутствуют крупные населённые пункты. Однако важно учитывать, что в период весеннего половодья уровни воды здесь достигают максимальных значений на данном участке превышают показатели ледохода. Согласно данным гидрологического поста Усть-Кожва, в период вскрытия реки наблюдаются повышенные уровни воды, превышающие сток в результате регулярного формирования ледовых заторов. Данные явления фиксируются практически ежегодно на участке реки около села Соколово (расстояние от устья 854 – 847 км) и деревни Песчанка. Река Печора подразделяется на три основных участка в пределах от Усть-Щугора до Усть-Вои (протяженность 1038 – 998 км).

1) Первый исследуемый участок расположен от деревни Усть-Щугора до села Усть-Вои (1038 – 998 км). Гидрографические особенности реки включают выраженную возвышенность береговых склонов на протяжении течения. В районе населенного пункта Усть-Щугор осуществляется прорезка крайней западной гряды Урала. Береговая зона преимущественно представлена беспойменными участками. Пойменная территория развита локально, с шириной полосы не превышающей 1 км. На данном участке реки наблюдается

интенсивное меандрирование в слабо разработанной долине, где формируются обширные излучины. Преобладающий состав русла – галечно-каменистые отложения. Грунтовые массы характеризуются низкой степенью деформируемости.

2) Участок реки Печора от с. Усть-Воя до с. Усть-Кожва (998 – 872 км). Ширина поймы на данном участке достигает трех километров, имеется большое количество островов, а также многочисленные протоки и осередки. Характерны широкие песчано-гравелистые отмели. В этом месте присутствуют песчаные и галечные косы. Нечасто можно встретить высокие крутые берега. Грунт характеризуется низкой деформируемостью.

3) Участок реки Печора от села Усть-Кожва до села Соколово (872 – 846 км). На данном участке долина реки характеризуется расширением. Река отличается выраженной асимметрией долины: крутой левый берег контрастирует с обширной правобережной поймой (3 – 10 км). Террасы хорошо развиты, частично заболочены, с высотами 6 – 8 м и лугово-кустарниковой растительностью. Пойменный комплекс включает сеть стариц, протоков и озёр. Русло с песчано-гравийными отложениями обладает высокой подвижностью, что проявляется в активном формировании и размыве осередков, кос и мелей, а также возрастающей фрагментации русла (появление новых островов и рукавов).

На описываемом участке реки Печора имеется три порога: Кожвинский (862 км), Аранецкий (943 км), Щугорский (1037 км).

Согласно гидрологическим исследованиям, участок реки Печора в районе г. Печора является зоной регулярного формирования ледовых заторов и не имеет строго фиксированного положения. Этот отрезок речного русла обладает сложной морфологией с множеством островов и разветвлённых протоков (местное название «шары»). Анализ заторообразования выявил устойчивую закономерность: боковые протоки (шары) вскрываются ото льда на несколько дней/недель раньше основного русла. Критические участки

формирования заторов приурочены к зонам с особыми морфологическими условиями:

1. На первом участке, расположенном у ж/д моста (874 км), отмечается сужение речного русла. В полутора километрах вниз по течению от моста находится остров Середовой, возле которого протекает Кожвинская протока, огибающая остров Медлапевди. Для наглядности приведена схема участка реки Печора на рисунке 3.1.

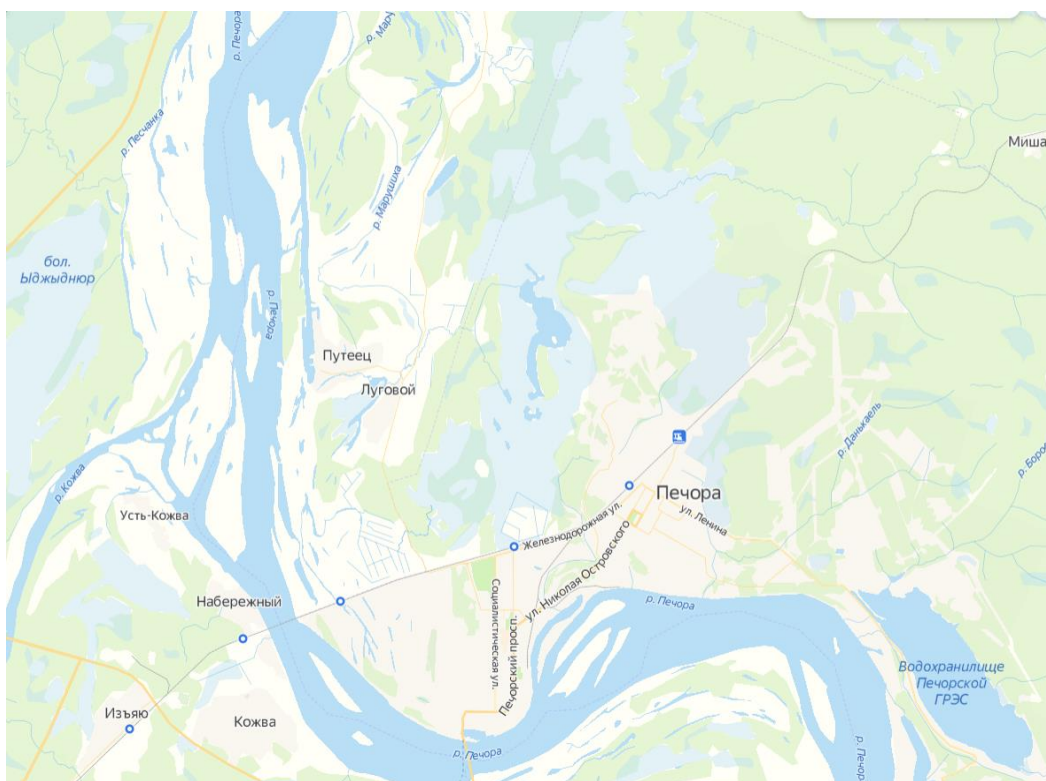


Рисунок 3.1 – Участок реки Печора от ж/д моста до островов

2. Выше места впадения Марушкурьи (отметка 864 км) в главное русло реки образуется сужение длиной от четырех до пяти километров. На отметке 862 км находится Кожвинский порог. В окрестностях села Песчанка располагаются островные образования: Большой Кипради, Лыханди и остров Малый Кипради,, отделённый от основного русла протокой Лыхан Шар. Для наглядности схема второго участка от места впадения до с. Песчанка представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Участок реки от места впадения Марушкурьи до с. Песчанка

3. Остров Конканди, лежащий ниже по течению перед с. Соколово, делит реку на основное русло и протоку Конкан Шар. Схема третьего участка реки Печора представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Участок реки Печора от с. Песчанка до с. Соколово

4. На участке реки Печора ниже села Соколово до деревни Уляшово расположена группа островов. Важно отметить, что ледовые заторы, образующиеся в зоне Уляшовских перекатов, не создают угрозы для населенных пунктов. Гидрографическая схема данного участка (четвертый участок русла Печоры) приведена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 – Участок реки Печора от с. Соколово до д. Уляшово

3.2 Исходные данные для методики прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора

Река Печора является одним из наиболее изученных водных объектов в гидрологическом плане. С 1910 года на её территории функционировало 30 постов, на которых проводились стационарные водомерные наблюдения, причём история мониторинга началась ещё в 1895 году с открытия первых постов в сёлах Усть-Кожва и Усть-Уса. На данный момент сеть наблюдений сократилась до десяти действующих гидрологических постов. На рисунке 3.5 показана схема расположения ГП р.Печора:

Водомерный пост Усть-Кожва находится на левом берегу, оборудован деревянными и металлическими сваями. Перекатов вблизи поста нет. Во время весеннего паводка при $H=800$ см затопляется территория речного порта и затона «Печора», при $H>700-750$ см затопляется поселок «Путеец», при $H>900$ см – макаронная фабрика, предприятия левого берега и промкомбинат. Наблюдения ведутся только за H (уровень воды). Для прогнозирования подъёма уровня воды при заторах и оценки интенсивности заторных процессов необходимо установить функциональную зависимость расхода воды от уровня $Q = f(H)$. Среди ближайших соседних стоковых водпостов можно выделить Усть-Щугор, удаленный от устья на 1036 километров и площадью водосбора 67500 км², а также Конецбор, расположенный выше по течению на расстоянии от устья 939 километров, площадью водосбора 71500 км², данный водпост был открыт в 1980 году.

Образование ледовых заторов обусловлено сочетанием нескольких причин, но основное влияние оказывают три критических фактора: запаздывающее вскрытие льда на нижних участках реки, прохождение паводочной волны с повышенными расходами воды и усиленными скоростными характеристиками потока, а также наличие мощного ледяного покрова с высокой механической прочностью.

В связи с этим для усовершенствования методики прогноза исходные данные включают информацию об уровне и ледовом режиме ближайших гидрологических постов. В данной магистерской диссертации использовались данные наблюдений с водпостов Усть-Щугор и Усть-Кожва за период с 1921 по 2023 год взятые из Гидрологических ежегодников и фондовых таблиц Коми ЦГМС Печора:

- даты очищения ото льда; максимальные уровни весеннего половодья;
- максимальные уровни в период образования ледостава;
- минимальные уровни в зимний период (с 1 января до вскрытия);
- даты появления и уровни воды при появлении закраин;
- средние уровни за первые 5 дней ледостава;

- даты вскрытия и уровень воды при вскрытии;
- максимальная толщина льда;
- сумма температур от даты перехода через 0 °С до даты вскрытия;
- даты перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С;
- даты подъема уровня (> 10 см/сут.; > 20 см/сут.);
- максимальные снегозапасы за зиму и др.
- даты начала подвижки льда и уровни при подвижке;
- даты максимального уровня ледохода и максимальные уровни при ледоходе;

Данные, взятые из Гидрологических ежегодников и фондовых таблиц Коми ЦГМС Печора представлены в приложение А.

3.3 Методика прогноза максимальных заторных уровней

В ходе начальной стадии разработки методики проведен анализ корреляционных зависимостей между гидрологическими характеристиками. Были построены графики взаимосвязи максимальных уровней весеннего ледохода (с учетом заторных пиков) на гп Усть-Кожва ($H_{\max \text{ лдх. У.-К.}}$) с уровнями вскрытия ($H_{\text{вскр. У.-Щ.}}$) и максимальными ледоходными уровнями на посту Усть-Щугор ($H_{\max \text{ лдх. У.-Щ.}}$), представленные на рисунках 3.6 и 3.7, где отмечается существенный разброс экспериментальных данных. На рисунке 3.8 представлена зависимость между максимальными ледоходными уровнями в Усть-Кожве ($H_{\max \text{ лдх. У.-К.}}$) и уровнями вскрытия в этом же створе ($H_{\text{вскр. У.-К.}}$), демонстрирующая определенную тенденцию в распределении точек. Дополнительно на рисунках 3.9 и 3.10 показаны графики корреляции максимальных ледоходных уровней в Усть-Кожве с расходами воды при вскрытии для гидропостов Усть-Щугор и Усть-Кожва соответственно. В приложение А приведены использованные для анализа исходные данные.

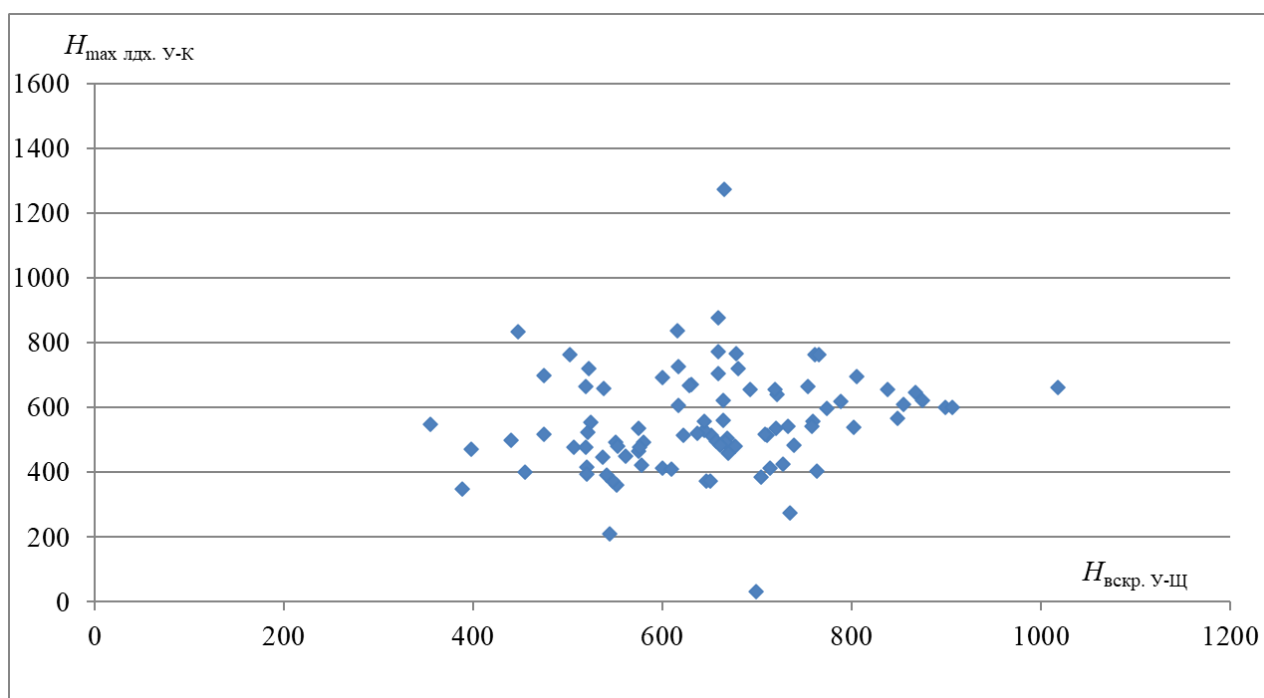


Рисунок 3.6 – Зависимость максимального уровня воды в Усть-Кожве в период ледохода от уровня воды при вскрытии льда в Усть-Щугоре

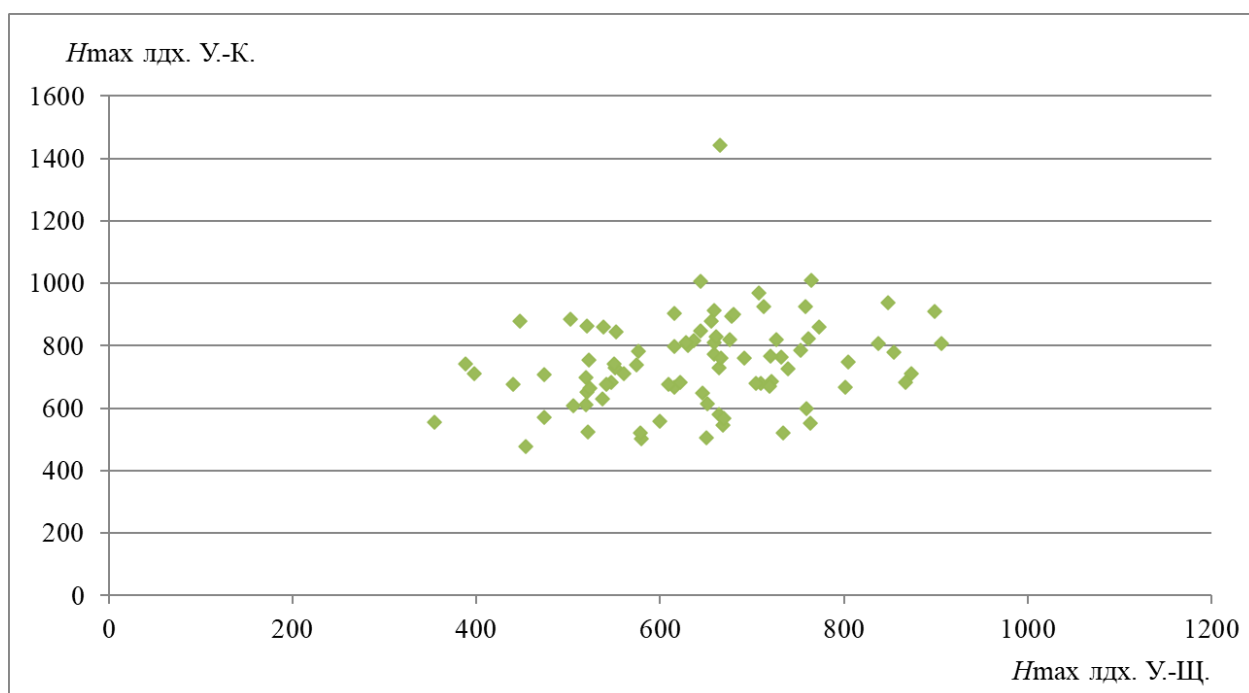


Рисунок 3.7 – Зависимость максимального уровня воды в период ледохода на Усть-Кожве с уровнем воды в период ледохода на Усть-Щугоре

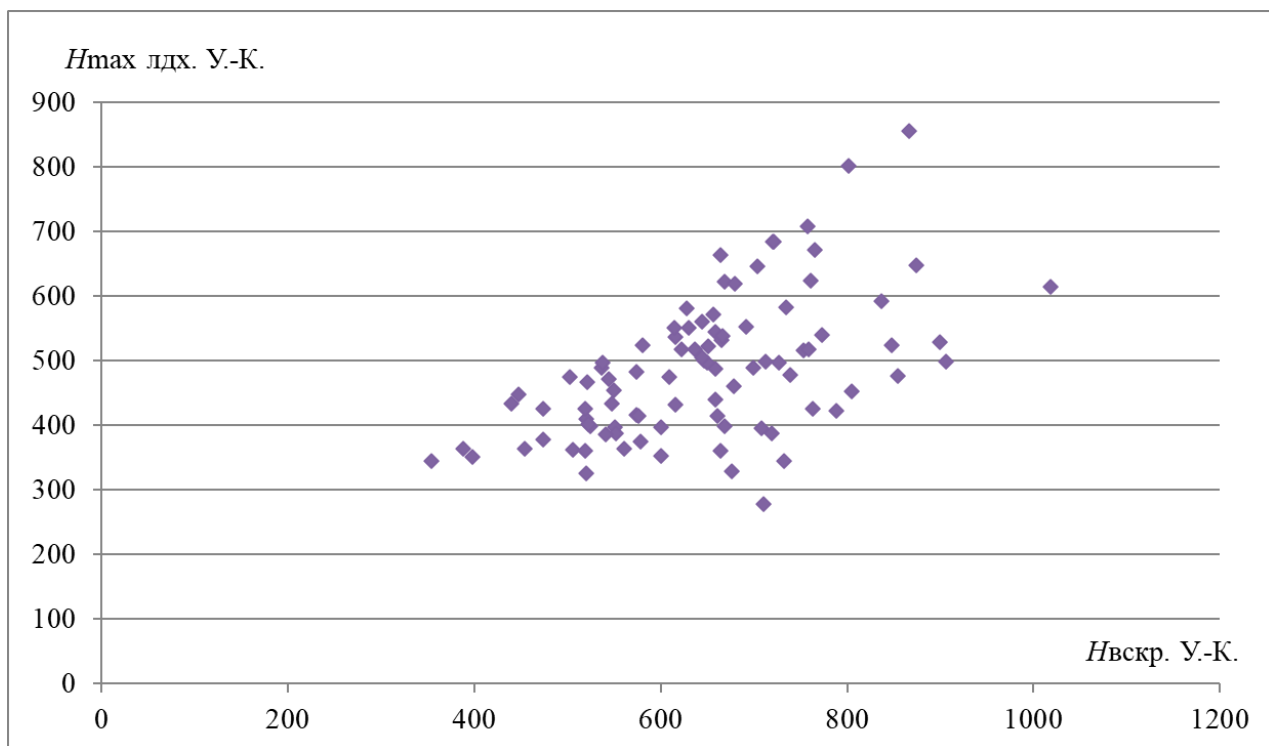


Рисунок 3.8 – Зависимость максимального уровня воды в период ледохода от уровня вскрытия льда в створе Усть-Кожва

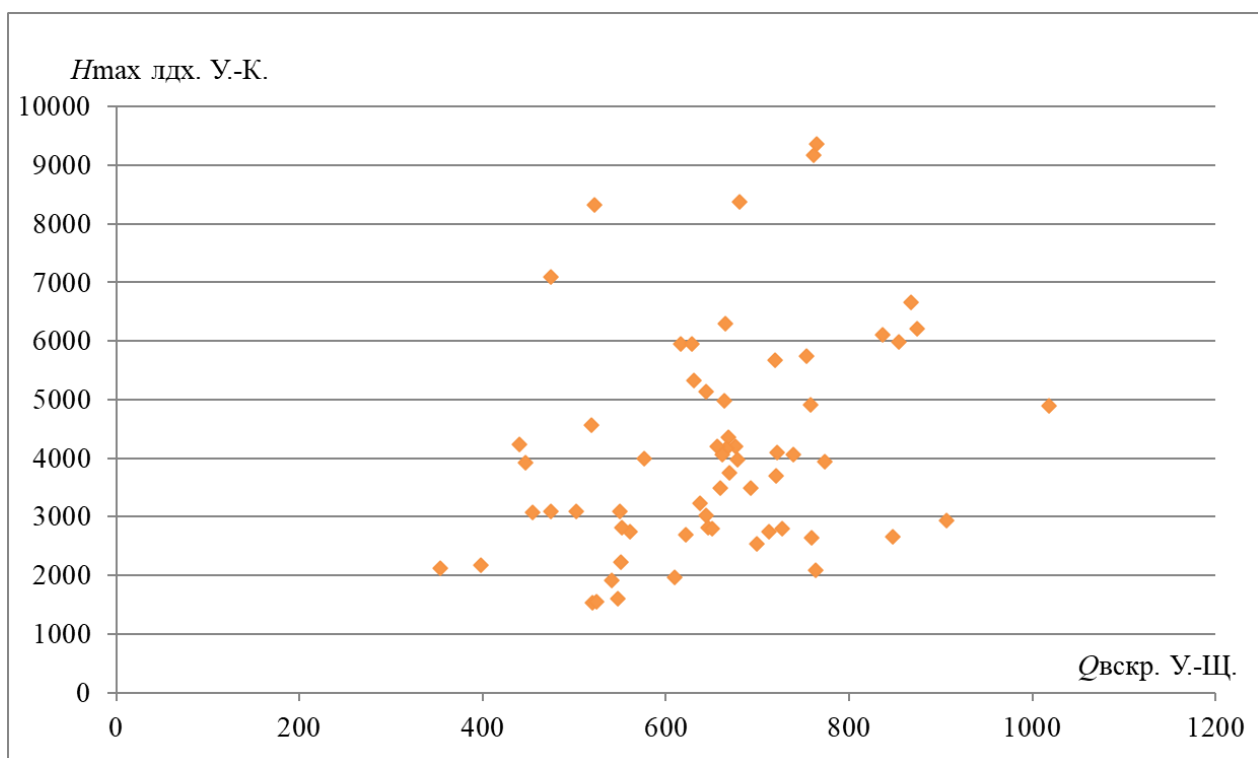


Рисунок 3.9 – Зависимость максимального уровня воды при ледоходе в Усть-Кожве от расхода воды при вскрытии льда в Усть-Щугоре

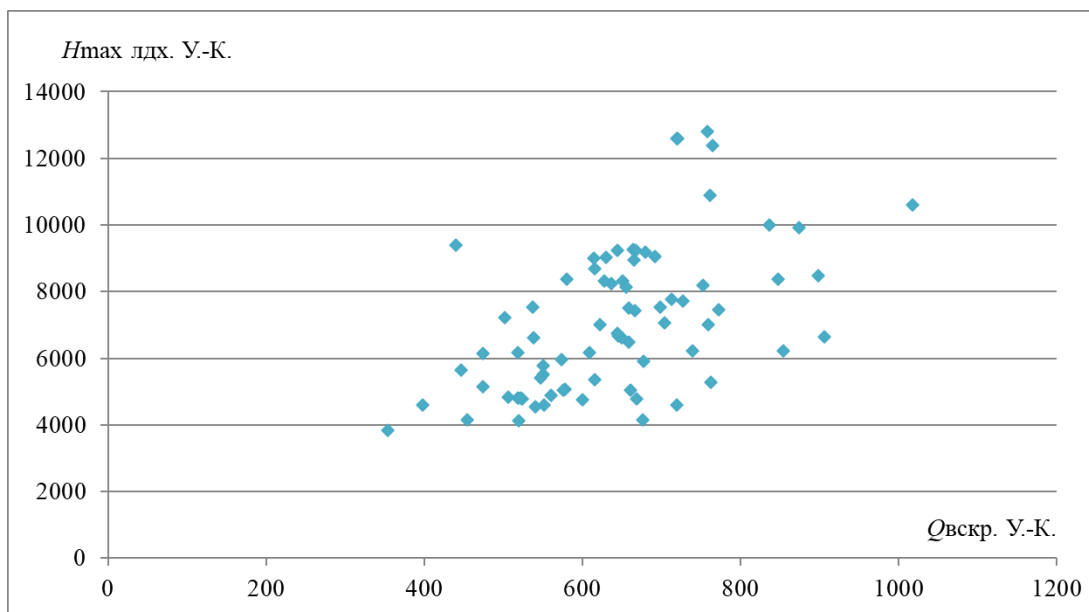


Рисунок 3.10 – Зависимость максимального уровня воды при ледоходе от расхода воды при вскрытии льда (створ Усть-Кожва)

Анализ показал наиболее тесную взаимосвязь между максимальными уровнями при ледоходе в Усть-Кожве и расходами воды в Усть-Щугоре в момент вскрытия реки в районе Усть-Кожвы (рисунок 3.10). Установленные корреляционные зависимости были математически аппроксимированы как степенной, так и экспоненциальной функциями.

