



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

Кафедра инженерной гидрологии

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(выпускная квалификационная работа)

На тему Разработка 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

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

Хаустов Виталий Александрович  
(фамилия, имя, отчество)

«12» июня 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Физико-географическая характеристика района.....	6
1.1 Географическое положение.....	6
1.2 Рельеф и геологическое строение.....	7
1.3 Почва.....	9
1.4 Растительность.....	9
1.5 Характеристика ледового режима реки Печора.....	9
1.6 Климатическая характеристика.....	13
2 Методы прогноза максимальных заторных уровней.....	16
2.1 Методы оценки риска и прогноза зажорных и заторных наводнений....	16
2.1.1 Прогнозирование зажоров льда и максимальных зажорных уровней. 16	
2.1.2 Прогноз максимальных заторных уровней воды.....	19
2.1.3 Методика прогнозов заторов и обусловленных ими уровней воды на реках севера ЕТР.....	35
2.2 Прогнозирование заторов и максимальных заторов уровней воды.....	42
2.2.1 Прогноз образования возможных участков и зон заторов льда на реках .....	42
2.2.2 Прогнозирование подъема уровня воды и возможность последствий заторного наводнения.....	43
3 Разработка методики прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора в районе города Печора.....	45
3.1 Характеристика заторных участков.....	45
3.2 Исходные данные для разработки методики.....	49
3.3 Методика прогноза максимальных заторных уровней.....	51
3.4 Метод кластерного анализа.....	58
3.4.1 Метод $k$ – средних.....	59
3.4.2 Метод иерархической классификации.....	74

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	78
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	80
Приложение А. Исходные гидрометеорологические данные для разработки методики прогноза .....	84
Приложение Б. Исходные гидрометеорологические данные и результаты проверки методики на зависимом материале.....	95

## ВВЕДЕНИЕ

Заторы льда на реке Печора обычно являются причиной подъемов уровней воды выше опасной отметки 700 см над нулем графика водпоста Усть-Кожва, вызывающих подтопление хозяйственных и жилых объектов. По данным каталога заторных и зажорных явлений на реках севера ЕТР [22] заторы на этом участке имели повторяемость 77%. В настоящее время, согласно данным Коми ЦГМС, частота заторов льда на р. Печора ниже города значительно повысилась, вызывая подтопление в пос. Путеец, пос. Набережный, на территории Кожвинской нефтебазы и других пониженных участках города Печора, а также подтопление автодорог и городских коммуникаций [33].

Поскольку заторные явления относятся к опасным и приводят к значительному материальному ущербу, заблаговременное их предсказание является важной задачей, позволяющей разработать мероприятия по предотвращению их негативного воздействия.

Целью исследования – разработка методики прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора на водпосту Усть-Кожва.

Задачи исследования включают:

- 1) изучение особенностей формирования заторов на реке Печора;
- 2) сбор исходные гидрометеорологических данных;
- 3) анализ условий формирования и выбор наиболее информативных предикторов;
- 4) разработка методики прогноза и оценка ее эффективности;
- 5) апробация методики на независимом материале.

Объектом исследования является уровенный режим реки Печора, на заторном участке вблизи города Печора.

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

Практическая значимость работы состоит в том, что ее результаты могут быть использованы в оперативной прогностической работе Коми ЦГМС.

# 1 Физико-географическая характеристика района

## 1.1 Географическое положение

Река Печора расположена на северо-востоке европейской части России и считается самым крупным, мощным и уникальным водотоком Северного края. Река протекает через территории республики Коми и Ненецкого автономного округа и сливается в Баренцево море, доставляя ежегодно около  $130 \text{ км}^3$  пресной воды. Это количество в два раза меньше, чем у Волги, но на 1.6 раза больше, чем у Днепра и Дона вместе взятых. В бассейне реки Печора находится 34 571 тысячи рек и ручьев, а также более 60 тысяч озер и озерков. Длина реки составляет 1809 километров, а площадь водосбора бассейна – 322 тысячи квадратных километров (рисунок 1.1).

Исток Печоры находится в горах Северного Урала, что придает ее течению характеристики горной реки. Она пробегает через узкую долину, окаймленную зелеными лугами, и в процессе своего пути несколько раз меняет направление: сначала движется на юг, затем поворачивает на запад, и наконец, на север. В итоге Печора вливается в Баренцево море, точнее в Печорскую губу, принадлежащую к бассейну Северного Ледовитого океана.