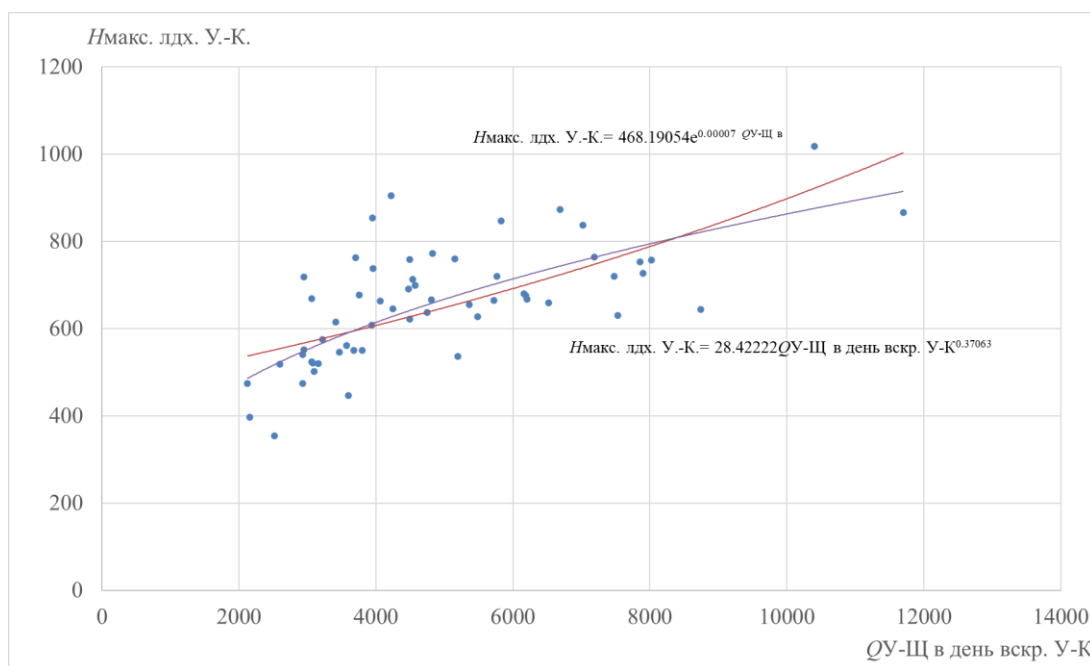


Рисунок 3.11 – Зависимость максимального уровня ледохода в Усть-Кожве от расхода воды в Усть-Щугоре в день вскрытия льда в Усть-Кожве

Исследование, основанное на ретроспективном анализе за 62-летний период (1955 –2016 гг.), продемонстрировало работоспособность методики через верификацию двух видов регрессионных зависимостей – экспоненциальной и степенной. Достоверность прогнозов подтверждается значениями S/σ на уровне 0.79 и 0.73.

В Приложении Б содержатся исходные данные и прогнозные расчеты, а визуальное сопоставление фактических и расчетных показателей представлено на рисунке 3.11.

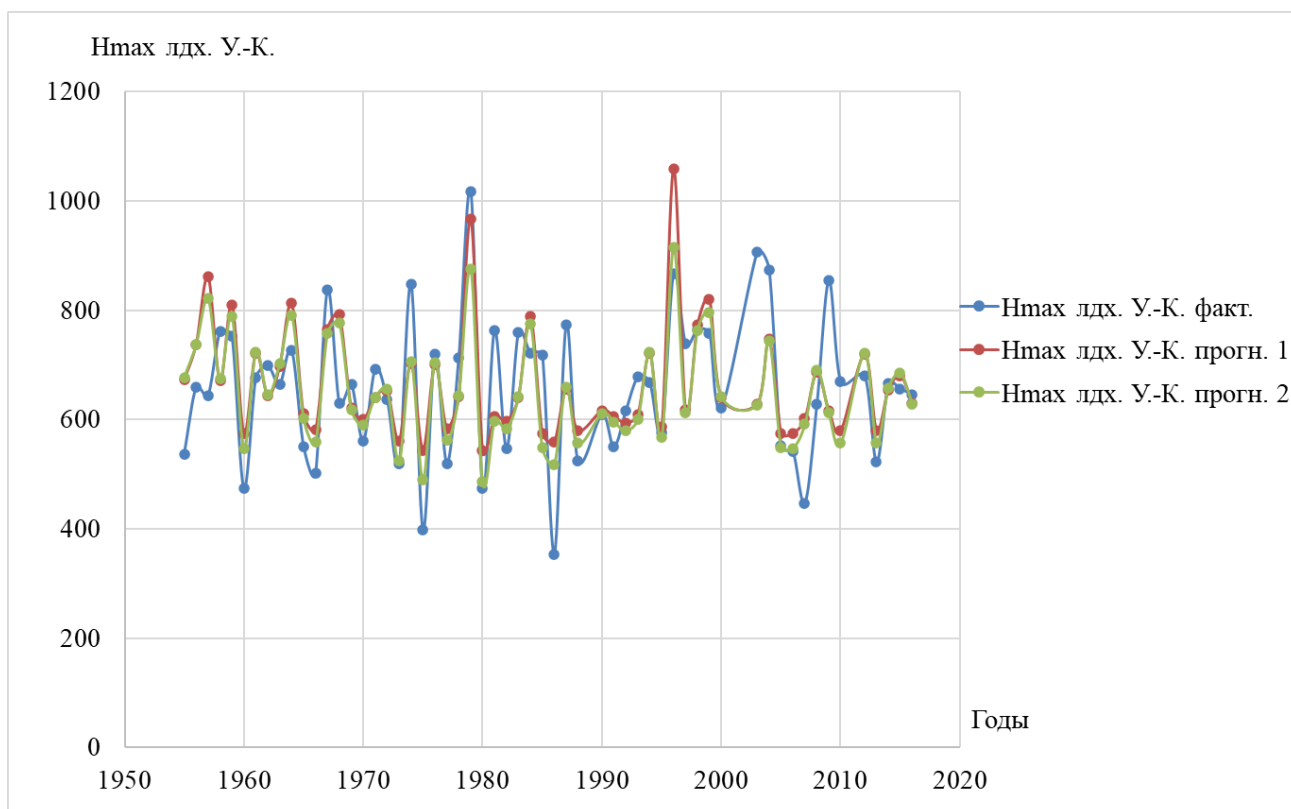


Рисунок 3.12 – Сравнение фактических и прогнозируемых максимальных уровней воды при ледоходе на гидрологическом посту Усть-Кожва в различные годы

Статистическая оценка независимых данных (2017 – 2023 гг.) показала, что прогнозные значения (таблица 3.1) подтверждаются лишь в 57% случаев, что указывает на необходимость доработки методики для повышения её надёжности.

Таблица 3.1 – Итоговый результат проверки методики на независимом материале (2017 – 2023 гг.)

Год	$H_{\text{махлдж. У.-К. факт.}}$	$H_{\text{мах лдж. У.-К. прогн.}}$		Ошибка прогноза		Оправдываемость	
		эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.
2017	440	595	581	-155	-141	-	-
2018	650	628	627	22	23	+	+
2019	661	586	567	75	94	+	-
2020	644	632	632	12	12	+	+
2021	454	566	532	-112	-78	-	+
2022	538	628	627	-90	-89	-	-
2023	600	579	555	21	45	+	+

3.4 Использование методов многомерной статистики для совершенствования методик прогнозирования

Учитывая недостаточную эффективность традиционных подходов, в исследовании были применены дискретно-непрерывные модели, основанные на методах многомерного статистического анализа. Данные модели особенно продуктивны при обработке гетерогенных данных, требующих разделения на кластеры с принципиально разными зависимостями между предикторами (влияющими факторами) и предиктантом (прогнозируемым параметром).

Процесс построения таких моделей состоит из двух последовательных этапов: сначала кластеризация данных методами дискретного анализа для выявления структурной неоднородности, затем построение индивидуальных регрессионных уравнений для каждого однородного кластера.

Для реализации методов использовался специализированный программный комплекс *STATISTICA*. Основными достоинствами этого подхода являются возможность многокритериального разделения объектов по комплексу признаков, отсутствие ограничений на тип обрабатываемых данных и способность работать с информационными массивами любой природы.

3.4.1 Метод k – средних

Метод k-средних, являющийся дивизивным подходом к кластеризации, позволяет разделить данные на заранее заданное количество однородных групп (m кластеров), при этом обеспечивая возможность получения различных решений за счет изменения числа кластеров и перераспределения предикторов между ними с последующим сравнением результатов. Практическая реализация данного метода в программной среде *Statistica* начинается с инициализации m случайно выбранных кластерных центров. Далее алгоритм последовательно выполняет итерационный процесс перераспределения объектов между кластерами, направленный на достижение двух взаимосвязанных целей: минимизацию вариабельности внутри каждого кластера и одновременное усиление различий между разными кластерами. Начальный этап предполагает случайное определение позиций центроидов в многомерном пространстве признаков, после чего осуществляется расчет расстояний между этими центрами и каждым объектом набора данных с последующим отнесением объектов к ближайшим кластерам. После завершения распределения рассчитываются средние значения по всем переменным для каждого кластера - k показателей, которые становятся новыми координатами центров. Процесс повторного вычисления расстояний и перераспределения объектов продолжается до тех пор, пока позиции центров кластеров не стабилизируются.

Перед выполнением кластерного анализа необходимо провести стандартизацию переменных. В исследовании рассматривались двенадцать факторов, влияющих на уровень воды при ледоходе в Усть-Кожве за период 1955-2023 годов (таблица 3.2), а в таблице 3.3 представлены соответствующие стандартизированные значения этих параметров.

Таблица 3.2 – Исходные данные для кластеризации методом к-средних

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_o до $D_{\text{вскр.}}$
1955	488	446	7540	—	5200	255	—	-631	76.5	25	26	88.9
1956	440	706	6480	3500	6520	166	—	-2715	145	41	44	65.2
1957	560	530	9240	3030	8740	225	—	-2446	142	32	33	95.8
1958	624	764	10900	9170	5150	278	—	-2462	238	38	41	59.3
1959	516	666	8180	5740	7860	274	—	-2147	198	36	37	88.9
1960	425	518	6150	3090	2930	240	—	-2845	229	31	38	19.9
1961	328	482	4160	4210	6190	285	—	-1870	247	46	47	40.8
1962	488	32	7540	2540	4570	291	—	-1826	218	15	18	81.8
1963	532	1273	8950	6300	5720	267	—	-2583	237	32	34	53.3
1964	496	426	7710	2800	7900		—	-2702	242	44	47	65.2
1965	396	360	5520	2230	3800	137	—	-2199	146	35	36	46.5
1966	474	764	7230	3100	3100	256	285	-2985	251	29	31	9.5
1967	592	657	10000	6110	7020	215	117	-2182	256	22	23	97.1
1968	551	673	9020	5320	7530	231	265	-1764	180	38	39	63.7
1969	361	561	9260	4990	4060	172	235	-3492	136	50	51	35.9
1970	364	449	4880	2750	3570	203	234	-2168	158	43	43	43.7
1971	552	656	9050	3490	4480	263	251	-2284	153	46	47	43.7
1972	518	522	8230	3240	4750	293	287	-2467	227	53	54	46.2

Продолжение таблицы 3.2

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_0 до $D_{\text{вскр.}}$
1973	426	665	6170	4570	2600	290	310	-2353	263	16	21	28.6
1974	524	568	8380	2660	5830	262	367	-2201	232	38	39	29.5
1975	350	472	4600	2170	2160	258	280	-2182	230	18	19	15.5
1976	684	538	12600	3700	5770	286	305	-2248	258	33	35	40.4
1977	325	396	4120	1530	3160	240	308	-2338	188	27	28	89.3
1978	498	415	7760	2750	4540	326	363	-2110	306	48	51	20.2
1979	614	663	10600	4900	10400	289	333	-2880	203	35	36	71.9
1980	378	701	5160	7090	2120	195	213	-2268	203	26	26	40.6
1981	426	404	5268	2090	3700	318	396	-1780	160	38	38	50.7
1982	434	374	5412	1610	3470	260	260	-2198	237	29	30	74.2
1983	517	557	7020	2640	4490	333	326	-1854	307	20	27	41.6
1984	684	640	12600	4090	7480	305	401	-1586	217	39	40	51.5
1985	388	656	4584	5670	2950	225	245	-2972	154	35	37	16.8
1986	344	550	3824	2130	2520	307	258	-2281	230	29	31	28.9
1987	539	599	7460	3950	4830	215	270	-2536	185	37	39	69.5
1988	399	555	4782	1550	3060	201	251	-2125	157	38	40	21.3
1989	523	435	7140	2110	4580	273	294	-2041	188	40	42	83.1
1990	475	409	6180	1960	3940	302	351	-2115	220	21	25	111

Продолжение таблицы 3.2

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_o до $D_{\text{вскр.}}$
1991	454	494	5776	3090	3680	300	336	-2406	246	16	21	54.6
1992	431	728	5358	5950	3410	231	313	-2106	195	39	40	75.8
1993	461	767	5909	3980	3760	378	380	-2187	296	35	37	57.2
1994	622	507	9244	4350	6210	242	232	-2237	237	29	31	30.5
1995	414	479	5052	3990	3220	258	270	-1585	222	11	15	99.5
1996	855	647	—	6670	11700	251	—	-2106	227	37	38	70.5
1997	477	485	6220	4060	3960	263	263	-2157	213	21	21	45.9
1998	671	763	12400	9360	7190	320	258	-2904	220	45	45	71.2
1999	707	544	12800	4910	8020	276	270	-2890	195	34	36	25.1
2000	517	516	7020	2690	4490	266	—	-1869	205	21	21	68.1
2001	409	437	4962	3480	3160	231	282	-2522	189	23	25	52.3
2002	356	274	4022	1310	2630	255	345	-2406	249	30	31	93.4
2003	498	601	6640	2930	4220	273	334	-2617	315	32	40	58.9
2004	648	622	9920	6210	6690	293	297	-1864	260	42	45	15
2005	388	482	4584	2810	2950	174	—	-2155	137	30	31	55.8
2006	386	391	4548	1910	2930	250	304	-1930	178	39	41	27.5
2007	447	836	5646	3920	3600	307	302	-2004	283	22	23	631
2008	580	668	8320	5960	5490	322	340	-1733	254	44	45	27.1

Продолжение таблицы 3.2

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_o до $D_{\text{вскр.}}$
2009	476	609	6220	5980	3950	257	274	-1720	190	43	44	45.2
2010	399	461	4782	3760	3060	257	300	-2831	238	24	25	40.9
2011	396	589	4782	5640	3030	194	185	-2155	142	15	26	70.2
2012	619	722	9178	8380	6160	199	183	-1798	166	21	23	41.2
2013	401	720	4818	8330	3080	246	247	-2508	174	23	29	52.2
2014	538	493	7440	4160	4810	246	283	-2005	281	24	26	20
2015	572	497	8144	4210	5360	297	310	-1834	277	33	35	66.7
2016	500	375	6680	2820	4250	221	—	-1663	215	17	20	66.8
2017	433	499	9394	4240	3430	307	273	-2190	223	37	38	15
2018	497	373	6620	2800	4210	316	322	-1671	224	42	44	37.7
2019	414	485	5052	4060	3220	329	299	-1784	268	34	38	47.2
2020	504	559	6760	5140	4310	343	392	-1401	310	23	36	71.9
2021	364	401	4158	3080	2710	193	291	-2435	200	15	21	89.4
2022	497	658	6620	6900	4210	258	357	-1971	272	29	30	32
2023	397	692	4746	7670	3040	295	295	-1894	260	32	33	

Таблица 3.3 – Стандартизированные переменные

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	$S_{\text{тах}}$ (У-Щ)	$S_{\text{тах}}$ (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_0 до $D_{\text{вскр.}}$
1955	0.015493	-0.68237	0.226824		0.267754	-0.13986		3.527383	-2.87227	-0.67476	-0.87421	0.368277
1956	-0.44679	0.911184	-0.23758	-0.35015	0.945735	-2.0463		-1.17685	-1.47472	0.936254	1.070989	0.04908
1957	0.708911	-0.16753	0.97163	-0.59594	2.085976	-0.78248		-0.56857	-1.54215	0.030056	-0.11774	0.461208
1958	1.325283	1.266669	1.698911	2.615032	0.242072	0.352811		-0.60536	0.417288	0.634188	0.746789	-0.03038
1959	0.285156	0.666023	0.507222	0.821278	1.633989	0.267128		0.105177	-0.38774	0.432811	0.314522	0.368277
1960	-0.59125	-0.24108	-0.38216	-0.56457	-0.89817	-0.46117		-1.46892	0.249745	-0.07063	0.422589	-0.56103
1961	-1.52544	-0.46172	-1.25402	0.021149	0.77624	0.502755		0.729941	0.619565	1.439697	1.395188	-0.27955
1962	0.015493	-3.21979	0.226824	-0.85219	-0.05583	0.631279		0.830156	0.012733	-1.68165	-1.73874	0.272653
1963	0.439249	4.386352	0.844575	1.114136	0.534837	0.117184		-0.87937	0.398899	0.030056	-0.00968	-0.11119
1964	0.092539	-0.80495	0.301305	-0.71622	1.654534			-1.14638	0.513319	1.23832	1.395188	0.04908
1965	-0.87054	-1.20946	-0.65818	-1.01431	-0.45132	-2.6675		-0.01061	-1.45225	0.332122	0.206456	-0.20278
1966	-0.11934	1.266669	0.091007	-0.55934	-0.81085	-0.11844	-0.11912	-1.78559	0.701293	-0.27201	-0.33388	-0.7011
1967	1.017097	0.610861	1.304602	1.014774	1.202546	-0.99669	-3.18919	0.025953	0.803454	-0.97683	-1.19841	0.478716
1968	0.622234	0.708926	0.875243	0.601635	1.464493	-0.65396	-0.48461	0.969193	-0.75551	0.634188	0.530655	0.028877
1969	-1.20762	0.022473	0.980392	0.429058	-0.31778	-1.91778	-1.03283	-2.92971	-1.66474	1.842452	1.827455	-0.34554
1970	-1.17873	-0.66398	-0.93858	-0.74237	-0.56945	-1.25374	-1.05111	0.05823	-1.20706	1.137631	0.962922	-0.24049
1971	0.631865	0.604732	0.888387	-0.35538	-0.10205	0.031501	-0.74044	-0.20292	-1.30513	1.439697	1.395188	-0.24049
1972	0.304417	-0.21656	0.529128	-0.48612	0.036624	0.674121	-0.08257	-0.61754	0.210924	2.144518	2.151655	-0.20682
1973	-0.58162	0.659894	-0.3734	0.209415	-1.06766	0.609859	0.337735	-0.35978	0.940349	-1.58096	-1.41454	-0.44386
1974	0.362202	0.065376	0.594846	-0.78944	0.591336	0.01008	1.379366	-0.01625	0.300825	0.634188	0.530655	-0.43174
1975	-1.31356	-0.52301	-1.06125	-1.04569	-1.29366	-0.0756	-0.21049	0.027533	0.27222	-1.37958	-1.63068	-0.62029

Продолжение таблицы 3.3

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежим,декост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_0 до $D_{\text{вскр.}}$
1976	1.903131	-0.11849	2.443717	-0.24556	0.560518	0.524176	0.246364	-0.12189	0.838188	0.130745	0.098389	-0.28493
1977	-1.55433	-0.98882	-1.27155	-1.38038	-0.78004	-0.46117	0.301186	-0.32593	-0.5941	-0.47339	-0.65808	0.373664
1978	0.111801	-0.87237	0.323211	-0.74237	-0.07124	1.381002	1.306269	0.188915	1.810754	1.641075	1.827455	-0.55699
1979	1.228975	0.647636	1.567475	0.381992	2.938589	0.588438	0.758042	-1.5495	-0.29375	0.332122	0.206456	0.139317
1980	-1.0439	0.880539	-0.8159	1.527275	-1.3142	-1.4251	-1.43487	-0.16793	-0.29375	-0.57408	-0.87421	-0.28224
1981	-0.58162	-0.93979	-0.76859	-1.08753	-0.50268	1.209637	1.909319	0.934885	-1.16415	0.634188	0.422589	-0.14621
1982	-0.50457	-1.12366	-0.7055	-1.33855	-0.62081	-0.03276	-0.57598	-0.00835	0.398899	-0.27201	-0.44194	0.170294
1983	0.294786	-0.00204	-0.001	-0.7999	-0.09692	1.530947	0.630123	0.767634	1.829143	-1.17821	-0.76614	-0.26877
1984	1.903131	0.506668	2.443717	-0.04161	1.438812	0.931169	2.00069	1.372987	-0.00974	0.734877	0.638722	-0.13543
1985	-0.94759	0.604732	-1.06826	0.784671	-0.8879	-0.78248	-0.85009	-1.75535	-1.28879	0.332122	0.314522	-0.60278
1986	-1.37134	-0.04495	-1.40123	-1.06661	-1.10875	0.97401	-0.61253	-0.19682	0.268134	-0.27201	-0.33388	-0.43982
1987	0.506664	0.255377	0.191775	-0.11482	0.077713	-0.99669	-0.39323	-0.77283	-0.66357	0.5335	0.530655	0.106993
1988	-0.84165	-0.0143	-0.98151	-1.36993	-0.8314	-1.29658	-0.74044	0.154382	-1.23771	0.634188	0.638722	-0.54218
1989	0.352571	-0.74979	0.051576	-1.07707	-0.05069	0.245708	0.045347	0.344429	-0.59819	0.835565	0.854855	0.290161
1990	-0.10971	-0.90914	-0.36902	-1.15551	-0.37941	0.866907	1.086979	0.176953	0.0679	-1.07752	-0.98228	0.665925
1991	-0.31195	-0.38817	-0.54602	-0.56457	-0.51295	0.824065	0.812865	-0.47873	0.595047	-1.58096	-1.41454	-0.09368
1992	-0.53346	1.046023	-0.72916	0.9311	-0.65163	-0.65396	0.392558	0.197267	-0.4572	0.734877	0.638722	0.191843
1993	-0.24454	1.285056	-0.48775	-0.09913	-0.47186	2.494877	1.616931	0.014668	1.618693	0.332122	0.314522	-0.05867
1994	1.306021	-0.3085	0.973383	0.094364	0.786512	-0.41833	-1.08766	-0.09728	0.398899	-0.27201	-0.33388	-0.41827

Продолжение таблицы 3.3

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	$S_{\text{тах}}$ (У-Щ)	$S_{\text{тах}}$ (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_o до $D_{\text{вскр.}}$
1995	-0.69719	-0.48011	-0.86322	-0.0939	-0.74922	-0.0756	-0.39323	1.37389	0.090375	-2.08441	-2.06294	0.51104
1996	3.549999	0.549571		1.307631	3.606298	-0.22555		0.198847	0.194578	0.5335	0.422589	0.120461
1997	-0.09045	-0.44333	-0.3515	-0.05729	-0.36914	0.031501	-0.52115	0.084186	-0.08534	-1.07752	-1.41454	-0.21086
1998	1.777931	1.26054	2.356093	2.714394	1.289862	1.252478	-0.61253	-1.60254	0.049511	1.339009	1.179055	0.129889
1999	2.12464	-0.08172	2.531341	0.387221	1.716168	0.30997	-0.39323	-1.57026	-0.44495	0.231434	0.206456	-0.491
2000	0.294786	-0.25333	-0.001	-0.77375	-0.09692	0.095763		0.732198	-0.24471	-1.07752	-1.41454	0.088138
2001	-0.74534	-0.73753	-0.90265	-0.36061	-0.78004	-0.65396	-0.17394	-0.74078	-0.58388	-0.87614	-0.98228	-0.12466
2002	-1.25577	-1.73656	-1.31449	-1.49544	-1.05226	-0.13986	0.977333	-0.47986	0.660429	-0.17132	-0.33388	0.428884
2003	0.111801	0.267635	-0.16748	-0.64824	-0.2356	0.245708	0.776317	-0.95453	2.008945	0.030056	0.638722	-0.03577
2004	1.556422	0.396345	1.269552	1.06707	1.033051	0.674121	0.10017	0.745063	0.885182	1.036943	1.179055	-0.62703
2005	-0.94759	-0.46172	-1.06826	-0.711	-0.8879	-1.87494		0.087572	-1.63818	-0.17132	-0.33388	-0.07752
2006	-0.96685	-1.01946	-1.08403	-1.18166	-0.89817	-0.24697	0.22809	0.595644	-0.80046	0.734877	0.746789	-0.45867
2007	-0.37937	1.70796	-0.60298	-0.13051	-0.55404	0.97401	0.191541	0.428845	1.336731	-0.97683	-1.19841	7.669406
2008	0.901527	0.678281	0.568559	0.936329	0.416704	1.29532	0.885962	1.040291	0.760546	1.23832	1.179055	-0.46406
2009	-0.10008	0.316667	-0.3515	0.946789	-0.37427	-0.09702	-0.32014	1.069408	-0.54506	1.137631	1.070989	-0.22028
2010	-0.84165	-0.59043	-0.98151	-0.21418	-0.8314	-0.09702	0.154993	-1.43845	0.433633	-0.77545	-0.98228	-0.2782
2011	-0.87054	0.194086	-0.98151	0.768982	-0.84681	-1.44652	-1.94654	0.087572	-1.52784	-1.68165	-0.87421	0.116421
2012	1.277129	1.009249	0.944467	2.201893	0.760831	-1.33942	-1.98309	0.892903	-1.03952	-1.07752	-1.19841	-0.27416
2013	-0.82239	0.996991	-0.96574	2.175745	-0.82113	-0.33265	-0.81354	-0.70941	-0.8781	-0.87614	-0.55001	-0.12601
2014	0.497033	-0.3943	0.183012	-0.005	0.067441	-0.33265	-0.15567	0.426362	1.314255	-0.77545	-0.87421	-0.55968
2015	0.824481	-0.36979	0.491449	0.021149	0.349933	0.759803	0.337735	0.811196	1.224354	0.130745	0.098389	0.069282

Продолжение таблицы 3.3

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	$S_{\text{тах}}$ (У-Щ)	$S_{\text{тах}}$ (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_o до $D_{\text{вскр.}}$
2016	0.131063	-1.11753	-0.14996	-0.70577	-0.22019	-0.86817		1.199191	-0.03426	-1.48027	-1.52261	0.070629
2017	-0.5142	-0.35753	1.039101	0.036838	-0.64136	0.97401	-0.33841	0.008799	0.121023	0.5335	0.422589	-0.62703
2018	0.10217	-1.12979	-0.17625	-0.71622	-0.24073	1.166796	0.557026	1.180231	0.137369	1.036943	1.070989	-0.3213
2019	-0.69719	-0.44333	-0.86322	-0.05729	-0.74922	1.445264	0.136718	0.924277	1.048639	0.231434	0.422589	-0.19335
2020	0.169586	0.010215	-0.11491	0.507502	-0.18937	1.745154	1.836222	1.789647	1.892483	-0.87614	0.206456	0.139317
2021	-1.17873	-0.95817	-1.2549	-0.5698	-1.01117	-1.46795	-0.00948	-0.54329	-0.34891	-1.68165	-1.41454	0.375011
2022	0.10217	0.61699	-0.17625	1.427912	-0.24073	-0.0756	1.196624	0.502426	1.128324	-0.272388	-0.43968	-0.39807
2023	-0.86091	0.825378	-0.99729	1.830591	-0.84167	0.716962	0.063621	0.677351	0.881096	0.034049	-0.11111	

На рисунке 3.13 отображены усреднённые показатели для пяти выделенных кластеров, объединяющих схожие объекты. Эффективность кластеризации оценивается по степени различий между кластерами – в данном случае близкое расположение линий средних значений для кластеров 1 и 4, а также 2 и 3 свидетельствует об их сходстве, что обосновывает возможность уменьшения количества кластеров до трёх. После повторного разделения (рисунок 3.14) межкластерные расстояния возрастают, однако для отдельных предиктантов (например, между кластерами 1 и 3) различия остаются незначительными. Статистически незначимые расстояния между переменными свидетельствуют об их низкой дискриминантной способности и ограниченной информативности для задач кластеризации. Подобные параметры рекомендуется исключать из анализа после предварительной проверки их диагностической ценности методами однофакторного дисперсионного анализа, что обеспечивает статистически обоснованный отбор признаков.

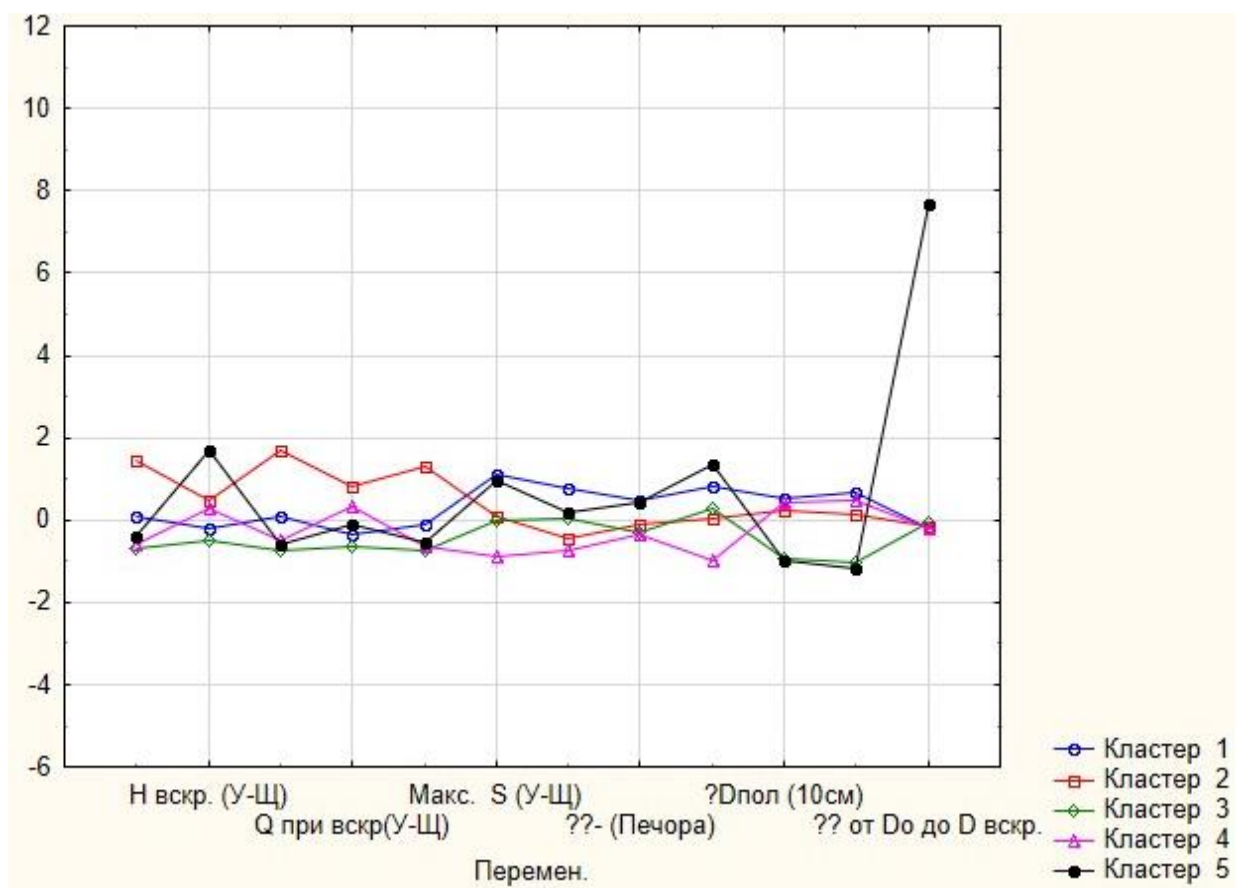


Рисунок 3.13 – График средних значений для всех кластеров

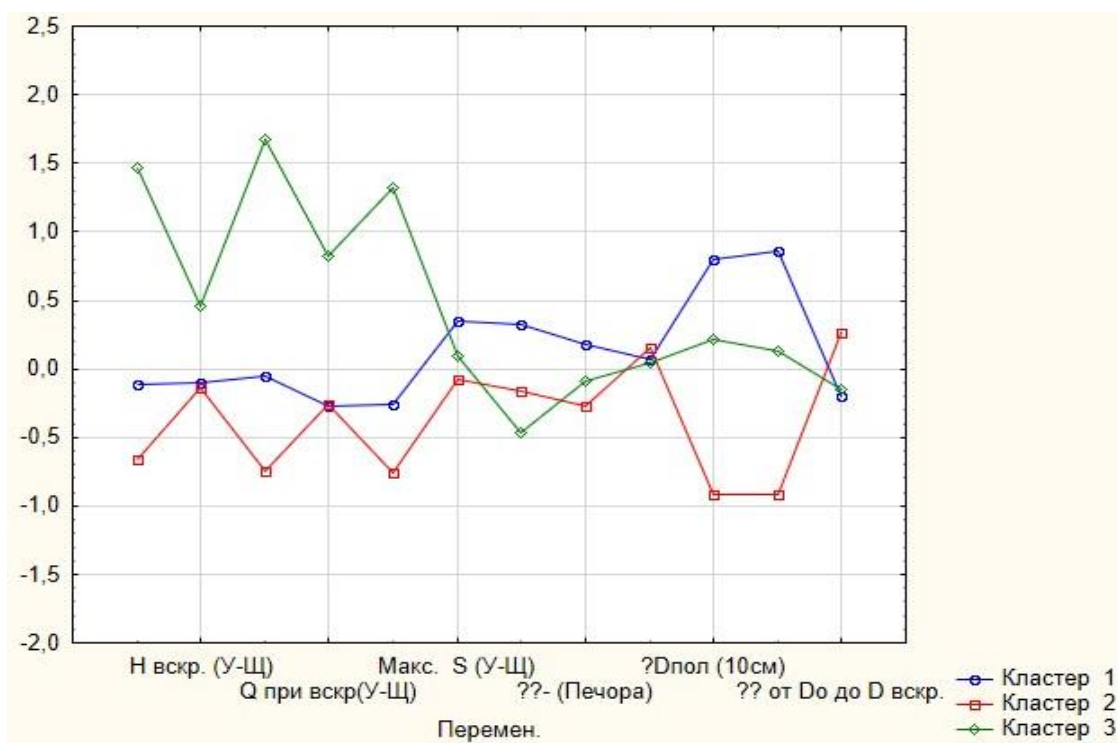


Рисунок 3.14 – График средних значений для трех кластеров

На рисунке 3.15 отражены результаты дисперсионного анализа, демонстрирующие степень влияния отдельных признаков на основе сравнения межгрупповой и внутригрупповой вариаций. Признаки, характеризующиеся минимальной внутригрупповой изменчивостью и одновременно максимальными межгрупповыми различиями, оказывают наиболее существенное воздействие на дифференциацию групп.

перемен.	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. p
Н вскр.(У-К)	31,15938	2	16,25158	49	46,97420	0,000000
Н вскр. (У-Щ)	2,80507	2	26,93659	49	2,55133	0,088297
Q при вскр. (У-К)	39,49436	2	18,11300	49	53,42084	0,000000
Q при вскр(У-Щ)	9,42702	2	36,89499	49	6,25998	0,003792
Q по У-Щ в день вскр. У-К	29,47425	2	9,97459	49	72,39590	0,000000
Макс. S (У-Щ)	1,88039	2	46,46047	49	0,99158	0,378309
Макс. S (Шежимдекост)	4,79636	2	46,73714	49	2,51429	0,091312
??- (Печора)	2,14063	2	42,98751	49	1,22001	0,304036
?X (Печора)	0,11937	2	46,41701	49	0,06301	0,939014
?Dпол (10см)	31,53602	2	22,32123	49	34,61424	0,000000
?Dпол (20см)	33,11370	2	18,55758	49	43,71722	0,000000
?? от Do до D вскр.	2,55932	2	63,23784	49	0,99155	0,378323

Рисунок 3.15 – Результаты однофакторного дисперсионного анализа

Для оценки качества кластеризации также используются статистические показатели F -критерия и уровня значимости p . Переменные, у которых значение p превышает установленный критический уровень (в данном случае 0.05), считаются статистически незначимыми и подлежат исключению из анализа.

В результате проведенного дисперсионного анализа были отсеяны следующие параметры: накопленная температура воздуха в период от начала наблюдений до вскрытия реки, сумма атмосферных осадков по данным метеостанции Печора, сумма отрицательных температур на метеостанции Печора, максимальные показатели снежного покрова в Шежимдикосте и Усть-Щугоре, расход и уровень воды при вскрытии реки на посту Усть-Щугор.

Итоги уточненного дисперсионного анализа с пересчитанными средними значениями отражены на рисунках 3.16 и 3.17.

перемен.	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. p
Н вскр.(У-К)	31,95730	2	22,57055	63	44,60036	0,000000
Q при вскр. (У-К)	39,37841	2	26,57508	63	46,67604	0,000000
?Дпол (10см)	43,23188	2	22,47919	63	60,58066	0,000000
?Дпол (20см)	43,11247	2	22,70624	63	59,80922	0,000000
Q по У-Щ в день вскр. У-К	35,99632	2	18,13542	63	62,52317	0,000000

Рисунок 3.16 – Дисперсионный анализ с повторными измерениями

В ходе исследования рисунка 3.17 было обнаружено, что показатели даты подъема уровня воды на 10 см и 20 см показывают значительные отклонения от средних значений первого кластера. Эти аномальные отклонения существенно ухудшали качество процесса кластеризации, что привело к необходимости исключения данных параметров из дальнейшего анализа.

Проведенный после этого дисперсионный анализ, представленный в таблицах на рисунках 3.17 и 3.18, подтвердил эффективность проведенной коррекции – все оставшиеся переменные имеют уровень значимости $p < 0.05$,

при этом отсутствуют какие-либо параметры, оказывающие негативное влияние на результаты кластеризации.

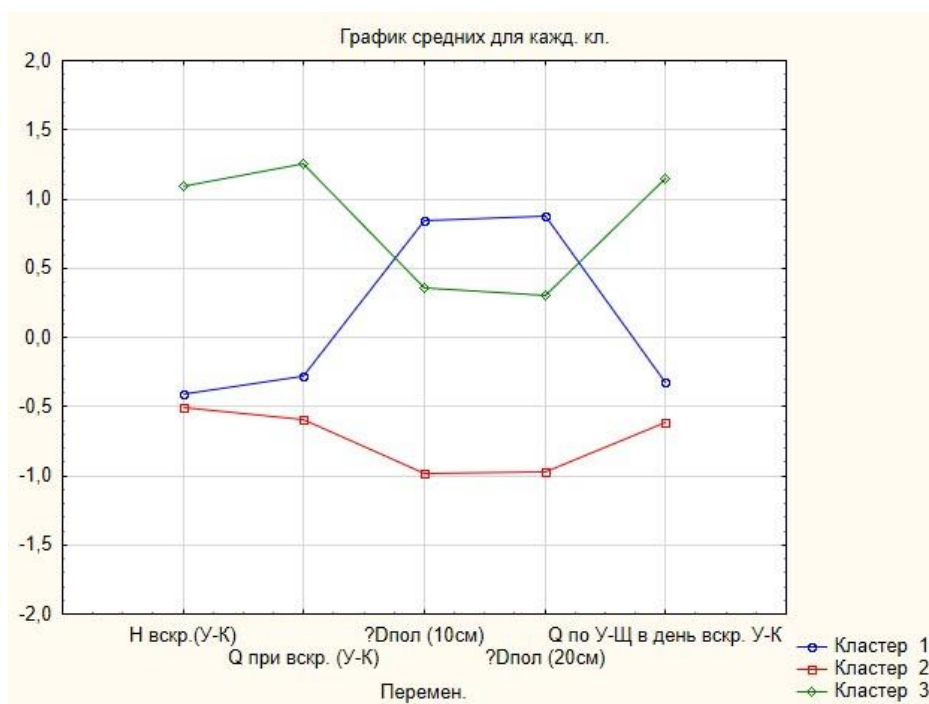


Рисунок 3.17 – График средних по трем кластерам с исключенными предикторами

перемен.	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. p
Н вскр.(У-К)	43,65849	2	11,55369	65	122,8093	0,000000
Q при вскр. (У-К)	54,41958	2	12,58042	65	140,5864	0,000000
Q по У-Щ в день вскр. У-К	38,51550	2	16,28786	65	76,8520	0,000000

Рисунок 3.18 – Статистическая оценка межгрупповых различий

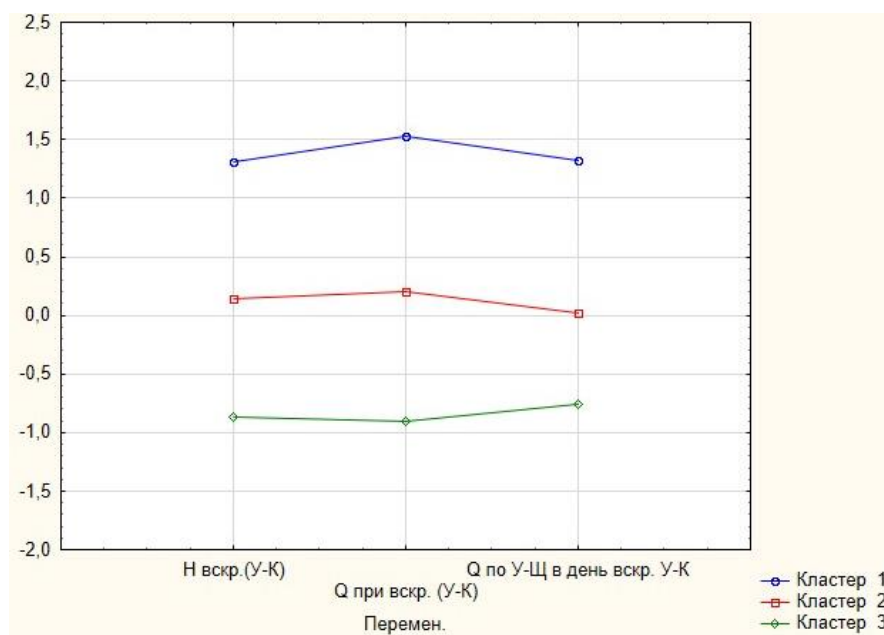


Рисунок 3.19 – Итоговый график средних значений для трех кластеров

На основании комплексного анализа с учетом трех определяющих факторов годы с максимальными уровнями воды были успешно классифицированы на три однородные категории. Исследование выявило выраженную схожесть условий формирования экстремальных уровней внутри каждой категории при наличии значимых различий между ними. Данное обстоятельство подчеркивает важность учета групповой специфики при разработке прогностических алгоритмов для обеспечения.

3.4.2 Метод иерархической классификации

Иерархическая кластеризация представляет собой один из ключевых методов кластерного анализа. Этот подход основан на поэтапном формировании групп объектов путем их объединения или разделения в соответствии с мерой сходства и различия между ними. Метод основан на принципе иерархии, формируя древовидную структуру, называемую дендограммой, где объекты группируются на различных уровнях в зависимости от степени их близости. Классификация, как и в предыдущем случае, проводится на основе стандартизированных данных.

На рисунке 3.20 представлена диаграмма иерархической кластеризации, где каждый предиктор отображен в виде отдельного элемента. Вертикальная ось содержит нумерацию объектов согласно исходному набору данных, тогда как горизонтальная ось отражает расстояние между ними, выступающее ключевым параметром для группировки. Процесс кластеризации развивается по мере постепенного увеличения расстояния: сначала объединяются наиболее схожие объекты, затем – все более разнородные группы, последовательно снижая порог объединения. В финальной стадии анализа все объекты формируют единый кластер, соответствующий полной выборке.

Более детальная визуализация процедуры объединения с точными значениями межкластерных расстояний приведена на рисунке 3.21.

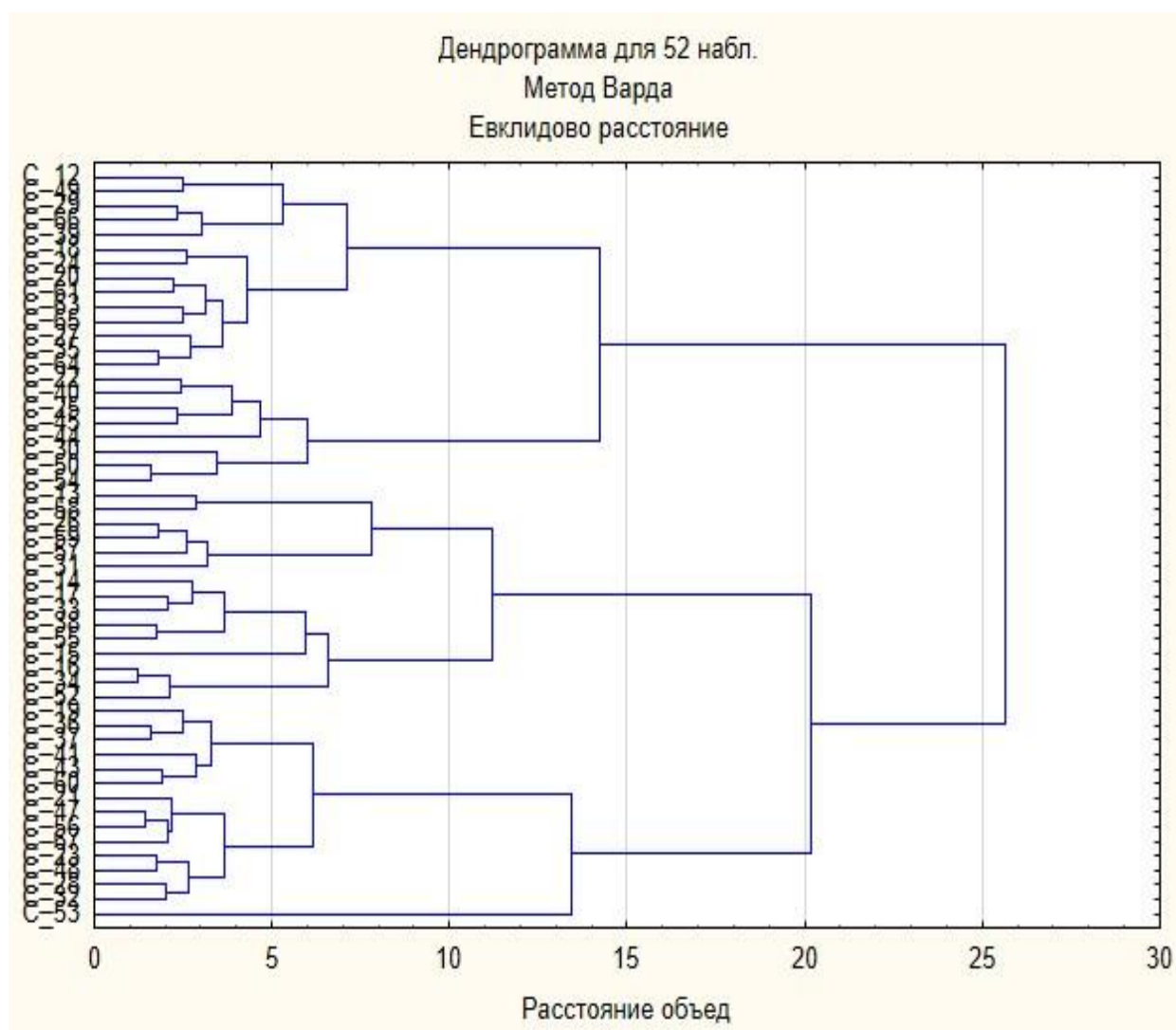
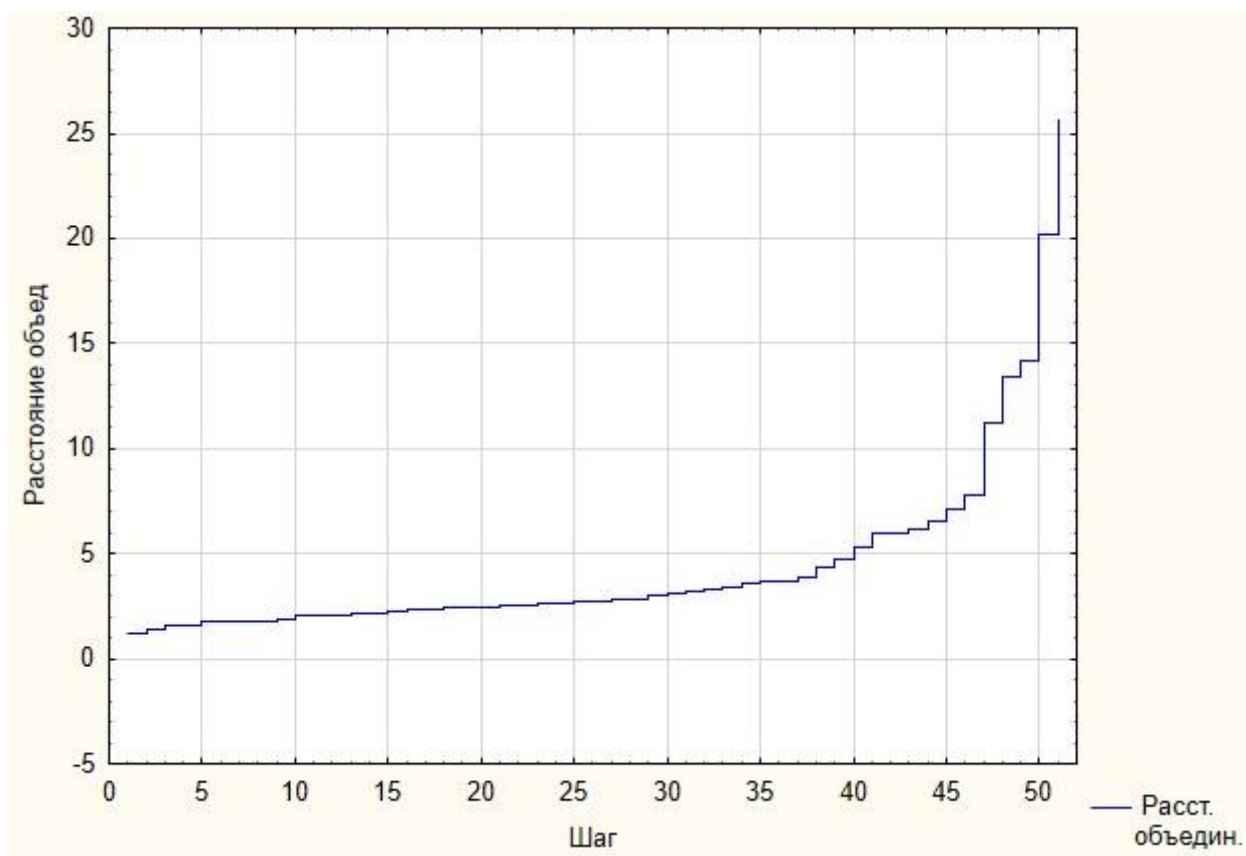