Печора обладает множеством притоков, как крупных, так и мелких. В числе правобережных притоков, истекающих с Уральских гор, можно выделить Илыч, Подчерье, Щугор и Усу. Притоки Лая, Колва и Шапкина возникают на склонах Большеземельского хребта. Левобережные притоки включают в себя Северную Мылву, Ижму, Пижму, Цильму и Сулу, которые берут начало на Тиманском кряже. В то время как Велью, Лемью, Кожва и Лыжа возникают на Лемьонской возвышенности. Печора и Унья, в свою очередь, происходят из гор одного из Уральских хребтов, называемого Поясовым камнем.

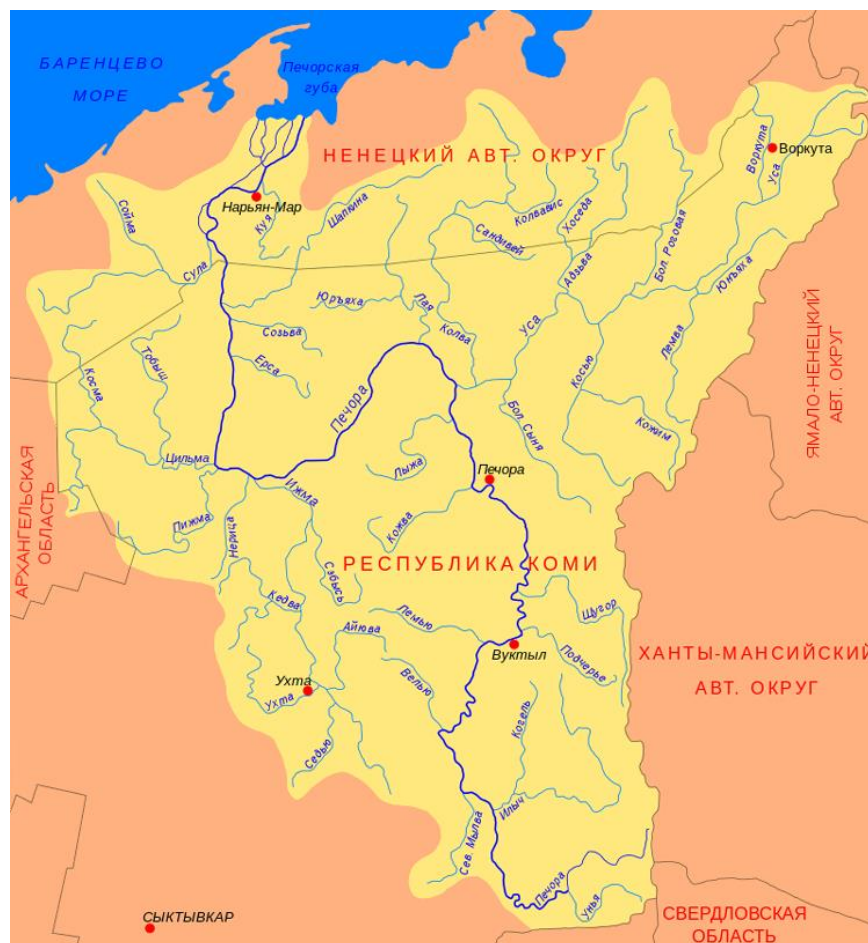


Рисунок 1.1 – Карта района исследования

## 1.2 Рельеф и геологическое строение

Площадь района исследований составляет около 155 тысяч км<sup>2</sup>, простираясь с юга на север на 440 км, и с запада на восток на 730 км. В широтном отношении район исследований располагается между 64° и 68° с.ш., в пределах двух физико-географических зон – тундровой и таежной.

Район ограничен Тиманским кряжем на западе, Уральскими горами на востоке, небольшими возвышенностями Большеземельской тундры на севере и водоразделом Ижма-Печора на юге.

На территории исследуемого района различают две главные части: западная, которая в основном представляет собой слабохолмистую равнину, и восточная – область гор Урала. Западная часть относится к северо-восточной окраине

Европейской платформы, восточная – к Уральскому кряжу. Геологическая структура района отражается в его рельефе.

В рамках исследуемого района выделяются три главные географические области: Тиманская возвышенность, Печорская низменность и Западный склон Урала.

Тиманская возвышенность характеризуется полугорным рельефом, тянущимся с юго-востока на северо-запад и служащим водоразделом для бассейнов рек Мезени, Вычегды и Печоры. Высота возвышенностей варьируется от 200 до 250 метров над уровнем моря, а в осевой части кряжа поднимаются до 400 – 470 метров над уровнем моря.

Печорская низменность, расположенная между Тиманом и Уралом, представляет собой обширную пониженную область, заполненную четвертичными отложениями. На юге от широтной линии русла Печоры рельеф повышается и приобретает холмистый характер, особенно в областях Айювинской и Большекожвинской возвышенностей.