Рисунок 3.20 – Графическое представление иерархической кластеризации 52 объектов (метод Варда, евклидово расстояние)

расст. область	Схема объединения (Сводная таблица данных 1, Метод Варда, Евклидово расстояние)																																																			
	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект	Объект						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
1.248236	C 16	C 34																																																		
1.426668	C 47	C 56																																																		
1.585177	C 36	C 37																																																		
1.603092	C 50	C 54																																																		
1.744982	C 38	C 55																																																		
1.759201	C 23	C 48																																																		
1.784277	C 26	C 59																																																		
1.798971	C 35	C 64																																																		
1.916662	C 43	C 60																																																		
2.040210	C 28	C 32																																																		
2.067079	C 47	C 56		C 67																																																
2.077662	C 17	C 33																																																		
2.145410	C 16	C 34		C 52																																																
2.177247	C 21	C 47		C 56	C 67																																															
2.237203	C 20	C 61																																																		
2.345092	C 29	C 66																																																		
2.364585	C 25	C 45																																																		
2.439160	C 22	C 40																																																		
2.471009	C 63	C 65																																																		
2.482579	C 19	C 36		C 37																																																
2.504402	C 12	C 49																																																		
2.589684	C 18	C 24																																																		
2.595116	C 26	C 59		C 57																																																
2.677551	C 23	C 48		C 28	C 32																																															
2.727473	C 27	C 35		C 64																																																
2.753323	C 14	C 17		C 33																																																
2.873610	C 13	C 58																																																		
2.875729	C 41	C 43		C 60																																																
3.052104	C 29	C 66		C 39																																																
3.145738	C 20	C 61		C 63	C 65																																															
3.178119	C 26	C 59		C 57	C 31																																															
3.287860	C 19	C 36		C 37	C 41	C 43	C 60																																													
3.429316	C 30	C 50		C 54																																																
3.626308	C 20	C 61		C 63	C 65	C 27	C 35	C 64																																												
3.648660	C 14	C 17		C 33	C 38	C 55																																														
3.649354	C 21	C 47		C 56	C 67	C 23	C 48	C 28	C 32																																											
3.867139	C 22	C 40		C 25	C 45																																															
4.312510	C 18	C 24		C 20	C 61	C 63	C 65	C 27	C 35	C 64																																										
4.689765	C 22	C 40		C 25	C 45	C 44																																														
5.296719	C 12	C 49		C 29	C 66	C 39																																														
5.949952	C 14	C 17		C 33	C 38	C 55	C 15																																													
6.016280	C 22	C 40		C 25	C 45	C 44	C 30	C 50	C 54																																											
6.152648	C 19	C 36		C 37	C 41	C 43	C 60	C 21	C 47	C 56	C 67	C 23	C 48	C 28	C 32																																					
6.963993	C 14	C 17		C 33	C 38	C 55	C 15	C 16	C 34	C 52																																										
7.111712	C 12	C 49		C 29	C 66	C 39	C 18	C 24	C 20	C 61	C 63	C 65	C 27	C 35	C 64																																					
7.831299	C 13	C 58		C 26	C 59	C 57	C 31																																													
11.20583	C 13	C 58		C 26	C 59	C 57	C 31	C 14	C 17	C 33	C 38	C 55	C 15	C 16	C 34	C 52																																				
13.43030	C 19	C 36		C 37	C 41	C 43	C 60	C 21	C 47	C 56	C 67	C 23	C 48	C 28	C 32	C 53																																				
14.21161	C 12	C 49		C 29	C 66	C 39	C 18	C 24	C 20	C 61	C 63	C 65	C 27	C 35	C 64	C 22	C 40	C 25	C 45	C 44	C 30	C 50	C 54																													
20.15290	C 13	C 58		C 26	C 59	C 57	C 31	C																																												

Рисунок 3.21 – Схема иерархической кластеризации

Рисунок 3.22 демонстрирует поэтапное возрастание расстояний слияния кластеров (данные из первого столбца табл. 3.21) в виде ступенчатой зависимости. Вертикальная шкала отражает значения расстояний, горизонтальная – последовательность шагов объединения.



3.4.3 Дискриминантный анализ

Кластерный анализ представляет собой метод разделения выборки на однородные группы, однако он не предоставляет четких критериев для оценки качества полученной классификации. В отличие от него, дискриминантный анализ обладает рядом преимуществ и применяется для классификации многомерных наблюдений, когда исследователь располагает обучающими выборками.

Особенность дискриминантного анализа заключается в его многомерности – в процессе анализа может использоваться любое количество признаков объекта. Основная задача метода – классифицировать объект на основе его характеристик, отнести его к одной из заданных групп оптимальным способом. При этом данные должны содержать как признаки объектов, так и категориальную переменную, указывающую на принадлежность к определенной группе. Оптимальность классификации достигается двумя путями: минимизацией математического ожидания потерь или вероятности ошибочной классификации. В процессе анализа проводится проверка соответствия полученной классификации исходной эмпирической группировке.

Математическая постановка задачи дискриминации выглядит следующим образом: по результатам наблюдения формируется *k*-мерный вектор признаков $X = (X_1, X_2, \dots, X_K)$, где $X_1, X_2, \dots, X_K$ – признаки объекта. Необходимо определить правило отнесения объекта к одной из возможных групп $\pi_i, i = 1, 2, \dots, n$ на основе значений координат вектора X .

Выбор правила дискриминации осуществляется с учетом априорной информации о вероятностях извлечения объектов из различных групп. При этом важно учитывать возможные потери от неправильной классификации. Методы дискриминации делятся на:

1. Параметрические методы – предполагают нормальное распределение векторов признаков, при этом параметры распределения оцениваются на основе выборочных данных

2. Непараметрические методы – не требуют знания точного вида распределений и позволяют проводить классификацию при минимальной априорной информации, что делает их особенно полезными для практического применения.

Параметрический дискриминантный анализ базируется на следующих ключевых условиях:

1. Характер данных: величины должны быть непрерывными, измеренными в интервальной шкале и подчиняться нормальному распределению. Для проверки этого условия в STATISTICA предусмотрены инструменты для построения гистограмм и вероятностных графиков. Незначительные отклонения от нормы считаются допустимыми;

2. Статистическая однородность: требуется схожесть дисперсий и ковариаций переменных в различных классах. Как и в предыдущем случае, небольшие отклонения от этого условия не критичны.

При нарушении указанных условий или при наличии категориальных признаков (измеренных в номинальной или порядковой шкале) рекомендуется применять: непараметрический дискриминантный анализ, классификационные деревья, нейронные сети, современные методы Data Mining.

Функциональные возможности модуля дискриминантного анализа в STATISTICA включает: комплексный инструментарий для проведения анализа, средства визуализации результатов, возможности для интерпретации данных, пошаговый классификационный анализ с возможностью добавления или удаления переменных, возможность оценки влияния каждого признака на процесс дискриминации.

Интерактивный подход с пошаговым включением/исключением переменных делает анализ более наглядным, позволяя наблюдать за

изменениями в режиме реального времени, подобно процессу иерархической классификации.

Наша задача – исследовать возможность использования дискриминантного анализа для оценки гидрологических параметров. Воспользуемся классическим дискриминантным анализом, поэтому в качестве независимых переменных используем только количественные гидрологические показатели:

- уровни воды при вскрытии рек Усть-Кожва и Усть-Щугор,
- расходы воды при вскрытии этих рек,
- расход воды по Усть-Щугору в день вскрытия Усть-Кожвы,
- максимальные запасы снега в районах Усть-Щугора и Шежимдекоста,
- суммарные значения отрицательных температур и осадков в Печоре,
- даты достижения уровня воды на 10 и 20 сантиметров,
- сумма температур от начальной точки (D_0) до момента вскрытия ($D_{\text{вскр}}$), а также столбец с разделением на кластеры. Все эти данные представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Исходные данные для дискриминантного анализа

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_0 до $D_{\text{вскр.}}$	Кластер
1955	488	446	7540	—	5200	255	—	-631	76.5	25	26	88.9	2
1956	440	706	6480	3500	6520	166	—	-2715	145	41	44	65.2	2
1957	560	530	9240	3030	8740	225	—	-2446	142	32	33	95.8	1
1958	624	764	10900	9170	5150	278	—	-2462	238	38	41	59.3	1
1959	516	666	8180	5740	7860	274	—	-2147	198	36	37	88.9	1
1960	425	518	6150	3090	2930	240	—	-2845	229	31	38	19.9	3
1961	328	482	4160	4210	6190	285	—	-1870	247	46	47	40.8	3
1962	488	32	7540	2540	4570	291	—	-1826	218	15	18	81.8	2
1963	532	1273	8950	6300	5720	267	—	-2583	237	32	34	53.3	2
1964	496	426	7710	2800	7900		—	-2702	242	44	47	65.2	2
1965	396	360	5520	2230	3800	137	—	-2199	146	35	36	46.5	3
1966	474	764	7230	3100	3100	256	285	-2985	251	29	31	9.5	2
1967	592	657	10000	6110	7020	215	117	-2182	256	22	23	97.1	1
1968	551	673	9020	5320	7530	231	265	-1764	180	38	39	63.7	1
1969	361	561	9260	4990	4060	172	235	-3492	136	50	51	35.9	2
1970	364	449	4880	2750	3570	203	234	-2168	158	43	43	43.7	3
1971	552	656	9050	3490	4480	263	251	-2284	153	46	47	43.7	2
1972	518	522	8230	3240	4750	293	287	-2467	227	53	54	46.2	2

Продолжение таблицы 3.4

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_0 до $D_{\text{вскр.}}$	Клас тер
1973	426	665	6170	4570	2600	290	310	-2353	263	16	21	28.6	3
1974	524	568	8380	2660	5830	262	367	-2201	232	38	39	29.5	2
1975	350	472	4600	2170	2160	258	280	-2182	230	18	19	15.5	3
1976	684	538	12600	3700	5770	286	305	-2248	258	33	35	40.4	1
1977	325	396	4120	1530	3160	240	308	-2338	188	27	28	89.3	3
1978	498	415	7760	2750	4540	326	363	-2110	306	48	51	20.2	2
1979	614	663	10600	4900	10400	289	333	-2880	203	35	36	71.9	1
1980	378	701	5160	7090	2120	195	213	-2268	203	26	26	40.6	3
1981	426	404	5268	2090	3700	318	396	-1780	160	38	38	50.7	3
1982	434	374	5412	1610	3470	260	260	-2198	237	29	30	74.2	3
1983	517	557	7020	2640	4490	333	326	-1854	307	20	27	41.6	2
1984	684	640	12600	4090	7480	305	401	-1586	217	39	40	51.5	1
1985	388	656	4584	5670	2950	225	245	-2972	154	35	37	16.8	3
1986	344	550	3824	2130	2520	307	258	-2281	230	29	31	28.9	3
1987	539	599	7460	3950	4830	215	270	-2536	185	37	39	69.5	2
1988	399	555	4782	1550	3060	201	251	-2125	157	38	40	21.3	3
1989	523	435	7140	2110	4580	273	294	-2041	188	40	42	83.1	2
1990	475	409	6180	1960	3940	302	351	-2115	220	21	25	111	2

Продолжение таблицы 3.4

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_0 до $D_{\text{вскр.}}$	Класте р
1991	454	494	5776	3090	3680	300	336	-2406	246	16	21	54.6	3
1992	431	728	5358	5950	3410	231	313	-2106	195	39	40	75.8	3
1993	461	767	5909	3980	3760	378	380	-2187	296	35	37	57.2	3
1994	622	507	9244	4350	6210	242	232	-2237	237	29	31	30.5	1
1995	414	479	5052	3990	3220	258	270	-1585	222	11	15	99.5	3
1996	855	647	—	6670	11700	251	—	-2106	227	37	38	70.5	
1997	477	485	6220	4060	3960	263	263	-2157	213	21	21	45.9	2
1998	671	763	12400	9360	7190	320	258	-2904	220	45	45	71.2	1
1999	707	544	12800	4910	8020	276	270	-2890	195	34	36	25.1	1
2000	517	516	7020	2690	4490	266	—	-1869	205	21	21	68.1	2
2001	409	437	4962	3480	3160	231	282	-2522	189	23	25	52.3	3
2002	356	274	4022	1310	2630	255	345	-2406	249	30	31	93.4	3
2003	498	601	6640	2930	4220	273	334	-2617	315	32	40	58.9	2
2004	648	622	9920	6210	6690	293	297	-1864	260	42	45	15	1
2005	388	482	4584	2810	2950	174	—	-2155	137	30	31	55.8	3
2006	386	391	4548	1910	2930	250	304	-1930	178	39	41	27.5	3
2007	447	836	5646	3920	3600	307	302	-2004	283	22	23	631	3
2008	580	668	8320	5960	5490	322	340	-1733	254	44	45	27.1	2

Продолжение таблицы 3.4

Год	$H_{\text{вскр.}}$ (У-К)	$H_{\text{вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-К)	$Q_{\text{при вскр.}}$ (У-Щ)	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-К	S_{max} (У-Щ)	S_{max} (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	ΣX (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от D_o до $D_{\text{вскр.}}$	Класте р
2009	476	609	6220	5980	3950	257	274	-1720	190	43	44	45.2	2
2010	399	461	4782	3760	3060	257	300	-2831	238	24	25	40.9	3
2011	396	589	4782	5640	3030	194	185	-2155	142	15	26	70.2	3
2012	619	722	9178	8380	6160	199	183	-1798	166	21	23	41.2	1
2013	401	720	4818	8330	3080	246	247	-2508	174	23	29	52.2	3
2014	538	493	7440	4160	4810	246	283	-2005	281	24	26	20	2
2015	572	497	8144	4210	5360	297	310	-1834	277	33	35	66.7	2
2016	500	375	6680	2820	4250	221	–	-1663	215	17	20	66.8	2
2017	433	499	9394	4240	3430	307	273	-2190	223	37	38	15	2
2018	497	373	6620	2800	4210	316	322	-1671	224	42	44	37.7	2
2019	414	485	5052	4060	3220	329	299	-1784	268	34	38	47.2	3
2020	504	559	6760	5140	4310	343	392	-1401	310	23	36	71.9	2
2021	364	401	4158	3080	2710	193	291	-2435	200	15	21	89.4	3
2022	497	658	6620	6900	4210	258	357	-1971	272	29	30	32	2
2023	397	692	4746	7670	3040	295	295	-1894	260	32	33	–	3

На рисунке 3.23 представлены результаты дискриминантного анализа. Все столбцы появившейся таблицы (рисунок 3.23) определенным образом характеризуют вклад переменной в дискриминацию. Из данного рисунка следует, что дискриминация гидрологических переменных прошла успешно, так как лямбда Уилкса – показатель качества дискриминации – близка к нулю. Известно, что лямбда принадлежит интервалу от $[0,1]$. Значения лямбды, близкие к нулю свидетельствуют о хорошей дискриминации, а значения, близкие к 1, – о плохой дискриминации.

N=53	Уилкса Лямбда	Частная Лямбда	F-исключ (2,39)	p-уров.	Толер.	1-толер. (R-кв.)
Н вскр.(У-К)	0,056321	0,956020	0,897068	0,416010	0,505038	0,494962
Н вскр. (У-Щ)	0,054408	0,989632	0,204287	0,816095	0,447720	0,552280
Q при вскр. (У-К)	0,070796	0,760552	6,139270	0,004809	0,551531	0,448469
Q при вскр(У-Щ)	0,054198	0,993472	0,128133	0,880105	0,471323	0,528677
Q по У-Щ в день вскр. У-К	0,078917	0,682282	9,080542	0,000578	0,700164	0,299836
Макс. S (У-Щ)	0,058214	0,924929	1,582693	0,218331	0,336060	0,663941
Макс. S (Шежимдекост)	0,058140	0,926105	1,555928	0,223807	0,447656	0,552344
??- (Печора)	0,056404	0,954608	0,927222	0,404197	0,642460	0,357540
?X (Печора)	0,059971	0,897828	2,219075	0,122256	0,443583	0,556418
?Dпол (10см)	0,054383	0,990084	0,195290	0,823395	0,064176	0,935824
?Dпол (20см)	0,056231	0,957546	0,864551	0,429156	0,066041	0,933959
?? от Dо до D вскр.	0,055529	0,969651	0,610321	0,548282	0,754175	0,245825

Рисунок 3.23 – Результат дискриминантного анализа

Как видим из таблицы, наибольший вклад в разделение гидрологических характеристик на группы вносит расход воды по Усть-Щугору в день вскрытия Усть-Кожвы. Эта переменная демонстрирует максимальное значение критерия Фишера ($F_{иск}=9.08$) при минимальном уровне значимости ($p_{уров.}=0.000578$). Переменные с р-значением >0.05 могут быть исключены из модели. В последних столбцах таблицы представлены показатели избыточности переменных в модели. Итоговая таблица с результатами дискриминантного анализа представлена на рисунке 3.24.

N=68	Уилкса Лямбда	Частная Лямбда	F-исключ (2,64)	p-уров.	Толер.	1-толер. (R-кв.)
Q при вскр. (У-К)	0,297205	0,445800	39,78108	0,000000	0,998130	0,001870
Q по У-Щ в день вскр. У-К	0,187768	0,705629	13,34962	0,000014	0,998130	0,001870

Рисунок 3.24 – Итоговая таблица результатов дискриминантного анализа

Исключив неподходящие нам переменные из модели, мы получили 2 переменные, влияющие на определение класса кластера. Для анализа степени различия (неоднородности) групп воспользуемся расстоянием между группами. В таблице на рисунке 3.25 приведены расстояния Махаланобиса, между центрами групп. Эти показатели расстояний эквивалентны квадратичным евклидовым расстояниям, но дополнительно включают поправку на взаимную корреляцию переменных.

Кластер	G_1:1	G_2:2	G_3:3
G_1:1	0,00000	15,24126	45,92994
G_2:2	15,24126	0,00000	8,38783
G_3:3	45,92994	8,38783	0,00000

Рисунок 3.25 – Квадраты расстояния Махаланобиса

Канонический анализ направлен на определение коэффициентов дискриминантных функций, также известных как канонические переменные или корни. Эти функции представляют собой линейные комбинации исходных переменных. Количество возможных дискриминантных функций ограничено меньшим из двух значений: либо количеством переменных, либо числом групп минус один. В данном исследовании, где анализируется 3 группы при 2 переменных, количество дискриминантных функций соответствует числу переменных, то есть двум.

Результаты анализа представлены в таблице на рисунке 3.26, где последовательно оценивается значимость канонических корней. Первая строка таблицы демонстрирует общую значимость всех корней, при этом

полученное р-значение менее 0.05 указывает на статистическую значимость первой дискриминантной функции. Однако вторая строка, отражающая значимость оставшихся корней после исключения первого, показывает статистически незначимый результат, что свидетельствует об информативности только первой дискриминантной функции для данного анализа.

Корни исключенные	Собств. знач.	Канонич. R	Уилкса Лямбда	Хи-квад.	ст. св.	р-уров.
0	6,408730	0,930067	0,132494	130,3685	4	0,000000
1	0,018731	0,135597	0,981614	1,1970	1	0,273929

Рисунок 3.26 – Критерий Хи-квадрат последовательных корней

В таблице, представленной на рисунке 3.27 представлены исходные коэффициенты дискриминантной функции, которые могут быть использованы для вычисления значений дискриминантной функции для каждого наблюдения. Во второй таблице (рисунок 3.28) приведены стандартизированные коэффициенты дискриминантной функции. Анализ стандартизированных коэффициентов позволяет количественно оценить вклад каждой переменной в дискриминантные функции, определяя как степень влияния (по абсолютной величине коэффициента), так и его направление (по знаку).

Переменная	Кор. 1	Кор. 2
Q при вскр. (У-К)	-0,000793	0,000604
Q по У-Щ в день вскр. У-К	-0,000586	-0,000843
Конст-та	8,251479	-0,383424
Соб. зн.	6,408730	0,018731
Кум. доля	0,997086	1,000000

Рисунок 3.27 – Исходные коэффициенты для канонических переменных

Переменная	Кор. 1	Кор. 2
Q при вскр. (У-К)	-0,796278	0,606478
Q по У-Щ в день вскр. У-К	-0,571479	-0,821757
Соб. зн.	6,408730	0,018731
Кум. доля	0,997086	1,000000

Рисунок 3.28 – Стандартизированные коэффициенты для канонических переменных

Анализ табличных данных показывает распределение объясненной дисперсии между дискриминантными функциями. Первая функция демонстрирует исключительно высокую дискриминирующую способность, объясняя 99.7% общей вариации, тогда как вклад второй функции оказывается незначительным – всего 0.3%. Собственные значения и кумулятивные доли дисперсии, представленные в таблицах, наглядно отражают это соотношение, позволяя количественно оценить разделяющую мощность каждой из функций. Поэтому дискриминантная функция 1 наиболее важна при разделении гидрологических характеристик на группы.

На рисунке 3.29 представлена диаграмма рассеяния для канонических значений. Гидрологические характеристики представлены в виде точечного распределения на координатной плоскости, где ось X соответствует первому каноническому корню, а ось Y – второму каноническому корню. Такая визуализация демонстрирует пространственную организацию данных в терминах основных дискриминантных компонент.

Таблица 3.5 – Нестандартизованные канонические значения

Наблюдения	Группа	Кор.1	Кор.2
1	G_2:2	-0,77677	-0,21392
2	G_2:2	-0,71020	-1,96711
3	G_1:1	-4,20058	-2,17196
4	G_1:1	-3,41190	1,85759
5	G_1:1	-2,84401	-2,07019
6	G_3:3	1,65654	0,86054
7	G_3:3	1,32304	-3,09008
8	G_2:2	-0,40736	0,31728
9	G_2:2	-2,19979	0,19924
10	G_2:2	-2,49476	-2,38778
11	G_3:3	1,64598	-0,25351
12	G_2:2	0,70043	1,36950
13	G_1:1	-3,79471	-0,26270
14	G_1:1	-3,31662	-1,28461
15	G_2:2	-1,47225	1,78613
16	G_3:3	2,28836	-0,44613
17	G_2:2	-1,55200	1,30516
18	G_2:2	-1,06007	0,58225
19	G_3:3	1,83418	1,15087
20	G_2:2	-1,81229	-0,23777
21	G_3:3	3,33718	0,57362
22	G_1:1	-5,12352	2,36159
23	G_3:3	3,13144	-0,55945
24	G_2:2	-0,56422	0,47545
25	G_1:1	-6,25242	-2,75021
26	G_3:3	2,91656	0,94557
27	G_3:3	1,90445	-0,32140
28	G_3:3	1,92513	-0,04050
29	G_2:2	0,05191	0,07066
30	G_1:1	-6,12621	0,91978
31	G_3:3	2,88663	-0,10214
32	G_3:3	3,74144	-0,19860
33	G_2:2	-0,49637	0,04974
34	G_3:3	2,66512	-0,07530
35	G_2:2	-0,09602	0,06726
36	G_2:2	1,04052	0,02707
37	G_3:3	1,51334	0,00228
38	G_3:3	2,00313	-0,02252
39	G_3:3	1,36097	0,01516
40	G_1:1	-2,72025	-0,03634

Таблица 3.5 – Нестандартизованные канонические значения

Наблюдения	Группа	Кор.1	Кор.2
41	G_3:3	2,35720	-0,04714
42	G_2:2	0,99707	0,03436
43	G_1:1	-5,79757	1,04350
44	G_1:1	-6,60145	0,58526
45	G_2:2	0,05191	0,07066
46	G_3:3	2,46375	-0,05091
47	G_3:3	3,51993	-0,17176
48	G_2:2	0,51156	0,06881
49	G_1:1	-3,53777	-0,03277
50	G_3:3	2,88663	-0,10214
51	G_3:3	2,92691	-0,10702
52	G_3:3	1,66334	-0,00878
53	G_2:2	-1,56535	0,01267
54	G_2:2	1,00294	0,04279
55	G_3:3	2,66512	-0,07530
56	G_3:3	2,68271	-0,05001
57	G_1:1	-2,63860	-0,03404
58	G_3:3	2,62485	-0,07042
59	G_2:2	-0,46879	0,05452
60	G_2:2	-1,34955	0,01598
61	G_2:2	0,46225	0,06767
62	G_2:2	-1,20910	2,39825
63	G_2:2	0,53329	0,06516
64	G_3:3	2,35720	-0,04714
65	G_2:2	0,36363	0,06540
66	G_3:3	3,36518	-0,15708
67	G_2:2	0,53329	0,06516
68	G_3:3	2,70540	-0,08018

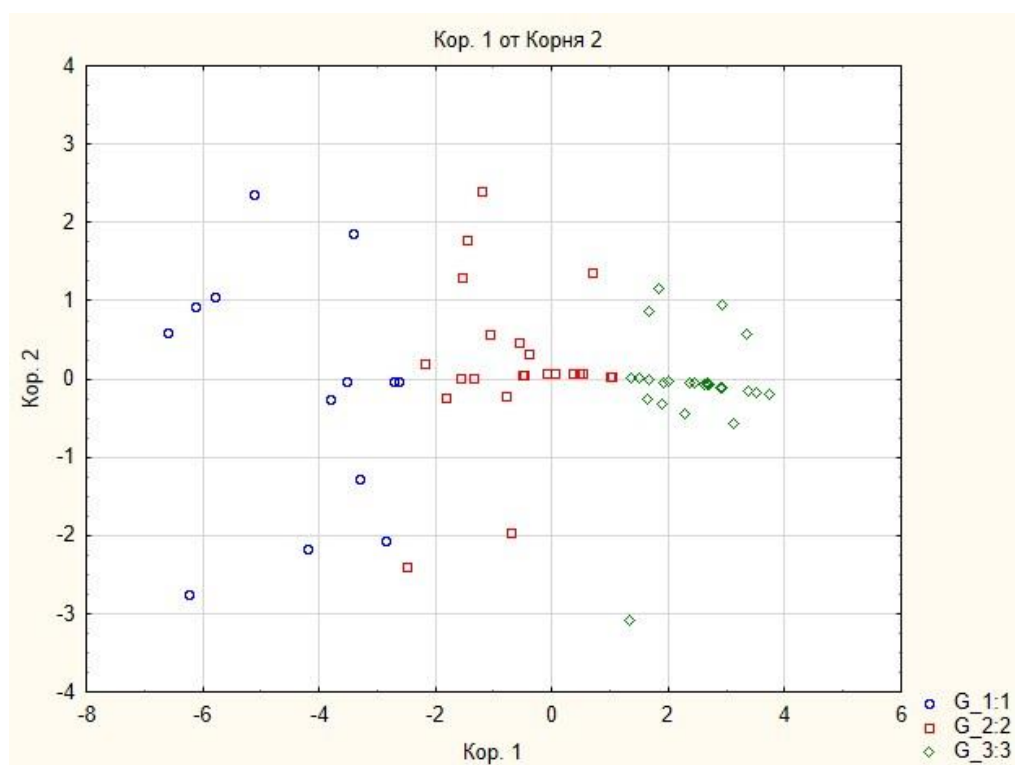


Рисунок 3.29 – Диаграмма рассеяния для канонических значений

Анализ диаграммы показывает четкое пространственное распределение гидрологических характеристик, которые формируют компактные кластерные группы на плоскости. Центральные точки этих кластеров соответствуют средним значениям дискриминантной функции, представленным в таблице на рисунке 3.30.

Группа	Кор. 1	Кор. 2
G_1:1	-4,33582	-0,144239
G_2:2	-0,44393	0,163133
G_3:3	2,44113	-0,090339

Рисунок 3.30 – средние канонические переменные

Центр кластера 3 находится на значительном расстоянии от центра кластера 2 и еще на более значительном расстоянии от центра кластера 1. При этом характер локализации кластеров соответствует расстояниям Махаланобиса в таблице на рисунке 3.25. Из диаграммы рассеяния и

результатов канонического анализа следует, что характеристики водного режима групп 1 и 2 более схожи между собой, чем характеристики 3 и 2 групп.

Следующим шагом выведем таблицу с коэффициентами классификационных функций (рисунок 3.31). Количество классификационных функций соответствует числу анализируемых групп. Каждая группа описывается своей линейной классификационной функцией, которая служит для отнесения новых наблюдений к конкретной группе. Классификация осуществляется путем отбора группы с максимальным значением соответствующей функции.

	G_1:1	G_2:2	G_3:3
Переменная	p=,19118	p=,39706	p=,41176
Q при вскр. (У-К)	0,0101	0,0072	0,0048
Q по У-Щ в день вскр. У-К	0,0072	0,0046	0,0032
Конст-та	-80,9032	-38,8781	-17,8103

Рисунок 3.31 – Функции классификации

Классификационное уравнение для групп:

$$1\text{гр.} = -80,9032 + 0,0101Q_{\text{при вскр. У-К}} + 0,0072Q_{\text{по У-Щ в день вскр. У-К}}$$

$$2\text{гр.} = -38,8781 + 0,0072Q_{\text{при вскр. У-К}} + 0,0046Q_{\text{по У-Щ в день вскр. У-К}}$$

$$3\text{гр.} = -17,8103 + 0,0048Q_{\text{при вскр. У-К}} + 0,0032Q_{\text{по У-Щ в день вскр. У-К}}$$

На рисунке 3.32 представлена матрица классификации. Матрица классификации представляет собой таблицу, отражающую точность группировки данных, где указывается количество и процент правильно определенных наблюдений для каждой категории. Корректность классификации подтверждается при совпадении прогнозируемого программой группового назначения с фактической принадлежностью объекта. В структуре данной матрицы строки соответствуют реальным группам наблюдений, а столбцы – предсказанным компьютерным алгоритмом группам.

Группа	Процент правиль.	G_1:1 p=,19118	G_2:2 p=,39706	G_3:3 p=,41176
G_1:1	100,0000	13	0	0
G_2:2	85,1852	1	23	3
G_3:3	100,0000	0	0	28
Всего	94,1176	14	23	31

Рисунок 3.32 – Матрица классификации

Из таблицы на рисунке 3.32 видим, что неверно классифицированы только 4 наблюдения из 2 группы (кластера). Программа классифицировала 1 наблюдение в 1 группу и оставшиеся в 3 группу. Верно было классифицировано 94% наблюдений.

В таблице 3.6 представлена классификация наблюдений, где можно увидеть классификацию для каждого наблюдения, а также какое наблюдение было неверно классифицировано. Наблюдения, которые неправильно классифицированы помечены *.

Таблица 3.6 – Классификация наблюдений

Наблюдения	Наблюд.	1	2	3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
1	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
2	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
3	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
4	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
5	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
6	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
7	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
8	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
9	G_2:2	G_2:2	G_1:1	G_3:3
*10	G_2:2	G_1:1	G_2:2	G_3:3
11	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
12	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
13	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
14	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
15	G_2:2	G_2:2	G_1:1	G_3:3
16	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
17	G_2:2	G_2:2	G_1:1	G_3:3

Продолжение таблицы 3.6

Наблюдения	Наблюд.	1	2	3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
18	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
19	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
20	G_2:2	G_2:2	G_1:1	G_3:3
21	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
22	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
23	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
24	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
25	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
26	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
27	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
28	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
29	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
30	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
31	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
32	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
33	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
29	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
34	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
35	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
*36	G_2:2	G_3:3	G_2:2	G_1:1
37	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
38	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
39	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
40	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
41	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
*43	G_2:2	G_3:3	G_2:2	G_1:1
44	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
45	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
46	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
47	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
48	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
49	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
50	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
51	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
52	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
53	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1

Таблица 3.6 – Классификация наблюдений

Наблюдения	Наблюд.	1	2	3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
54	G_2:2	G_2:2	G_1:1	G_3:3
*55	G_2:2	G_3:3	G_2:2	G_1:1
56	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
57	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
58	G_1:1	G_1:1	G_2:2	G_3:3
59	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
60	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
61	G_2:2	G_2:2	G_1:1	G_3:3
62	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
63	G_2:2	G_2:2	G_1:1	G_3:3
64	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
65	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
66	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
67	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1
68	G_2:2	G_2:2	G_3:3	G_1:1
69	G_3:3	G_3:3	G_2:2	G_1:1

В таблице 3.7 представлены квадраты расстояний Махаланобиса каждого наблюдения до центра группы. Чем меньше расстояние от наблюдения к центру группы, тем положение наблюдения в этой группе более устойчиво. Неправильные классификации отмечены *.

Таблица 3.7 – Квадраты расстояний Махаланобиса до центров

Наблюдения	Наблюд.	G_1:1	G_2:2	G_3:3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
1	G_2:2	12,67168	0,25295	10,37015
2	G_2:2	16,46793	4,60881	13,45315
3	G_1:1	4,12995	19,56513	48,44557
4	G_1:1	4,86097	11,68002	38,05237
5	G_1:1	5,93476	10,74813	31,85258
6	G_3:3	36,91791	4,89835	1,51976
7	G_3:3	40,70059	13,70557	10,24859
8	G_2:2	15,64579	0,02510	8,28004
9	G_2:2	4,68057	3,08436	21,62205
*10	G_2:2	8,42297	10,71310	29,64132
11	G_3:3	35,79388	4,54134	0,65889

Продолжение таблицы 3.7

Наблюдения	Наблюд.	G_1:1	G_2:2	G_3:3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
12	G_2:2	27,65515	2,76487	5,16117
13	G_1:1	0,30683	11,40905	38,91542
14	G_1:1	2,33919	10,34833	34,57805
15	G_2:2	11,92630	3,69156	18,83571
16	G_3:3	43,97087	7,83662	0,14993
17	G_2:2	9,85040	2,53205	17,89252
18	G_2:2	11,25833	0,55528	12,71076
19	G_3:3	39,74615	6,16540	1,90898
20	G_2:2	6,37694	2,03313	18,11333
21	G_3:3	59,39012	14,46526	1,24373
22	G_1:1	6,89965	26,73181	63,23598
23	G_3:3	55,93238	13,30543	0,69660
24	G_2:2	14,60892	0,11201	9,35228
25	G_1:1	10,46445	42,22611	82,65275
26	G_3:3	53,78458	11,90507	1,29914
27	G_3:3	38,97236	5,74968	0,34141
28	G_3:3	39,21018	5,65390	0,26874
29	G_2:2	19,29830	0,25440	5,73432
30	G_1:1	4,33764	32,86082	74,41969
31	G_3:3	52,16556	11,16303	0,19861
32	G_3:3	65,24508	17,64820	1,70253
33	G_2:2	14,77895	0,01561	8,64856
34	G_3:3	49,01788	9,72305	0,05040
35	G_2:2	18,02056	0,13023	6,46200
*36	G_2:2	28,93433	2,22211	1,97550
37	G_3:3	34,23413	3,85679	0,86937
38	G_3:3	40,19707	6,02258	0,19644
39	G_3:3	32,47873	3,27955	1,17789
40	G_1:1	2,62169	5,22143	26,64280
41	G_3:3	44,80584	7,89052	0,00891
*43	G_2:2	28,47160	2,09307	2,10086
44	G_1:1	3,54744	29,43647	69,16174
45	G_1:1	5,66525	38,09320	82,22466
46	G_2:2	19,29830	0,25440	5,73432
47	G_3:3	46,24277	8,50040	0,00207
48	G_3:3	61,71353	15,82435	1,17044
49	G_2:2	23,54246	0,92186	3,74857
50	G_1:1	0,64930	9,61022	35,75057
51	G_3:3	52,16556	11,16303	0,19861

Продолжение таблицы 3.7

Наблюдения	Наблюд.	G_1:1	G_2:2	G_3:3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
52	G_3:3	52,74856	11,43554	0,23626
53	G_3:3	36,00823	4,47014	0,61161
54	G_2:2	7,70013	1,28021	16,06248
*55	G_2:2	28,53726	2,10790	2,08613
56	G_3:3	49,01788	9,72305	0,05040
57	G_3:3	49,26863	9,82132	0,05999
58	G_1:1	2,89270	4,85544	25,80681
59	G_3:3	48,45628	9,47194	0,03415
60	G_2:2	14,99343	0,01241	8,48861
61	G_2:2	8,94344	0,84181	14,38059
62	G_2:2	23,06636	0,83028	3,94094
63	G_2:2	16,24060	5,58125	19,51730
64	G_2:2	23,75200	0,96455	3,66406
65	G_3:3	44,80584	7,89052	0,00891
66	G_2:2	22,12875	0,66171	4,34027
67	G_3:3	59,30544	14,61182	0,85831
68	G_2:2	23,75200	0,96455	3,66406
69	G_3:3	49,58278	9,97746	0,06994

Таблица 3.8 содержит результаты вероятностной классификации, отражающие степень принадлежности каждого объекта к различным группам. Расчет этих показателей осуществлялся с использованием метрики Махаланобиса и априорных вероятностей. Случаи некорректной классификации выделены *.

Таблица 3.8 – Апостериорные вероятности

Наблюдения	Наблюд.	G_1:1	G_2:2	G_3:3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
1	G_2:2	0,000961	0,992499	0,006540
2	G_2:2	0,001263	0,986453	0,012284
3	G_1:1	0,999077	0,000923	0,000000
4	G_1:1	0,935754	0,064246	0,000000
5	G_1:1	0,842344	0,157652	0,000004
6	G_3:3	0,000000	0,151143	0,848857
7	G_3:3	0,000000	0,146183	0,853817
8	G_2:2	0,000192	0,983365	0,016443
9	G_2:2	0,178127	0,821793	0,000080

*10	G_2:2	0,602069	0,397899	0,000032
11	G_3:3	0,000000	0,121576	0,878424

Продолжение таблицы 3.8

Наблюдения	Наблюд.	G_1:1	G_2:2	G_3:3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
12	G_2:2	0,000001	0,761656	0,238343
13	G_1:1	0,992000	0,008000	0,000000
14	G_1:1	0,963515	0,036485	0,000000
15	G_2:2	0,007777	0,991694	0,000529
16	G_3:3	0,000000	0,020239	0,979761
17	G_2:2	0,012242	0,987285	0,000473
18	G_2:2	0,002272	0,995361	0,002367
19	G_3:3	0,000000	0,102977	0,897023
20	G_2:2	0,051999	0,947684	0,000317
21	G_3:3	0,000000	0,001296	0,998704
22	G_1:1	0,999897	0,000103	0,000000
23	G_3:3	0,000000	0,001760	0,998240
24	G_2:2	0,000339	0,989552	0,010110
25	G_1:1	1,000000	0,000000	0,000000
26	G_3:3	0,000000	0,004776	0,995224
27	G_3:3	0,000000	0,060625	0,939375
28	G_3:3	0,000000	0,061287	0,938713
29	G_2:2	0,000033	0,937207	0,062760
30	G_1:1	0,999999	0,000001	0,000000
31	G_3:3	0,000000	0,003996	0,996004
32	G_3:3	0,000000	0,000332	0,999668
33	G_2:2	0,000296	0,986056	0,013648
34	G_3:3	0,000000	0,007595	0,992405
35	G_2:2	0,000060	0,958036	0,041903
*36	G_2:2	0,000000	0,460167	0,539833
37	G_3:3	0,000000	0,177983	0,822017
38	G_3:3	0,000000	0,049763	0,950237
39	G_3:3	0,000000	0,252147	0,747853
40	G_1:1	0,638523	0,361469	0,000008
41	G_3:3	0,000000	0,018394	0,981606
*43	G_2:2	0,000000	0,491882	0,508118
44	G_1:1	0,999995	0,000005	0,000000
45	G_1:1	1,000000	0,000000	0,000000
46	G_2:2	0,000033	0,937207	0,062760
47	G_3:3	0,000000	0,013579	0,986421
48	G_3:3	0,000000	0,000634	0,999366
49	G_2:2	0,000005	0,798503	0,201493

50	G_1:1	0,977013	0,022987	0,000000
51	G_3:3	0,000000	0,003996	0,996004

Продолжение таблицы 3.8

Наблюдения	Наблюд.	G_1:1	G_2:2	G_3:3
	Класс.	p=,19118	p=,39706	p=,41176
52	G_3:3	0,000000	0,003554	0,996446
53	G_3:3	0,000000	0,122859	0,877141
54	G_2:2	0,019049	0,980324	0,000627
*55	G_2:2	0,000000	0,488188	0,511811
56	G_3:3	0,000000	0,007595	0,992405
57	G_3:3	0,000000	0,007268	0,992732
58	G_1:1	0,562288	0,437699	0,000013
59	G_3:3	0,000000	0,008533	0,991467
60	G_2:2	0,000265	0,984990	0,014745
61	G_2:2	0,008302	0,990518	0,001180
62	G_2:2	0,000006	0,820381	0,179613
63	G_2:2	0,002325	0,996701	0,000973
64	G_2:2	0,000004	0,788076	0,211920
65	G_3:3	0,000000	0,018394	0,981606
66	G_2:2	0,000009	0,858496	0,141495
67	G_3:3	0,000000	0,000994	0,999006
68	G_2:2	0,000004	0,788076	0,211920
69	G_3:3	0,000000	0,006759	0,993241

На рисунке 3.32 представлен график связи максимальных расходов по посту Усть-Щугор в день вскрытия на гидропосту Усть-Кожва и расходов воды при вскрытии на гидропосту Усть-Кожва. Цветом показаны годы, расходы по которым отнесены к той или иной группе.

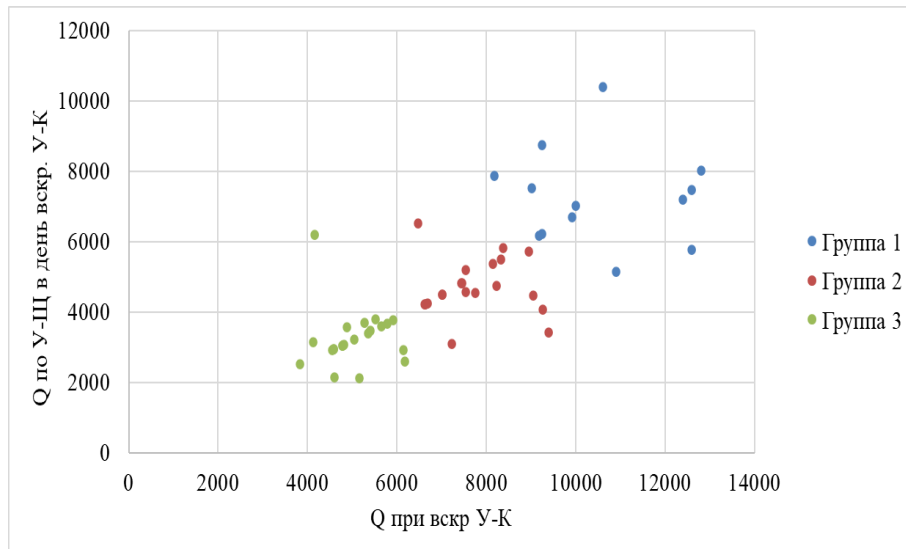


Рисунок 3.32 – График разделение данных по расходам воды на группы

В таблице 3.9 приведены градации расходов по группам. Как видно из графика и таблицы в первую группу отнесены годы с максимальными расходами во время вскрытия на посту Усть-Кожва, в третью группу – с минимальными расходами.

Таблица 3.9 – Интервалы для групп в следствии кластерного анализа

Переменные	1	2	3
Q при вскр У-К	[8180;12800]	[6480;9394]	[3824;6170]
Q по У-Щ в день вскр. У-К	[5150;10400]	[3100;6520]	[2120;6190]

Далее были выведены прогностические уравнения для каждой группы:

$$1 \text{ гр: } H_{\text{мах.лдж}} = 0,013Q_{\text{при вскр. У-К.}} + 0,034Q_{\text{по У-Щ в день вскр. У-К.}} + 368,7$$

$$2 \text{ гр: } H_{\text{мах.лдж}} = -0,028Q_{\text{при вскр. У-К.}} + 0,040Q_{\text{по У-Щ в день вскр. У-К.}} + 704,6$$

$$3 \text{ гр: } H_{\text{мах.лдж}} = 0,016Q_{\text{при вскр. У-К.}} + 0,065Q_{\text{по У-Щ в день вскр. У-К.}} + 263,8$$

Для трех выделенных групп при кластеризации были выведены прогностические уравнения, учитывающие два выбранных предиктора, по которым были даны прогнозы на зависимом и независимом материале. Оценка на зависимом материале (1955-2018 гг.) для трёх групп позволила оценить методику как эффективную: $S/\sigma = 0.69$, $S/\sigma = 0.69$ и $S/\sigma = 0.64$.

На рисунке 3.33, 3.34 и 3.35 представлены фактические и прогнозные значения максимальных уровней при ледоходе на зависимом материале для

трех групп лет. Ошибка прогноза в среднем по группам составляет 68 – 75 см. Минимальная ошибка прогноза фиксировалась в третьей группе.