Большеземельская тундра включает в себя северную часть Печорской низменности, где преобладают холмистые равнины с вытянутыми возвышенностями грядового характера, называемыми «мусюрами», и высотой 40 – 50 м. На востоке есть гряда Чернышева – слабо поднятая денудационная равнина, высоты которой составляют 200 – 250 м БС, и местами развиты карстовые формы рельефа. Центр равнины занимает долина р. Печоры с эрозионно-аккумулятивными террасами, которая расширяется в низовьях до 20 – 25 км.

Уральский хребет в рамках исследования разделяется на две части: Полярный и Приполярный Урал. Полярный Урал представляет собой горную систему с вершинами до 800 – 1200 метров над уровнем моря и изолированными пиками до 1500 метров. Приполярный Урал является наивысшей частью этого хребта.



### 1.3 Почва

Бассейн реки Печора располагается в областях субарктической тундры и в лесной зоне, для которых характерны подзолистые почвы. Восточная часть бассейна располагается в пределах Уральского горного региона.

У реки Печора на участке Усть-Усы до Усть-Цильмы левый берег более высокий. На отмелях, состоящих из камней и глины, встречаются полосы торфа. Берега глинистые, иногда с вкраплениями песчаника (Щельяюр).

В районе села Усть-Цильма берега реки Печора становятся низкими, а ниже него по левому берегу на протяжении пяти километров тянется пустынная отмель. В то же время, правый берег ниже притока Ижмы остается высоким и обрывистым.

Ниже села Хабариха правый берег Печоры поднимается, становится высоким и обрывистым. На нем представлены тяжелые моренные глины серого или бурого цвета с прослоями желтого песка и иногда торфа. Только возле устья реки Сулы можно найти выходы скальных пород.

В нижнем течении русло реки неустойчивое, грунты легкие, песчаные.

### 1.4 Растительность

Растительный покров распределяется по территории бассейна в соответствии с вертикальной зональностью, характерной для западного склона Уральского хребта. Часть бассейна располагается в зоне тундр, а часть – в зоне тайги. Более 80% территории бассейна занято лесами, около 10% – болотами.

### 1.5 Характеристика ледового режима реки Печора

#### *Ледовый режим реки Печора*

Печора представляет собой масштабную водную магистраль, относящуюся к третьему типу замерзания, с характерными свойствами быстрого течения.

Формирование льда на Печоре происходит по всей ее глубине, с консолидацией и замораживанием шуги, что ведет к созданию ледяного покрова. Все эти явления приводят к полному очищению ото льда и подробно описаны в процессе каждой фазы.

#### *Ледовый режим в период замерзания*

Формирование первичных ледяных образований обычно инициируется вблизи береговых зон и связано с снижением температуры воздуха до 0 °С, что соответствует географическому закону. Появление стабильных ледяных формаций отмечается при отрицательных температурах около минус 14 °С. Ранее были обнаружены два сегмента реки, где первые ледяные образования отмечались в октябре. Но сегодня, в связи с повышением температуры воздуха во всем Северном регионе, первые признаки образования льда обнаруживаются в конце октября по всей протяженности реки. Статистические анализы выявили сильную корреляцию между датами, уровнем воды и формированием ледяных явлений, с коэффициентами корреляции 0.78 и 0.63 соответственно. Первичные ледяные образования вдоль всего течения реки проявляются в виде совокупности береговых образований и редкого или плотного течения, что является типичным для многих крупных рек. Во время ледохода обычно отмечается максимальный уровень воды, вызванный резким сужением русла.

Река Печора характеризуется увеличением частоты осенних ледоходов вверх по течению: в Усть-Унье частота невелика и составляет 41%, в диапазоне от Усть-Кожва до Усть-Цильма она достигает 100%, но к устью резко снижается до 35%. Средняя продолжительность осеннего ледохода колеблется от 7 до 10 дней в верхней части течения, около 13 дней в центральной части и сокращается до 4 дней на участке от села Ермицы до устья. Максимальный срок ледохода может достигать 30 дней. Большинство станций на реке показывают увеличение продолжительности осеннего ледохода в течение долгого периода, за исключением участка реки Печора между Щельяюром и Усть-Цильмой. Отмечается, что в 2006 – 2007 годах в верхнем течении и в 2013 – 2014 годах в среднем течении наблюдался самый высокий уровень ледохода за многолетний период.

### *Ледовый режим в период ледостава*

От появления первых ледовых образований до образования устойчивого ледостава, который длится не менее 10 дней, может пройти достаточно длительное время, до 2 месяцев. Обычно этот период составляет 10 – 12 дней в нижнем и верхнем течении, около 20 дней в среднем течении, при условии, что сумма отрицательных температур не превышает минус 34 °С. Однако точное значение этого периода зависит от площади водосбора и уровня воды во время замерзания.