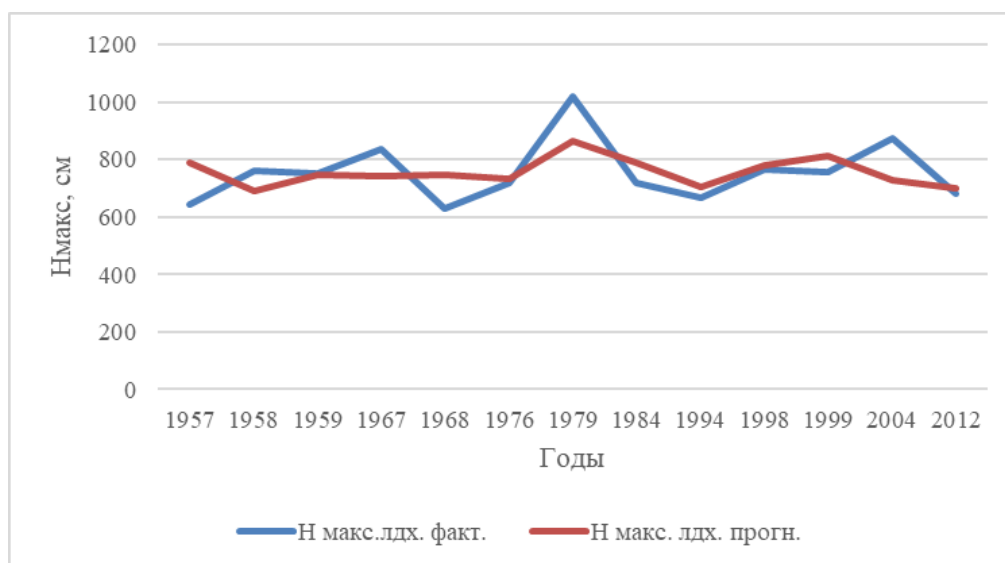


Рисунок 3.33 – График фактических и прогнозных значений максимальных уровней при ледоходе на зависимом материале для 1 группы лет

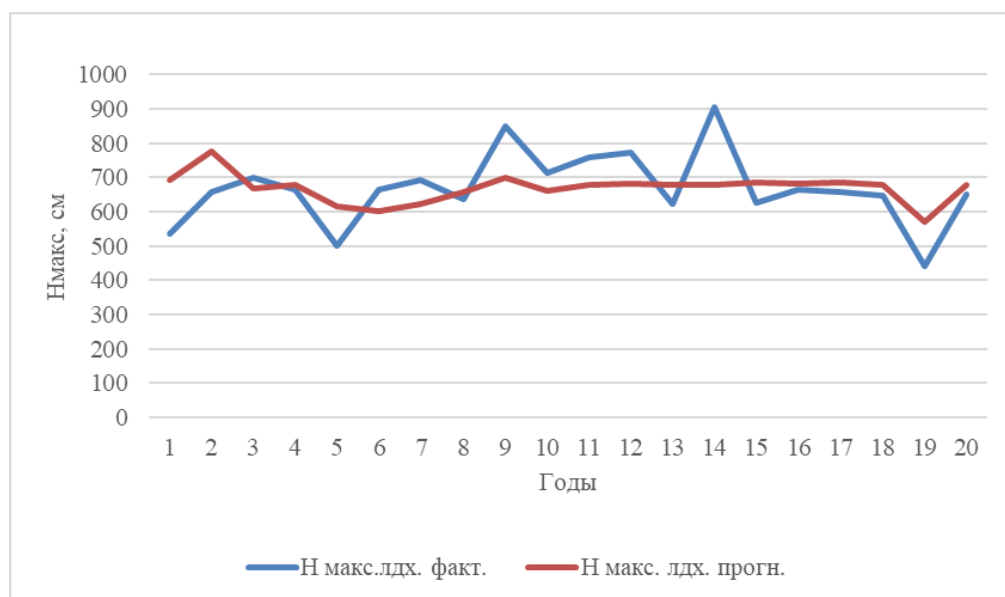


Рисунок 3.34 – График фактических и прогнозных значений максимальных уровней при ледоходе на зависимом материале для 2 группы лет

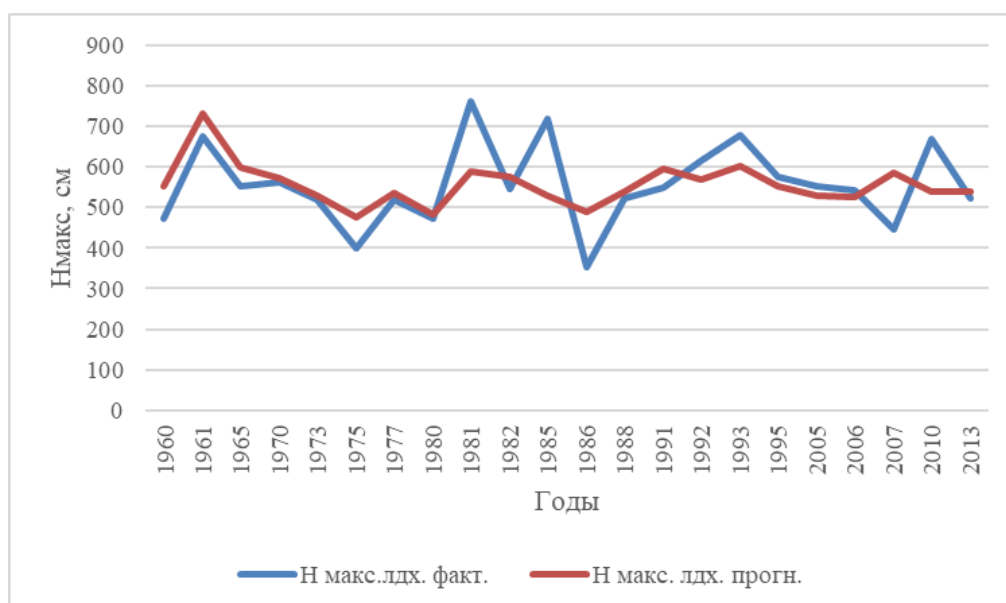


Рисунок 3.35 – График фактических и прогнозных значений максимальных уровней при ледоходе на зависимом материале для 3 группы лет

Для полноценной оценки методики были выпущены поверочные прогнозы на независимом материале 2019 – 2023 гг. При этом каждый год, на который давался прогноз, был отнесен к той или иной группе. В целом прогнозы оправдались в 60% случаев независимой выборки. При этом следует отметить, что в рассмотренные год (2019 – 2023) не наблюдалось высоких расходов. На рисунке 3.36 представлена гистограмма фактических и прогнозных значений максимальных уровней при ледоходе на зависимом материале (2019-2023 гг.). Средняя ошибка прогноза уровня составила 80 см (при допустимой 88 см).

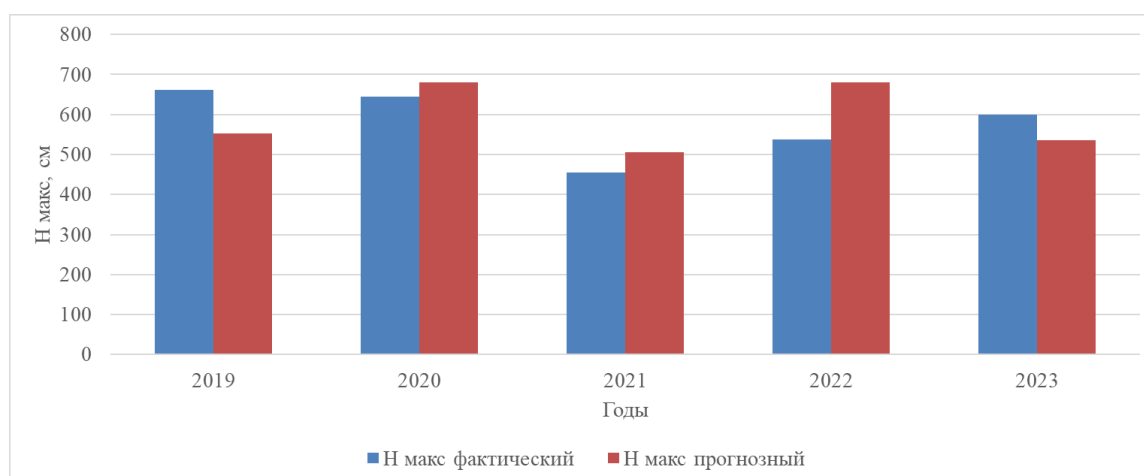


Рисунок 3.36 – Гистограмма фактических и прогнозных значений максимальных уровней при ледоходе на независимом материале (2019-2023 гг.)

3.4.4 Факторный анализ

Факторный анализ представляет собой один из наиболее востребованных многомерных статистических методов. В отличие от кластерного и дискриминантного методов, которые занимаются классификацией наблюдений путем разделения их на однородные группы, факторный анализ направлен на классификацию самих признаков (переменных), описывающих эти наблюдения.

Основной задачей факторного анализа является сокращение количества переменных через их классификацию и выявление структуры взаимосвязей между ними. Это достигается путем выделения скрытых, или латентных, общих факторов, которые объясняют взаимосвязи между наблюдаемыми признаками объекта. В результате вместо большого набора взаимосвязанных переменных появляется возможность работать с меньшим количеством выделенных факторов. Для обнаружения взаимосвязей между переменными используется диаграмма рассеяния. На основе линии регрессии, полученной путем подгонки, можно определить новую переменную, которая будет содержать наиболее существенные характеристики исходных переменных. Таким образом, происходит замена нескольких переменных одной, являющейся линейной комбинацией исходных. Этот принцип справедлив и для большего числа переменных, хотя вычисления при этом усложняются.

Процесс выделения факторов можно представить как вращение, максимизирующее дисперсию исходного пространства переменных. При этом линия регрессии на диаграмме рассеяния может рассматриваться как ось ОХ, которая поворачивается для совпадения с прямой регрессии. Цель такого вращения – максимизация изменчивости нового фактора при минимизации разброса исходных переменных.

Несмотря на то, что количество наблюдаемых объектов может быть значительным, а взаимосвязи между ними – сложными, предполагается существование небольшого числа латентных факторов, влияющих на измеряемые параметры. Выделенные таким образом общие факторы воздействуют на все признаки объекта, а не только на отдельные или их группы. Эти факторы являются гипотетическими и скрытыми, их нельзя измерить напрямую, однако существуют статистические методы для их выявления.

Исходные данные для факторного анализа представлены в таблице 3.2.

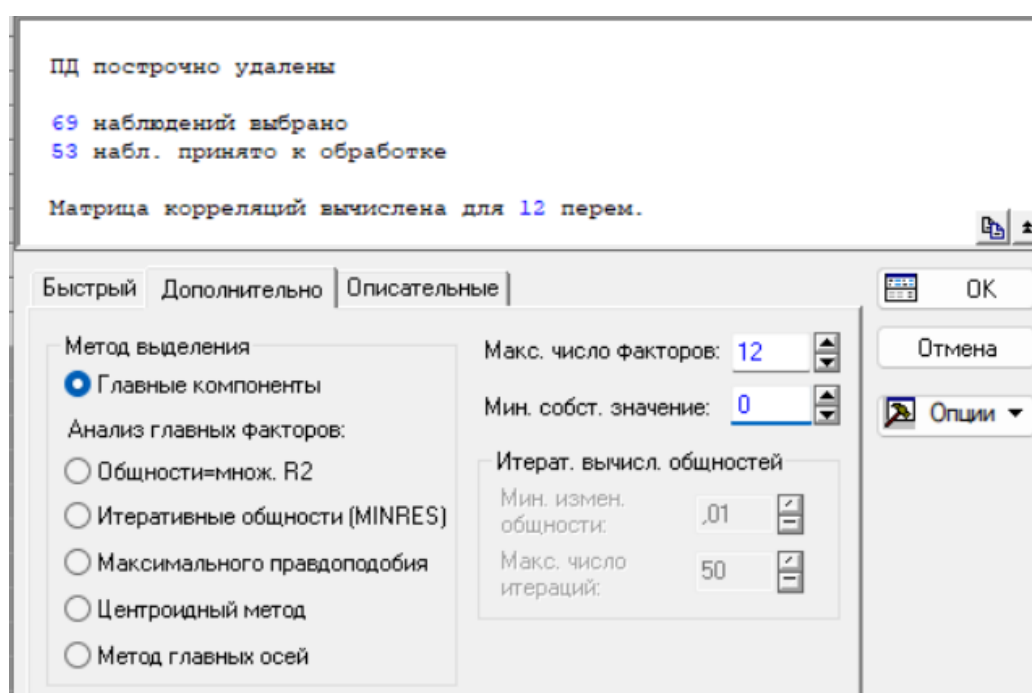


Рисунок 3.37 – Задание метода выделения факторов

При проведении факторного анализа первым шагом является определение количества факторов, которые можно выделить. Для этого применяется метод главных компонент, согласно которому предполагается, что дисперсии всех переменных равны единице, а общая дисперсия соответствует общему числу переменных. В нашем случае, имея 12 переменных, общая дисперсия также составляет 12, что определяет максимальный потенциал для выделения изменчивости.

Максимальное количество факторов, которые могут быть выделены, равно числу переменных. Каждый фактор характеризуется определенной дисперсией, которую он объясняет, и эти значения называются собственными значениями. Для определения оптимального количества факторов используются два основных критерия: критерий Кайзера и критерий каменной осыпи.

Согласно методу Кайзера, при факторном анализе учитываются лишь те факторы, у которых собственные значения больше единицы. Иными словами, в анализ включаются только те компоненты, которые способны объяснить вариативность данных не меньше, чем любая отдельная переменная. Этот подход получил широкое распространение в статистическом анализе и считается одним из стандартных методов отбора факторов.

Метод каменной осыпи – это визуальный способ анализа, основанный на графическом представлении собственных значений. Согласно предложению автора метода Кэттеля, необходимо найти точку на графике, где снижение собственных значений становится минимальным.

Для реализации анализа в программном интерфейсе следует выбрать метод выделения *«Главные компоненты»*, установить максимальное число факторов равным 12 и минимальное собственное значение равным 0, чтобы не исключать факторы с значениями меньше единицы. После подтверждения настроек необходимо перейти во вкладку *«Объясненная дисперсия»* и нажать кнопку *«Собственные значения»*.

Анализ данных в таблице на рисунке 3.38 показывает, что лишь первые четыре фактора имеют собственные значения, превышающие 1, согласно критерию Кайзера, указывает на необходимость их выделения. В таблице представлены: процент объясняемой дисперсии для каждого фактора (второй столбец), кумулятивные собственные значения (третий столбец) и накопленная дисперсия (четвертый столбец). Первые четыре фактора в совокупности объясняют 77.1% общей дисперсии (30.1%, 21.1%, 16.8% и 9.1% соответственно), что означает потерю около 23% информации.

Значен.	Собств. Знач.	% общей дисперс.	Кумулятивн. Собств. Знач.	Кумулятивн. %
1	3,614657	30,12215	3,61466	30,1221
2	2,527870	21,06558	6,14253	51,1877
3	2,016125	16,80104	8,15865	67,9888
4	1,089887	9,08239	9,24854	77,0712
5	0,844724	7,03937	10,09326	84,1105
6	0,803932	6,69943	10,89719	90,8100
7	0,415907	3,46589	11,31310	94,2758
8	0,243083	2,02570	11,55619	96,3015
9	0,221175	1,84312	11,77736	98,1447
10	0,131589	1,09658	11,90895	99,2412
11	0,062728	0,52273	11,97168	99,7640
12	0,028323	0,23603	12,00000	100,0000

Рисунок 3.38 – Собственные значения

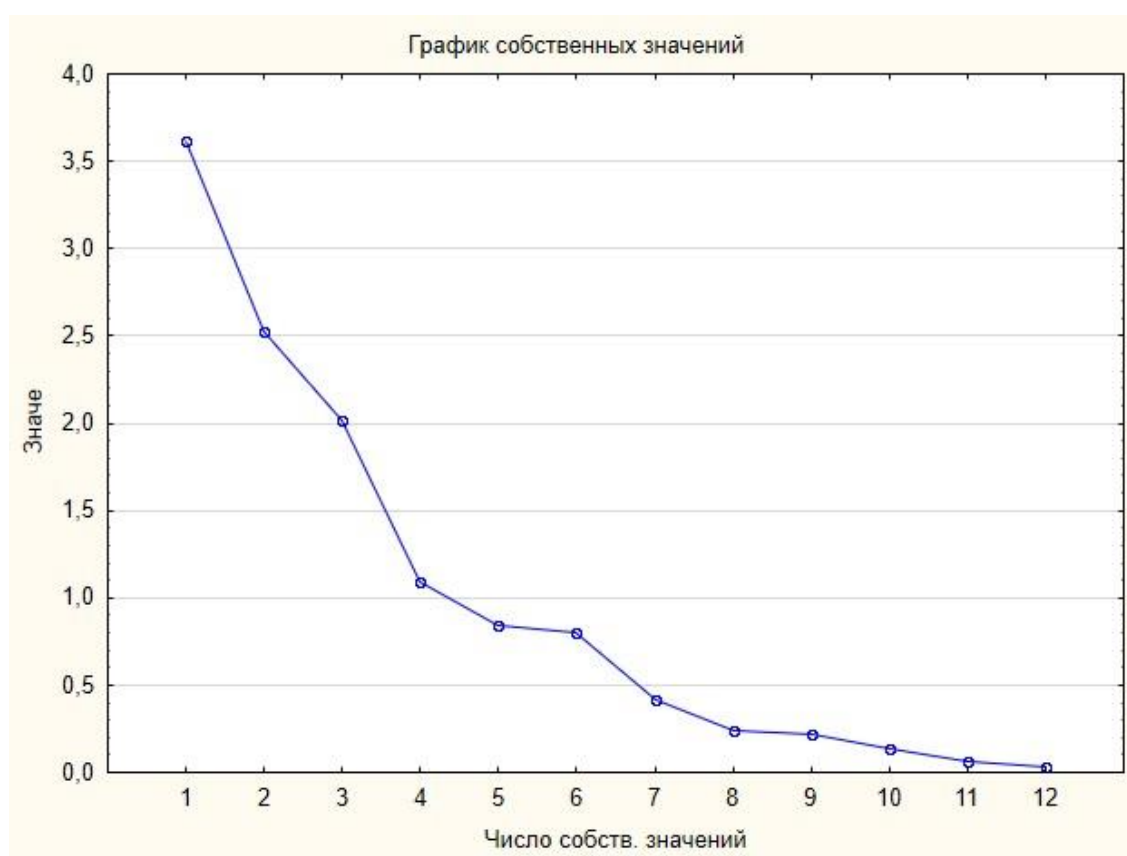


Рисунок 3.39 – График каменной осыпи

График каменной осыпи на рисунке 3.39 демонстрирует, что резкое снижение собственных значений значительно замедляется при пяти и восьми факторах. Сопоставление результатов обоих критериев (Кайзера и каменной

осыпи) подтверждает оптимальность выбора четырех факторов для дальнейшего анализа.

После установления оптимального количества факторов исследование переходит к ключевой стадии факторного анализа – процедуре извлечения самих факторов. В поле *Макс. число факторов* укажем 4, в поле *Мин. собств. значение* – 1 и щелкнем по ОК.

Перемен.	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Н вскр.(У-К)	-0,896444	-0,037026	0,232401	0,284402
Н вскр. (У-Щ)	-0,446261	0,356616	0,476340	-0,542669
Q при вскр. (У-К)	-0,911157	0,102201	0,075355	0,234450
Q при вскр(У-Щ)	-0,458356	0,527666	0,414707	-0,201092
Q по У-Щ в день вскр. У-К	-0,864295	0,075862	0,127412	0,276820
Макс. S (У-Щ)	-0,331307	-0,816435	0,135407	-0,149059
Макс. S (Шежимдекост)	-0,115079	-0,834464	-0,113462	-0,114876
??- (Печора)	-0,005538	-0,492352	0,222738	0,113712
?X (Печора)	-0,146216	-0,691210	0,438704	-0,005495
?Dпол (10см)	-0,576746	-0,033545	-0,724813	-0,320220
?Dпол (20см)	-0,577659	-0,086941	-0,713207	-0,326860
?? от Dо до D вскр.	0,117684	-0,113708	0,483756	-0,533596
Общ дис.	3,614657	2,527870	2,016125	1,089887
Доля общ	0,301221	0,210656	0,168010	0,090824

Рисунок 3.40 – Факторные нагрузки (без вращения)

Рисунок 3.40 отображает матрицу факторных нагрузок, представляющую собой коэффициенты корреляции между исходными переменными и выделенными факторными компонентами.

Эффективное выделение факторов предполагает, что факторные нагрузки должны четко группировать переменные, демонстрируя высокие значения корреляции с одним определенным фактором и низкие - с остальными. Это позволяет обеспечить содержательную интерпретацию каждого фактора и обоснованность их выделения. Как видно из таблицы рисунка 3.40, для большинства переменных корреляции большие по двум факторам.

Чтобы улучшить результат выделения факторов и получить интерпретируемое решение, надо применить повороты осей, которые достигаются вращением факторов. В данной таблице (рисунок 3.41) можем увидеть, что метод выделил три переменные, у которых высокие, близкие к 1, корреляции с Фактором 1 и очень малые, близкие к 0, с другими факторами. Это такие переменные как расход при вскрытии на посту Усть-Кожва и расход по Усть-Щугору в день вскрытия Усть-Кожвы, уровень воды при вскрытии на посту Усть-Кожва.

Методом также выделены три переменные, у которых высокие, близкие к 1, корреляции с Фактором 2 и очень малые, близкие к 0, с другими факторами. Это такие переменные как максимальные снегозапасы по Усть-Щугору и максимальные снегозапасы по Шежимдекосту, а также сумма осадков по Печоре. Выделены две переменные, у которых высокие корреляции с Фактором 3 и очень малые с другими факторами. Это переменные такие как даты подъема уровня больше 10 см/сут. и больше 20 см/сут. И, наконец, выделена одна переменная, у которой высокая корреляция с Фактором 4 и очень малые с другими факторами. Это переменная уровня воды при вскрытии на посту Усть-Щугор.

Перемен.	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Н вскр.(У-К)	0,942473	0,169236	0,092701	0,119950
Н вскр. (У-Щ)	0,259524	-0,064065	0,042025	0,880051
Q при вскр. (У-К)	0,910773	0,013085	0,238888	0,120627
Q при вскр(У-Щ)	0,433877	-0,299869	-0,057351	0,647674
Q по У-Щ в день вскр. У-К	0,899658	0,035224	0,160033	0,096896
Макс. S (У-Щ)	0,163062	0,878591	0,135032	0,011793
Макс. S (Шежимдекост)	-0,059848	0,800686	0,221227	-0,204993
??- (Печора)	0,059701	0,496324	-0,202843	-0,118050
?X (Печора)	0,150679	0,775931	-0,251778	0,058967
?Dпол (10см)	0,179763	0,009967	0,963866	-0,014304
?Dпол (20см)	0,174850	0,064418	0,960025	-0,019506
?? от До до D вскр.	-0,258344	0,296960	-0,199062	0,592428
Общ. дис.	2,968817	2,477941	2,158352	1,643429
Доля общ	0,247401	0,206495	0,179863	0,136952

Рисунок 3.41 – Факторные нагрузки (варимакс исходных)

Таким образом, нам удалось выделить четыре фактора, причем каждая из переменных сгруппирована в какой-либо фактор. На рисунке 3.42 представлена графическая визуализация факторных нагрузок, в которой переменные представлены как точки в факторном пространстве.

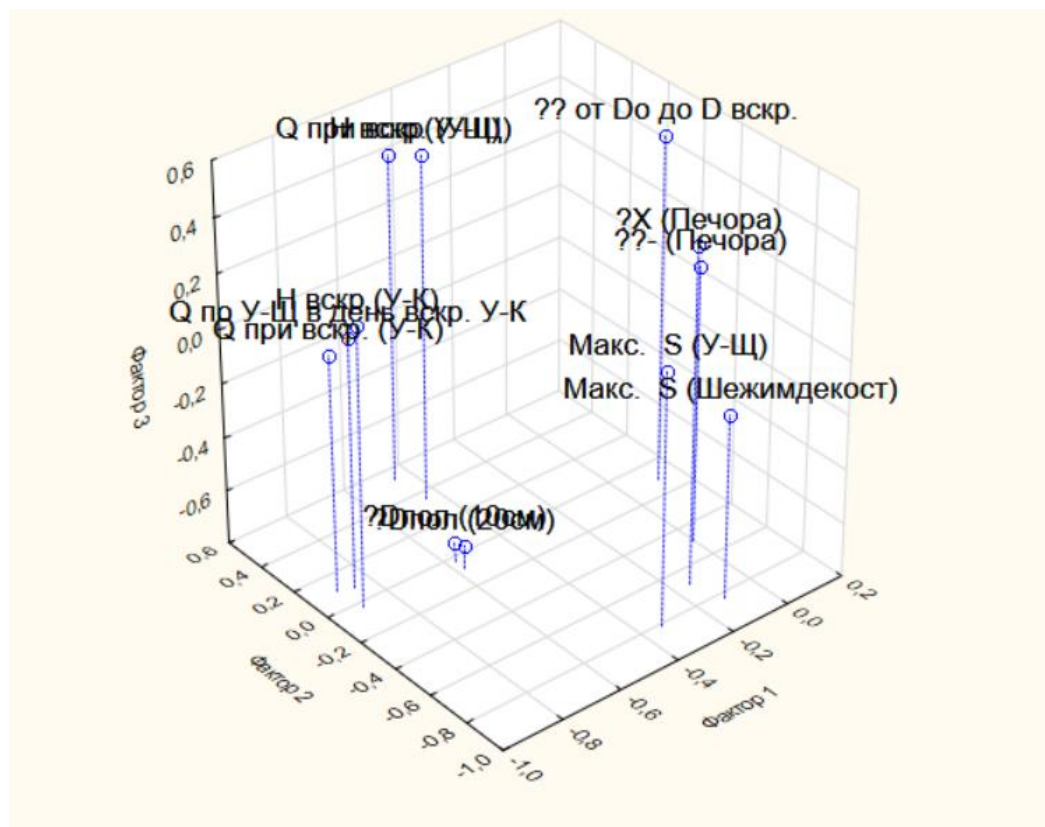


Рисунок 3.42 – 3М график нагрузок

На трехмерном графике (рис. 3.42) визуализированы результаты факторного анализа, где переменные образуют плотные кластерные группы. Близкое расположение точек кластеров к началу координат указывает на минимальный разброс значений внутри каждого фактора.

Факторы в данном контексте представляют собой результат сложения переменных с определенными коэффициентами, подобно тому, как это происходит с дискриминантными функциями. Проще говоря, фактор можно рассматривать как результат линейного регрессионного анализа, где переменные выступают в роли независимых предикторов. В процессе анализа программное обеспечение рассчитывает значения факторов для каждого

отдельного наблюдения, используя соответствующие регрессионные уравнения.

На рисунке 3.43 представлена таблица с коэффициентами линейных уравнений. Эти коэффициенты используются для расчёта значений факторов для каждого наблюдения с помощью программы. Из таблицы на рисунке 3.38 видно, что коэффициенты значительно отличаются от нуля при переменных, у которых высокие корреляции с соответствующим фактором. Это означает то, что значение фактора вносят существенный вклад только те переменные, с которыми у фактора высокие корреляции.

Перемен.	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Н вскр.(У-К)	-0,248002	-0,014647	0,115271	0,260946
Н вскр. (У-Щ)	-0,123459	0,141074	0,236265	-0,497913
Q при вскр. (У-К)	-0,252073	0,040430	0,037376	0,215114
Q при вскр(У-Щ)	-0,126805	0,208739	0,205695	-0,184507
Q по У-Щ в день вскр. У-К	-0,239108	0,030010	0,063197	0,253990
Макс. S (У-Щ)	-0,091656	-0,322974	0,067162	-0,136766
Макс. S (Шежимдекост)	-0,031837	-0,330106	-0,056278	-0,105402
??- (Печора)	-0,001532	-0,194769	0,110478	0,104334
?X (Печора)	-0,040451	-0,273436	0,217598	-0,005042
?Dпол (10см)	-0,159558	-0,013270	-0,359508	-0,293811
?Dпол (20см)	-0,159810	-0,034393	-0,353752	-0,299902
?? от Do до D вскр.	0,032557	-0,044982	0,239943	-0,489588

Рисунок 3.43 – Коэффициенты факторов

Таблица 3.10 – Значения факторов

Набл.	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
1	0,12272	0,45976	0,20057	-0,60200
2	-0,66012	1,66015	1,81245	1,26853
3	-1,08392	0,77502	0,06385	0,15814
4	-0,23612	2,21055	-2,22321	-1,12726
5	0,71513	0,81221	-1,68675	-0,25580
6	-0,82121	0,72120	-1,13397	-0,61562
7	-0,91361	-0,27715	-1,66460	-0,83508
8	0,71130	-0,22079	1,23294	-0,05080
9	-0,60077	-0,59193	-0,56890	0,25790
10	1,59276	-0,20339	0,31373	0,84107
11	-1,36011	-0,37980	0,31012	1,30607

12	1,47298	-0,15067	-0,64831	0,23146
13	-0,70398	-1,74728	-1,31209	-0,25209
14	-1,84331	0,36543	0,27238	0,52426

Продолжение таблицы 3.10

Набл.	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
15	0,85770	1,62225	0,67940	-0,75706
16	0,42849	-1,28025	-1,25385	-0,08629
17	0,90994	-0,36411	-0,37171	0,78703
18	0,07002	-1,45498	1,05063	0,74666
19	-1,96677	-1,00106	0,15284	0,64316
20	0,54205	1,58302	-0,74194	-1,13888
21	1,10126	-0,36349	-0,29183	-0,41830
22	-0,29526	0,88361	-0,53013	-0,14465
23	0,80427	0,71237	-1,38625	-0,19560
24	-0,12743	-0,35148	-1,05346	0,22682
25	0,70452	-1,04929	0,30890	0,75920
26	0,79155	-0,69159	0,77983	0,73915
27	0,01588	0,56914	-0,22268	-1,69760
28	-0,38734	-1,58194	0,49385	-1,75957
29	-0,65028	0,51667	0,39430	1,54968
30	1,32744	-0,16270	1,42167	1,01040
31	0,65327	0,19380	0,64309	1,04427
32	-2,47580	1,04081	0,42662	-1,02923
33	-1,78676	0,75628	0,00994	1,54681
34	1,13403	0,45788	-0,12512	0,62941
35	1,41458	-1,00228	-0,84797	0,38753
36	-0,16284	-0,76401	-0,00624	-0,48116
37	-1,71240	-0,25596	0,05647	0,17488
38	0,83781	-0,33101	-1,56704	0,05050
39	0,50467	-0,78542	3,19504	-4,23006
40	-1,33974	-0,77005	-0,06290	-0,75189
41	-0,31933	0,34104	-0,58139	-0,92064
42	1,02353	0,07875	0,03478	0,28895
43	1,18996	1,81073	0,60617	0,22441
44	-0,67562	2,05556	1,64279	1,03526
45	0,49882	1,48931	0,78046	-1,13873
46	0,05753	-0,23685	0,73177	1,34576
47	-0,58194	-0,86215	0,35909	0,56964
48	-0,18354	-0,20569	-0,54643	0,06133
49	-0,16140	-1,20117	-1,12283	0,28427
50	0,33470	-1,09840	-0,16596	-0,45519
51	-0,27242	-1,92661	1,02578	-0,19481

52	1,72934	0,47280	0,23515	0,81997
53	-0,22424	-0,27686	0,88094	-0,37421

Из таблицы 3.10 следует, что наблюдения можно представить как точки в трехмерном пространстве. Это означает, что наши наблюдения характеризуются не двенадцатью показателями, как в исходной таблице, а только четырьмя, т.е. факторный анализ, за счет выделения факторов, позволил сократить данные.

Естественно, выделить факторы можно не всегда. Основное условие для факторизации пространства признаков – чтобы были подгруппы переменных с высокими корреляциями внутри групп и малыми межгрупповыми корреляциями.

Переменная	Н вскр.(У-К)	Н вскр. (У-Щ)	Q при вскр. (У-К)	Q при вскр(У-Щ)	Q по У-Щ в день вскр. У-К	Макс. S (У-Щ)	Макс. S (Шежимдекост)	??- (Печора)	?X (Печора)	?Dпол (10см)	?Dпол (20см)	?? от До до D вскр.
Н вскр.(У-К)	1,00	0,33	0,90	0,38	0,87	0,29	0,06	0,12	0,23	0,27	0,27	-0,07
Н вскр. (У-Щ)	0,33	1,00	0,32	0,69	0,28	0,02	-0,19	-0,12	0,04	0,05	0,05	0,24
Q при вскр. (У-К)	0,90	0,32	1,00	0,38	0,85	0,19	-0,02	-0,09	0,09	0,39	0,37	-0,12
Q при вскр(У-Щ)	0,38	0,69	0,38	1,00	0,34	-0,14	-0,36	-0,06	-0,09	0,01	0,02	-0,03
Q по У-Щ в день вскр. У-К	0,87	0,28	0,85	0,34	1,00	0,16	0,02	-0,00	0,06	0,31	0,29	-0,04
Макс. S (У-Щ)	0,29	0,02	0,19	-0,14	0,16	1,00	0,67	0,33	0,64	0,14	0,19	0,10
Макс. S (Шежимдекост)	0,06	-0,19	-0,02	-0,36	0,02	0,67	1,00	0,26	0,45	0,15	0,20	0,03
??- (Печора)	0,12	-0,12	-0,09	-0,06	-0,00	0,33	0,26	1,00	0,25	-0,10	-0,06	0,10
?X (Печора)	0,23	0,04	0,09	-0,09	0,06	0,64	0,45	0,25	1,00	-0,19	-0,13	0,15
?Dпол (10см)	0,27	0,05	0,39	0,01	0,31	0,14	0,15	-0,10	-0,19	1,00	0,97	-0,21
?Dпол (20см)	0,27	0,05	0,37	0,02	0,29	0,19	0,20	-0,06	-0,13	0,97	1,00	-0,23
?? от До до D вскр.	-0,07	0,24	-0,12	-0,03	-0,04	0,10	0,03	0,10	0,15	-0,21	-0,23	1,00

Рисунок 3.44 – Корреляционная матрица

Переменная	Средние	Стд. Откл
Н вскр.(У-К)	483,23	99,165
Н вскр. (У-Щ)	557,38	124,194
Q при вскр. (У-К)	7021,04	2403,044
Q при вскр(У-Щ)	4118,11	1846,322
Q по У-Щ в день вскр. У-К	4373,96	1695,944
Макс. S (У-Щ)	267,15	45,030
Макс. S (Шежимдекост)	291,45	55,243
??- (Печора)	-2212,45	414,116
?X (Печора)	222,95	46,813
?Dпол (10см)	31,57	10,114
?Dпол (20см)	34,02	9,241
?? от До до D вскр.	60,74	83,617

Рисунок 3.45 – Средние значения и стандартное отклонение

Таким образом, нам удалось выделить 4 независимых, латентных фактора. Латентные факторы скрытые, поэтому непосредственно измерить их мы не можем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной магистерской диссертация была усовершенствована методика прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора.

На начальном этапе исследования была составлена подробная физико-географическая характеристика изучаемой местности, а также изучены специфические аспекты формирования и изменения ледяного покрова на реке Печора.

На втором этапе были изучены и проанализированы исследования, направленные на разработку методов прогноза заторных и зажорных уровней на реках. Проведенный анализ показал, что в условиях современного климата, когда наблюдается усиление гидрометеорологической изменчивости, создание универсальной методики прогнозирования остается крайне сложной задачей. Это обусловлено уникальными особенностями формирования заторов на каждом конкретном участке реки. Существующие методы прогнозирования основаны главным образом на статистическом анализе связи прогнозируемого уровня воды с определёнными факторами. Эти факторы включают метеорологические параметры (температуру воздуха) и гидрологические характеристики (расходы и уровни воды на исследуемом и вышележащем участках, даты наступления различных ледовых явлений, толщину льда и другие). Важно отметить, что набор этих факторов может значительно различаться даже для соседних участков одного водного объекта, что усложняет процесс прогнозирования и требует индивидуального подхода к каждому участку реки.

Третий этап магистерской диссертации включает детальное изучение процесса образования заторов на реке Печора в районе города Печора. В ходе

исследования были определены ключевые участки реки, где регулярно формируются ледовые скопления, приводящие к существенному сужению русла и последующему резкому подъему уровня воды. Особое внимание было уделено изучению межгодовой изменчивости максимальных заторных уровней, которая проявляется в значительных различиях мест образования заторов, характеристик ледового покрова, водности реки и других гидрометеорологических параметров. В качестве информационной базы для разработки методики использован обширный массив гидрометеорологических данных, охватывающий столетний период наблюдений с 1921 по 2023 год.

На следующем этапе работы проведен анализ действующей методики прогнозирования ледовых заторов, применяемой Коми ЦГМС. Разработанная в 1980-х годах под руководством ведущего научного сотрудника ГГИ В.А. Бузина, данная методика требует существенной модернизации в связи с изменившимися гидрологическими условиями. В рамках работы выполнено уточнение прогностических уравнений с актуализацией по современным данным, после чего проведена комплексная проверка методики на ретроспективных материалах (используемых при ее создании) и независимых данных за 2018 – 2023 годы с оценкой точности прогнозов. Результаты тестирования продемонстрировали, что даже обновленный вариант методики сохраняет недостаточную эффективность, что обусловлено принципиальной неоднородностью условий формирования заторов на реке Печора, исключающей возможность разработки универсального прогностического алгоритма.

Для решения этой задачи была разработана инновационная дискретно-непрерывная модель. Эта модель позволяет классифицировать случаи возникновения максимальных уровней заторов и создавать индивидуальные методы прогнозирования для каждой категории. В ходе исследования успешно использовался кластерный анализ, который определил три основных класса случаев возникновения максимальных уровней. Классификация проводилась с учётом таких параметров, как максимальный уровень вскрытия на посту

Усть-Кожва, расход воды при вскрытии на этом посту и расход воды на посту Усть-Щугор в день вскрытия на посту Усть-Кожва. Такой комплексный подход позволил создать более точную систему прогнозирования заторных явлений с учётом специфических характеристик каждой определённой категории.

На заключительном этапе было произведено построение многофакторных прогностических зависимостей с использованием дискриминантного анализа и с учетом принадлежности к классу. Было выявлено 2 переменные, влияющие на определение класса кластера. Проведенный дискриминантный анализ позволил успешно классифицировать гидрологические данные на три группы (кластеры) на основе количественных показателей. Значение лямбды Уилкса, равной 0,132, свидетельствует о хорошей дискриминации. Наибольший вклад в разделение на группы вносят расход воды по Усть-Щугору в день вскрытия Усть-Кожвы и расход воды при вскрытии на посту Усть-кожва. В первую группу отнесены годы с максимальными расходами во время вскрытия на посту Усть-Кожва, в третью группу – с минимальными расходами.

Для трех выделенных групп при кластеризации были выведены прогностические уравнения, учитывающие два выбранных предиктора, по которым были даны прогнозы на зависимом и независимом материале. Оценка на зависимом материале для трех групп позволила оценить методику как эффективную: $S/\sigma = 0.69$, $S/\sigma = 0.69$ и $S/\sigma = 0.64$. Ошибка прогноза в среднем по группам составляет 68 – 75 см. Минимальная ошибка прогноза фиксировалась в третьей группе

Для полноценной оценки методики были выпущены поверочные прогнозы на независимом материале 2019 – 2023 гг. При этом каждый год, на который давался прогноз, был отнесен к той или иной группе. В целом прогнозы оправдались в 60% случаев независимой выборки. При этом следует отметить, что в рассмотренные год (2019 – 2023) не наблюдалось высоких

расходов. Все рассмотренные случаи попадали в группу 2 и группу 3. Средняя ошибка прогноза уровня составила 80 см (при допустимой 88 см).

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1 Разработана методика прогноза максимальных уровней воды по посту Усть-Ковжа по данным о расходах воды по посту Усть-Щугор в день вскрытия Печоры на посту Усть-Кожва. Значение критерия эффективности методик составляет 0.73 (0.78).

2 Оценка методики на независимом материале показала ее эффективность (80%). Наименьшие погрешности получены при использовании экспоненциальной зависимости.

3 Выполненный кластерный анализ позволил выявить три группы случаев формирования максимальных уровней в зависимости от максимальных расходов воды при вскрытии по посту Усть-Кожва и расходов воды на посту Усть-Щугор в день вскрытия на посту Усть-Кожва. Прогностические зависимости позволяют более точно охарактеризовать год по условиям формирования затора и выбрать прогностическую зависимость. Однако точность зависимостей ненамного превышает точность предложенной ранее экспоненциальной зависимости. Это позволяет говорить о том, что требуется уточнение прогностических зависимостей.

Апробация работы проводилась на студенческой научной конференции в 2023 году. Частично результаты работы представлены в статье «Разработка методики прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 STATISTICA 6. Математическая статистика с элементами теории вероятностей. Учебник. – М.: Издательство Бином, 2010. – 496 с.
- 2 Борец С.В., Филатов Ю.Д. Анализ и обработка статистических данных о последствиях наводнений на реках Российской Федерации. – М.: ВНИИ ГОЧС, 1995.
- 3 Бузин В.А. Проект методических указаний по прогнозу заторов льда и заторных уровней воды. – Л.: ГГИ, 1980.
- 4 Бузин В.А. Факторы образования и прогноз заторов льда на реках севера ЕТР. – Метеорология и гидрология, 2010, № 4. – С. 63 – 74.
- 5 Бузин В.А. Факторы, определяющие максимальный заторный уровень воды. Труды ГГИ, вып. 270, 1980. – 33 с.
- 6 Деев Ю.А., Попов А.Ф. Весенние заторы льда в русловых потоках. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 110 с.
- 7 Карнович В.Н. Кулешова Т.В. Долгосрочный прогноз максимальных уровней воды при заторах льда на р. Ангаре у г. Каменка. Ж-л «Метеорология и гидрология» №12, 1981.
- 8 Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. I, Европейская часть СССР. – Л. Гидрометеиздат, 1976. – 548 с.
- 9 Каталог основных понятий РСЧС в ЧС. ГКЧС РФ. – М.:1993. – 76 с.
- 10 Лисер И.Я. О зависимостях для прогноза максимальных заторных (ледоходных) уровней воды при вскрытии сибирских рек. – Метеорология и гидрология, 1981, № 11. – С. 83 – 87.
- 11 Нежиховский Р.А., Бузин В.А. Условия образования и прогнозы заторов льда на реках. – Метеорология и гидрология, 1977, № 5. – С. 70 – 75.
- 12 Нежиховский Р.А., Саковская Н.П. Прогноз максимального заторного уровня воды р. Северной Двины у г. Архангельска. – Труды ГГИ, 1972, вып. 197. – С. 68 – 96.

- 13 Нежиховский Р.А., Саковская Н.П. Прогнозы максимальных заторных уровней воды рек Северной Двины и Немана. – Труды ГГИ, 1975, вып. 227. – С. 70 – 86.
- 14 Нежиховский Р.А., Саковская Н.П., Ардашева Г.В. Прогнозы максимальных заторных уровней воды в местах ежегодного образования заторов. – Труды IV гидрологического съезда, 1976, т. 7. – С. 345 – 352.
- 15 О ситуации с образованием заторов льда на р. Печора у города Печора. Официальный сайт Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Республики Коми. – Электронный ресурс. Режим доступа: <http://meteork.ru/art004.shtml>
- 16 СНиП 2.01.15-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой СССР, 1983.
- 17 Справочник по опасным природным явлениям в республике, краях и областях Российской Федерации. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1996. – 980 с.
- 18 Бузин, В. А. Методы расчета и прогноза зажорных и заторных уровней воды: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 11.00.07 / Бузин Владимир Александрович. — Санкт-Петербург: Гос. гидрологический ин-т, 1995. – 40 с. – РГБ ОД, 9 95-4/3351-7.
- 19 Горошкова, Н. И., Стриженок, А. В. Особенности процессов вскрытия и образования заторов льда в бассейне верхнего Амура и методика прогноза максимальных заторных уровней [Текст] / Н. И. Горошкова, А. В. Стриженок // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2019. – № 57. – С. 9-21.
- 20 Лыгина, В. А. Методика оценки уровней вод реки Томь при ледовых заторах и зажорах у г. Томска [Текст] / В. А. Лыгина // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – № 1. – С. 135-140.
- 21 Бузин В. А. Закономерности формирования и прогноза максимального уровня воды при заторе льда [Текст] / Бузин В. А. // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 8. – С. 83-91.

- 22 Банщикова, Л.С. Наводнения на реках, вызванные заторами льда, методика их мониторинга и оценки риска: автореф. дис... канд. геогр. наук: 25.00.27 / Банщикова Любовь Святославовна. – Санкт-Петербург, 2009. – 141 с.
- 23 Шаночкин С. В., Сакович В. М. Методика прогноза максимальных заторных уровней и продолжительность стояния затора у г. Великий Устюг / С. В. Шаночкин, В. М. Сакович [Текст] // Актуальные вопросы современной науки. — Уфа: Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2018. — С. 196-200

Приложение А. Исходные гидрометеорологические данные для разработки методики прогноза

Таблица А.1 – Исходные данные по посту Усть-Кожва

Годы	H макс. уст. лдст.	H в первый день лдст.	$H_{\text{макс.}}$ лдст.	Дата подвиж.	H подвиж.	$H_{\text{вскрытия}}$	Дата вскрытия	$H_{\text{макс.лдх}}$	Дата H макс.лдх.	$H_{\text{макс.срочные}}$ при заторе	Q при вскр.	Макс. снегозапасы (S)
1921	113	62	105	—	—	344	24.04.21	732	25.04.21	732	—	—
1922	105	—	—	—	—	472	08.05.22	544	11.05.22	563	—	—
1923	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1924	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1925	—	83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1926	—	149	—	—	—	802	21.05.26	802	21.05.26	802	—	—
1927	—	112	—	—	—	278	30.04.27	710	07.05.27	710	—	—
1928	—	127	233	—	—	395	15.05.28	708	18.05.28	708	—	—
1929	233	135	186	—	—	432	20.05.29	—	—	—	—	—
1930	206	168	173	—	—	376	22.05.30	—	—	—	—	—
1931	173	255	255	05.05.31	305	583	06.05.31	734	09.05.31	734	—	—
1932	255	182	185	02.05.32	303	422	04.05.32	788	05.05.32	788	—	—
1933	196	—	175	04.05.33	306	410	12.05.33	520	13.05.33	520	—	—
1934	172	132	—	10.05.34	408	452	11.05.34	805	14.05.34	805	—	—
1935	—	95	173	20.05.35	511	545	21.05.35	659	24.05.35	659	—	—
1936	173	132	150	06.05.36	287	349	21.05.36	—	—	—	—	—
1937	150	—	—	08.05.37	260	363	16.05.37	388	17.05.37	412	—	—

Продолжение таблицы А.1

Годы	H макс. уст. лдст.	H в первый день лдст.	H макс. лдст.	Дата подвиж.	H подвиж.	H вскрытия	Дата вскрытия	H макс.лдх	Дата H макс.лдх.	H макс.срочные при заторе	Q при вскр.	Макс. снегозапасы (S)
1938	—	19	122	03.05.38	282	664	07.05.38	664	07.05.38	664	—	—
1939	122	152	162	—	—	303	21.05.39	—	—	680	—	—
1940	162	—	—	13.05.40	318	482	18.05.40	574	22.05.40	574	—	—
1941	126	69	168	21.05.41	241	353	23.05.41	600	24.05.41	638	—	—
1942	168	80	215	17.05.42	314	487	19.05.42	659	20.05.42	659	7510	—
1943	215	128	170	01.05.43	316	524	04.05.43	580	15.05.43	580	8380	—
1944	170	49	108	08.05.44	346	646	10.05.44	704	11.05.44	704	7070	—
1945	108	209	234	21.05.45	228	467	23.05.45	521	29.05.45	521	—	—
1946	234	-6	67	13.05.46	337	528	14.05.46	899	15.05.46	899	8470	—
1947	45	83	104	02.05.47	243	416	03.05.47	574	07.05.47	574	5950	—
1948	104	68	209	08.05.48	306	537	11.05.48	616	12.05.48	616	8690	—
1949	209	69	227	08.05.49	363	550	12.05.49	615	13.05.49	615	9000	—
1950	226	28	93	26.04.50	434	522	27.04.50	651	29.04.50	651	8330	—
1951	93	128	141	19.04.51	217	362	20.04.51	506	24.04.51	506	4840	187
1952	141	24	149	—	—	406	26.05.52	—	—	736	5730	220
1953	179	82	122	22.04.53	280	360	23.04.53	519	24.04.53	519	4800	149
1954	122	61	271	29.04.54	294	374	30.04.54	578	01.05.54	578	5080	157
1955	271	42	232	29.04.55	296	488	01.05.55	537	03.05.55	537	7540	178

Продолжение таблицы А.1

Годы	H макс. уст. лдст.	H в первый день лдст.	H макс. лдст.	Дата подвиж.	H подвиж.	H вскрытия	Дата вскрытия	H макс.лдж	Дата H макс.лдж.	H макс.срочные при заторе	Q при вскр.	Макс. снегозапасы (S)
1956	158	160	182	18.05.56	440	440	18.05.56	659	19.05.56	659	6480	127
1957	182	267	275	06.05.57	384	560	07.05.57	644	08.05.57	644	9240	130
1958	275	26	146	18.05.58	560	624	19.05.58	761	20.05.58	761	10900	198
1959	145	18	76	06.05.59	516	516	10.05.59	753	11.05.59	753	8180	152
1960	76	6	116	10.05.60	194	425	16.05.60	474	17.05.60	505	6150	213
1961	116	124		06.05.61	230	328	20.05.61	676	21.05.61	676	4160	292
1962	248	116	221	19.05.62	302	488	03.05.62	699	05.05.62	699	7540	238
1963	221	64	152	01.05.63	448	532	10.05.63	665	14.05.63	665	8950	222
1964	152	70	117	08.05.64	496	496	20.05.64	727	22.05.64	727	7710	—
1965	116	89	214	20.05.65	284	396	09.05.65	551	19.05.65	551	5520	185
1966	214	200	316	08.05.66	398	474	18.05.66	502	21.05.66	624	7230	218
1967	306	65	232	12.05.67	378	592	30.04.67	837	01.05.67	837	10000	212
1968	108	76	122	28.04.68	291	551	13.05.68	630	16.05.68	630	9020	200
1969	122	26	77	11.05.69	310	361	26.05.69	664	27.05.69	664	9260	190
1970	40	-10	202	25.05.70	255	364	24.05.70	561	26.05.70	561	4880	143
1971	182	179	185	19.05.71	388	552	24.05.71	692	24.05.71	692	9050	278
1972	185	29	89	23.05.72	394	518	30.05.72	637	31.05.72	641	8230	243
1973	89	236	242	28.05.73	366	426	03.05.73	519	06.05.73	519	6170	313

Продолжение таблицы А.1

Годы	H макс. уст. лдст.	H в первый день лдст.	H макс. лдст.	Дата подвиж.	H подвиж.	H вскрытия	Дата вскрытия	H макс.лдх	Дата H макс.лдх.	H макс.срочные при заторе	Q при вскр.	Макс. снегозапасы (S)
1974	242	-22	54	27.04.74	404	524	14.05.74	848	15.05.74	848	8380	284
1975	54	48	153	13.05.75	256	350	30.04.75	398	02.05.75	408	4600	244
1976	152	50	61	13.05.76	284	684	11.05.76	720	11.05.76	720	12600	266
1977	61	38	170	21.04.77	138	325	01.05.77	520	03.05.77	520	4120	205
1978	170	153	155	09.05.78	428	498	27.05.78	713	28.05.78	713	7760	352
1979	155	266	267	29.04.79	614	614	09.05.79	1018	10.05.79	1018	10600	231
1980	267	89	106	06.05.80	391	378	10.05.80	474	12.05.80	474	5160	168
1981	106	88	129	12.05.81	301	426	12.05.81	763	16.05.81	763	5268	238
1982	129	-37	69	—	—	434	03.05.82	547	04.05.82	569	5412	240
1983	69	78	184	28.04.83	267	517	29.04.83	759	30.04.83	759	7020	266
1984	184	-19	66	14.05.84	616	684	15.05.84	721	15.05.84	721	12600	244
1985	66	-24	30	14.05.85	352	388	15.05.85	719	19.05.85	719	4584	213
1986	30	117	237	06.05.86	342	344	18.05.86	354	18.05.86	554	3824	225
1987	145	-48	9	13.05.87	351	539	14.05.87	773	15.05.87	773	7460	212
1988	9	108	127	13.05.88	251	399	14.05.88	524	15.05.88	524	4782	182
1989	127	31	124	15.05.89	523	523	15.05.89	—	—	666	7140	230
1990	124	99	103	29.04.90	277	475	01.05.90	609	02.05.90	609	6180	243
1991	103	0	127	24.04.91	276	454	25.04.91	550	29.04.91	566	5776	252

Продолжение таблицы А.1

Годы	H макс. уст. лдст.	H в первый день лдст.	H макс. лдст.	Дата подвиж.	H подвиж.	H вскрытия	Дата вскрытия	H макс.лдх	Дата H макс.лдх.	H макс.срочные при заторе	Q при вскр.	Макс. снегозапасы (S)
1992	127	70	163	12.05.92	241	431	13.05.92	616	15.05.92	616	5358	208
1993	163	87	114	10.05.93	291	461	11.05.93	678	12.05.93	678	5909	302
1994	114	37	97	04.05.94	342	622	06.05.94	668	08.05.94	668	9244	225
1995	97	166	223	17.04.95	221	414	19.04.95	576	24.04.95	576	5052	209
1996	223	51	141	11.05.96	516	855	12.05.96	867	12.05.96	867		188
1997	141	107	141	28.04.97	330	477	02.05.97	739	03.05.97	739	6220	195
1998	141	-6	304	23.05.98	390	671	25.05.98	765	27.05.98	765	12400	279
1999	304	86	135	29.05.99	348	707	02.05.99	758	02.04.99	758	12800	193
2000	135	16	154	25.04.00	400	517	26.04.00	622	30.04.00	622	7020	221
2001	154	7	79	30.04.01	409	409	30.04.01	—	—	563	4962	185
2002	79	113	212	02.05.02	209	356	03.05.02	—	—	592	4022	224
2003	212	19	73	12.05.03	498	498	12.05.03	906	14.05.03	906	6640	260
2004	73	33	112	17.05.04	291	648	20.05.04	874	21.05.04	874	9920	236
2005	112	35	215	12.05.05	365	388	12.05.05	552	13.05.05	646	4584	166
2006	140	-6	525	12.05.06	269	386	13.05.06	541	14.05.06	541	4548	167
2007	525	50	134	02.05.07	689	447	15.05.07	447	15.05.07	692	5646	226
2008	134	117	295	17.05.08	388	580	18.05.08	628	19.05.08	628	8320	245

Продолжение таблицы А.1

Годы	H макс. уст. лдет.	H в первый день лдет.	H макс. лдет.	Дата подвиж.	H подвиж.	H вскрытия	Дата вскрытия	H макс.лдж	Дата H макс.лдж.	H макс.срочные при заторе	Q при вскр.	Макс. снегозапасы (S)
2009	228	13	96	16.05.09	476	476	16.05.09	854	18.05.09	854	6220	224
2010	104	106	251	27.04.10	279	399	28.04.10	669	29.04.10	669	4782	244
2011	251	87	133	26.04.11	416	396	04.05.11			460	4782	122
2012	124	51	126	28.04.12	341	619	29.04.12	680	29.04.12	680	9178	131
2013	126	154	442	05.05.13	286	401	07.05.13	522	08.05.13	522	4818	166
2014	442	9	93	08.05.14	417	538	09.05.14	666	11.05.14	666	7440	163
2015	93	136	168	08.05.15	359	572	10.05.15	656	11.05.15	664	8144	213
2016	168	-39	17	23.04.16	278	500	24.04.16	646	25.04.16	646	6680	192
2017	17	160	174	22.05.17	279	433	25.05.17	440	25.05.17	715	9394	264
2018	174	48	213	17.05.18	420	497	18.05.18	650	20.05.18	650	6620	250
2019	213	152	224	—	—	414	10.05.19	661	16.05.19	661	5052	258
2020	185	86	182	07.05.20	349	504	08.05.20	644	09.05.20	753	6760	285
2021	182	—	211	25.04.21	281	364	26.04.21	454	29.04.21	462	4158	125
2022	212	23	52	07.05.22	338	497	08.05.22	538	09.05.22	563	6620	238
2023	69	38	129	05.05.23	241	397	07.05.23	600	08.05.23	598	4746	198

Таблица А.2 – Исходные данные по посту Усть-Щугор

Год Ы	$H_{\text{макс.}}_{\text{уст.лдс}}$	$H_{\text{в первый}}_{\text{день}}_{\text{лдст.}}$	$H_{\text{макс.}}_{\text{лдст.}}$	Дата подвижк и	$H_{\text{подвиж.}}$	$H_{\text{вскрытие}}$	Дата вскрыти я	$H_{\text{макс.лдх.}}$	Дата $H_{\text{макс.лдх.}}$	$H_{\text{макс.срочные}}_{\text{при заторе}}$	$Q_{\text{при}}_{\text{вскр}}$	$Q_{\text{по У-}}_{\text{Щ в день}}_{\text{вскр.}}_{\text{У-,К}}$	Макс. снегозапас ы (S)
1921	107	—	—	—	—	544	22.04.21	764	27.04.21	764	—	—	—
1922	147	—	—	—	—	211	06.05.22	—	—	762	—	—	—
1923	151	—	—	—	—	222	21.05.23	—	—	984	—	—	—
1924	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1925	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1926	217	—	—	—	—	540	18.05.26	667	22.05.26	667	—	—	—
1927	227	—	—	—	—	515	01.05.27	680	03.05.27	680	—	—	—
1928	238	—	—	—	—	518	14.05.28	970	19.05.28	970	—	—	—
1929	412	—	—	—	—	1569	20.05.29	1569	20.05.29	1569	—	—	—
1930	130	—	—	—	—	456	19.05.30	735	24.05.30	735	—	—	—
1931	140	—	—	02.08.31	219	276	03.05.31	521	04.05.31	681	—	—	—
1932	162	—	—	30.04.32	319	621	02.05.32	—	—	689	—	—	—
1933	230	—	—	02.05.33	308	418	08.05.33	865	10.05.33	865	—	—	—
1934	161	—	—	07.05.34	405	696	10.05.34	747	09.05.34	868	—	—	—
1935	177	—	—	14.05.35	263	773	16.05.35	773	16.05.35	773	—	—	—
1936	237	—	—	03.05.36	364	589	06.05.36	589	06.05.36	786	—	—	—
1937	171	—	—	03.05.37	305	348	05.05.37	743	07.05.37	743	—	—	—
1938	166	—	—	28.04.38	291	622	03.05.38	729	03.05.38	729	—	—	—
1939	148	—	—	04.05.39	335	603	21.05.39	808	22.05.39	892	—	—	—

Продолжение таблицы А.2

Годы	$H_{\text{макс. уст.лде}}$	H в первый день лдст.	$H_{\text{макс. лдст.}}$	Дата ПОДВИЖКИ	$H_{\text{подвиж.}}$	$H_{\text{вскрытие}}$	Дата вскрытия	$H_{\text{макс.лдх.}}$	Дата $H_{\text{макс.лдх.}}$	$H_{\text{макс.срочные}}$ при заторе	Q при вскр	$Q_{\text{по У-Щ в}}$ день вскр. У-,К	Макс. снегозапасы (S)
1940	186	—	—	28.04.40	263	535	11.05.40	740	12.05.40	740	—	—	—
1941	160	—	—	—	—	413	21.05.41	—	—	898	—	—	—
1942	246	—	—	13.05.42	350	878	16.05.42	914	16.05.42	914	—	—	—
1943	358	—	—	29.04.43	449	494	06.05.43	504	30.04.43	645	—	—	—
1944	224	—	—	04.05.44	200	386	22.05.44	680	17.05.44	693	—	—	—
1945	165	—	—	19.05.45	184	524	14.05.45	524	22.05.45	670	—	—	—
1946	306	—	—	12.05.46	468	600	02.05.46	909	19.05.46	909	—	—	—
1947	86	—	—	30.04.47	180	466	07.05.47	—	—	775	—	—	—
1948	144	—	—	06.05.48	266	606	06.05.48	669	11.05.48	669	—	—	252
1949	228	—	—	04.05.49	332	838	25.04.49	904	06.05.49	904	—	—	252
1950	253	—	—	23.04.50	350	514	19.04.50	614	30.04.50	702	—	—	258
1951	162	—	—	—	—	477	24.05.51	608	23.04.51	608	—	—	226
1952	154	—	—	—	—	385	22.04.52	—	—	1087	—	—	259
1953	194	—	—	21.04.53	330	479	28.04.53	613	25.04.53	613	—	—	232
1954	153	—	—	27.04.54	282	422	28.04.54	522	29.04.54	522	—	—	230
1955	357	—	—	28.04.55	333	446	29.04.55	630	02.05.55	677	—	5200	255
1956	205	—	—	14.05.56	312	706	17.05.56	810	17.05.56	810	3500	6520	166
1957	213	—	—	04.05.57	356	530	05.15.1957	847	09.05.57	847	3030	8740	225
1958	334	—	—	13.05.58	445	764	15.05.58	823	15.05.58	823	9170	5150	278
1959	174	—	—	08.05.59	430	666	09.05.59	787	12.05.59	787	5740	7860	274

Продолжение таблицы А.2

Годы	$H_{\text{макс. уст.лдс}}$	H в первый день лдст.	H макс. лдст.	Дата подвижки	H подвиж.	$H_{\text{вскрытие}}$	Дата вскрытия	$H_{\text{макс.лдх.}}$	Дата H макс.лдх.	$H_{\text{макс.срочные}}$ при заторе	Q при вскр	$Q_{\text{по У-}}$ Щ в день вскр. У-,К	Макс. снегозапасы (S)
1960	170	—	—	04.05.60	249	518	08.05.60	571	23.05.60	571	3090	2930	240
1961	202	—	—	17.05.61	274	482	18.05.61	820	26.05.61	820	4210	6190	285
1962	307	—	—	29.04.62	356	32	01.05.62	—	—	876	2540	4570	291
1963	571	—	—	06.05.63	670	1273	09.05.63	1444	11.05.63	1444	6300	5720	267
1964	286	—	—	18.05.64	347	426	18.05.64	819	22.05.64	819	2800	7900	—
1965	203	—	—	06.05.65	264	360	06.05.65	730	18.05.65	730	2230	3800	137
1966	424	—	—	06.05.66	592	764	18.05.66	886	18.05.66	886	3100	3100	256
1967	463	—	—	26.04.67	483	657	28.04.67	807	01.05.67	807	6110	7020	215
1968	169	—	—	09.05.68	284	673	11.05.68	802	15.05.68	802	5320	7530	231
1969	191	—	—	21.05.69	280	561	25.05.69	579	25.05.69	659	4990	4060	172
1970	127	—	—	15.05.70	336	449	21.05.70	710	27.05.70	710	2750	3570	203
1971	236	—	—	19.05.71	412	656	21.05.71	760	21.05.71	760	3490	4480	263
1972	255	—	—	21.05.72	311	522	24.05.72	818	05.04.72	818	3240	4750	293
1973	182	—	—	20.04.73	352	665	28.04.73	700	28.04.73	700	4570	2600	290
1974	257	—	—	10.05.74	327	568	11.05.74	939	12.05.74	939	2660	5830	262
1975	176	—	—	18.04.75	237	472	19.04.75	711	19.04.75	711	2170	2160	258
1976	216	—	—	06.05.76	295	538	08.05.76	767	16.05.76	767	3700	5770	286
1977	122	—	—	29.04.77	232	396	30.04.77	652	03.05.77	708	1530	3160	240
1978	247	—	—	20.05.78	415	415	20.05.78	927	22.05.78	927	2750	4540	326
1979	215	—	—	06.05.79	254	663	08.05.79	—	—	876	4900	10400	289

Продолжение таблицы А.2

Годы	$H_{\text{макс. уст.лде}}$	H в первый день лдст.	H макс. лдст.	Дата подвижки	H подвиж.	$H_{\text{вскрытие}}$	Дата вскрытия	$H_{\text{макс.лдх.}}$	Дата H макс.лдх.	$H_{\text{макс.срочные}}$ при заторе	Q при вскр	$Q_{\text{по У-Щ}}$ в день вскр. У-,К	Макс. снегозапасы (S)
1980	278	—	—	29.04.80	392	701	04.05.80	708	03.05.80	708	7090	2120	195
1981	191	—	—	09.05.81	244	404	10.05.81	551	15.05.81	697	2090	3700	318
1982	193	—	—	30.04.82	270	374	01.05.82	684	08.05.82	762	1610	3470	260
1983	109	—	—	25.04.83	263	557	27.04.83	598	01.05.83	672	2640	4490	333
1984	290	—	—	11.05.84	263	640	13.05.84	686	16.05.84	729	4090	7480	305
1985	213	—	—	10.05.85	390	656	14.05.85	671	14.05.85	671	5670	2950	225
1986	139	—	—	03.05.86	476	550	14.05.86	554	14.05.86	748	2130	2520	307
1987	361	—	—	11.05.87	370	599	13.05.87	860	19.05.87	860	3950	4830	215
1988	121	—	—	10.05.88	243	555	12.05.88	665	24.05.88	665	1550	3060	201
1989	193	—	—	12.05.89	234	435	13.05.89	—	—	931	2110	4580	273
1990	209	—	—	27.04.90	307	409	29.04.90	677	05.05.90	900	1960	3940	302
1991	227	—	—	22.04.91	344	494	23.04.91	741	08.05.91	741	3090	3680	300
1992	224	—	—	12.04.92	513	728	13.05.92	799	19.05.92	799	5950	3410	231
1993	370	—	—	08.05.93	532	767	09.05.93	895	09.05.93	895	3980	3760	378
1994	272	—	—	02.05.94	443	507	04.05.94	545	06.05.94	697	4350	6210	242
1995	223	—	—	15.04.95	311	479	18.04.95	783	23.04.95	783	3990	3220	258
1996	276	—	—	09.05.96	464	647	10.05.96	683	10.05.96	683	6670	11700	251
1997	226	—	—	24.04.97	324	485	28.04.97	728	10.05.97	728	4060	3960	263
1998	211	—	—	17.05.98	454	763	22.05.98	1011	27.05.98	1011	9360	7190	320
1999	299	—	—	10.05.99	506	544	28.05.99	925	08.04.99	925	4910	8020	276

Продолжение таблицы А.2

Годы	$H_{\text{макс. уст.лде}}$	H в первый день лдст.	H макс. лдст.	Дата ПОДВИЖКИ	H подвиж.	$H_{\text{вскрытие}}$	Дата вскрытия	$H_{\text{макс.лдх.}}$	Дата H макс.лдх.	$H_{\text{макс.срочные}}$ при заторе	Q при вскр	Q по У- Щ в день вскр. У-,К	Макс. снегозапасы (S)
2000	211	—	—	22.04.00	328	516	24.04.00	682	29.04.00	682	2690	4490	266
2001	197	—	—	27.04.01	263	437	29.04.01	—	—	786	3480	3160	231
2002	151	—	—	01.05.02	274	274	01.05.02	771	07.05.02	771	1310	2630	255
2003	295	—	—	09.05.03	374	601	10.05.03	809	20.05.03	809	2930	4220	273
2004	159	—	—	14.05.04	361	622	15.02.04	710	16.05.04	1015	6210	6690	293
2005	220	—	—	04.05.05	324	482	09.05.05	844	16.05.05	844	2810	2950	174
2006	188	—	—	10.05.06	391	391	10.05.06	676	18.05.06	676	1910	2930	250
2007	403	—	—	26.04.07	553	836	28.04.07	880	30.04.07	880	3920	3600	307
2008	242	—	—	14.05.08	445	668	15.05.08	812	15.05.08	812	5960	5490	322
2009	370	—	—	13.05.09	338	609	14.05.09	781	14.05.09	781	5980	3950	257
2010	216	—	—	24.04.10	242	461	26.04.10	567	28.04.10	690	3760	3060	257
2011	310	—	—	19.04.11	379	589	24.04.11	655	25.04.11	655	5640	3030	194
2012	232	—	—	24.04.12	357	722	27.04.12	901	27.04.12	901	8380	6160	199
2013	281	—	—	05.05.13	542	720	06.05.13	755	06.05.13	755	8330	3080	246
2014	355	—	—	30.04.14	386	493	04.05.14	761	16.05.14	761	4160	4810	246
2015	191	—	—	05.05.15	325	497	06.05.15	880	20.04.15	880	4210	5360	297
2016	232	—	—	20.04.16	273	375	21.04.16	650	22.04.16	650	2820	4250	221
2017	70	—	—	07.05.17	295	499	10.05.17	678	11.05.17	906	4240	3430	307
2018	188	—	—	13.05.18	215	373	14.05.18	507	14.05.18	761	2800	4210	316
2019	231	—	—	07.05.19	300	485	15.05.19	829	15.05.19	829	4060	3220	329
2020	268	—	—	04.05.20	449	559	15.05.20	1006	15.05.20	1006	5140	4310	343
2021	239	—	—	22.04.21	306	401	30.04.21	477	30.04.21	651	3080	2710	193
2022	348	—	—	02.05.22	390	658	07.05.22	859	07.05.22	859	6900	4210	258
2023	135	—	—	01.05.23	242	692	11.05.23	558	11.05.23	730	7670	3040	295

Приложение Б. Исходные гидрометеорологические данные и результаты проверки методики на зависимом материале

Таблица Б.1 – Результаты проверки методики на зависимом материале

Год	$H_{\text{мах лдх. У.-К. факт.}}$	$Q_{\text{У.-Щ. в день вскр. У.-К.}}$	$H_{\text{мах лдх. У.-К. прогн.}}$		Ошибка прогноза		Оправдываемость	
			эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.
1955	537	5200	673	678	-136	-141	-	-
1956	659	6520	738	737	-79	-78	+	+
1957	644	8740	862	821	-218	-177	-	-
1958	761	5150	671	675	90	86	-	+
1959	753	7860	810	790	-57	-37	+	+
1960	474	2930	574	548	-100	-74	-	+
1961	676	6190	721	723	-45	-47	+	+
1962	699	4570	644	646	55	53	+	+
1963	665	5720	698	702	-33	-37	+	+
1964	727	7900	813	791	-86	-64	+	+
1965	551	3800	610	603	-59	-52	+	+
1966	502	3100	581	559	-79	-57	+	+
1967	837	7020	764	757	73	80	+	+
1968	630	7530	792	777	-162	-147	-	-
1969	664	4060	622	618	42	46	+	+
1970	561	3570	601	589	-40	-28	+	+
1971	692	4480	640	641	52	51	+	+

Продолжение таблицы Б.1

Год	$H_{\text{мах лдх. У.-К. факт.}}$	$Q_{\text{У.-Щ. в день вскр. У.-К.}}$	$H_{\text{мах лдх. У.-К. прогн.}}$		Ошибка прогноза		Оправдываемость	
			эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.
1972	637	4750	652	655	-15	-18	+	+
1973	519	2600	561	524	-42	-5	+	+
1974	848	5830	703	707	145	141	-	-
1975	398	2160	544	489	-146	-91	-	-
1976	720	5770	700	704	20	16	+	+
1977	520	3160	584	563	-64	-43	+	+
1978	713	4540	643	644	70	69	+	+
1979	1018	10400	967	876	51	142	+	-
1980	474	2120	543	486	-69	-12	+	+
1981	763	3700	606	597	157	166	-	-
1982	547	3470	596	583	-49	-36	+	+
1983	759	4490	640	642	119	117	-	-
1984	721	7480	789	775	-68	-54	+	+
1985	719	2950	575	549	144	170	-	-
1986	354	2520	558	518	-204	-164	-	-
1987	773	4830	656	659	117	114	-	-
1988	524	3060	580	557	-56	-33	+	+
1990	609	3940	616	611	-7	-2	+	+

Продолжение таблицы Б.1

Год	$H_{\text{мах лдх. У.-К. факт.}}$	$Q_{\text{У.-Щ. в день вскр. У.-К.}}$	$H_{\text{мах лдх. У.-К. прогн.}}$		Ошибка прогноза		Оправдываемость	
			эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.
1991	550	3680	605	596	-55	-46	+	+
1992	616	3410	594	579	22	37	+	+
1993	678	3760	609	601	69	77	+	+
1994	668	6210	722	724	-54	-56	+	+
1995	576	3220	586	567	-10	9	+	+
1996	867	11700	1059	915	-192	-48	-	+
1997	739	3960	617	612	122	127	-	-
1998	765	7190	773	764	-8	1	+	+
1999	758	8020	819	796	-61	-38	+	+
2000	622	4490	640	642	-18	-20	+	+
2003	906	4220	629	627	277	279	-	-
2004	874	6690	747	744	127	130	-	-
2005	552	2950	575	549	-23	3	+	+
2006	541	2930	574	548	-33	-7	+	+
2007	447	3600	602	591	-155	-144	-	-
2008	628	5490	687	691	-59	-63	+	+
2009	854	3950	617	612	237	242	-	-
2010	669	3060	580	557	89	112	-	-

Продолжение таблицы Б.1

Год	$H_{\text{мах лдх. У.-К. факт.}}$	Q У.-Щ. в день вскр. У.-К.	$H_{\text{мах лдх. У.-К. прогн.}}$		Ошибка прогноза		Оправдываемость	
			эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.	эксп. завис.	степ. завис.
2012	680	6160	720	721	-40	-41	+	+
2013	522	3080	580	558	-58	-36	+	+
2014	666	4810	655	658	11	8	+	+
2015	656	5360	681	685	-25	-29	+	+
2016	646	4250	630	629	16	17	+	+