Длительность переходного периода стационарна в нижнем и среднем течении, в то время как в верхнем течении она увеличивается на 3 дня, что является статистически значимым. На участке между Усть-Усой и Усть-Кожвой происходит обратная тенденция, которая связана с понижением уровня воды в переходный период.

Сроки замерзания реки на всей ее протяженности достаточно согласованы, что подтверждается средним коэффициентом корреляции, равным 0.81. Формирование ледостава на реке Печора характеризуется значительным повышением уровня воды в первые 8 – 11 дней до достижения максимального уровня воды в верховьях или близких к нему точках. Этот уровень отражает уменьшение пропускной способности русла из-за образования ледостава и может значительно повлиять на максимальный уровень весеннего ледохода, особенно если образование ледостава вызвано зажорными явлениями.

В соответствии с Каталогом заторных и зажорных участков рек СССР, на Печоре имеется 12 зажорных участков. Анализ ледовой обстановки и уровней воды за многолетний период показал, что зажоры на Печоре происходят практически ежегодно с повторяемостью около 90% на всех постах, за исключением устьевого участка около села Оксина, где повторяемость составляет около 50%. Зажоры на Печоре и ее притоках Ижме, Суле и Цильме могут достигать 3.5 – 5 метров.

Образование краткосрочных зажоров льда характерно для Печоры, но они не оказывают значительного влияния на формирование весеннего ледохода. Это

затрудняет прогнозирование весенних уровней воды с большой заблаговременностью. При анализе данных за длительный период не было обнаружено каких-либо значимых статистических тенденций, связанных с уровнем воды.

С момента образования устойчивого ледостава начинается активный процесс роста ледяного покрова. Обычно максимальная толщина льда на всех наблюдательных пунктах достигается в марте – апреле. Распределение максимальной толщины льда зависит от географической широты и увеличивается с юга на север.

#### *Ледовый режим в период вскрытия*

Когда температура воздуха поднимается выше 0 °С, ледовый покров начинает разрушаться, начиная с подвижек и закраин. Обычно, последний день устойчивого ледостава приходится на конец апреля – первую половину мая, но в редких случаях может произойти вскрытие участка реки при отрицательных температурах воздуха. В среднем, ледоставный период длится 183 дня, но продолжительность его уменьшается из-за изменения сроков замерзания и вскрытия, особенно в среднем течении реки. Однако, наибольшее уменьшение продолжительности происходит в среднем течении реки. Наблюдается тесная статистическая связь между датой первого дня ледостава и его продолжительностью, что может быть полезно для долгосрочного прогнозирования. Ледовый покров начинает деградировать и разрушаться всего за несколько дней до начала весеннего ледохода. Обычно в этот период уровни воды значительно возрастают, но иногда они могут снижаться, что приводит к низким уровням воды во время ледохода. Когда уровни воды достигают критического значения, ледовый покров уже не может удерживать прибывающую воду, и начинается ледоход. Высший уровень воды во время ледохода может быть достигнут в середине или в конце ледохода, в зависимости от погодных условий и характера вскрытия льда. В устьях крупных притоков максимальные уровни воды могут быть достигнуты при вторичном ледоходе, а в начале ледохода максимальные уровни редко формируются и, как правило, связаны с заторами льда.

На реке Печора обнаружено наличие 15 заторных участков. Исследования ледовой обстановки и уровней за несколько лет показали, что частота и мощность этих явлений сократились. Например, повторяемость заторов составляет 23 % для села Усть-Унья, 39 % для деревни Якша, а на участках у села Троицко-Печорск и Усть-Цильма повторяемость почти не изменилась (39 % и 35 % соответственно). В селе Усть-Щугор повторяемость составляет 39 %, а в селе Усть-Кожва – 61 % (наибольшая повторяемость на всей реке). В селе Усть-Уса повторяемость составляет 17 %, в деревне Мутный Материк – 31 %, а в нижнем течении – 47 % для села Ермицы и 20 % для села Оксина. Сроки, необходимые для очистки реки от льда, различаются из-за широтной зависимости и влияния крупных притоков. Вторичный ледоход, образующийся из-за позднего вскрытия притоков, может значительно увеличивать время очищения основной реки. Например, на реке Печора вторичный ледоход, формируемый рекой Усой, увеличивает время очищения реки от льда на 2 дня по сравнению с участком реки вблизи деревни Мутный Материк. Обычно река очищается от льда с 10 мая в верхнем течении до 24 мая в нижнем, за исключением участка реки близ деревни Усть-Уса, где очищение происходит примерно 27 мая. Наблюдаемые изменения дат и уровней воды не являются статистически значимыми, но можно отметить хорошую статистическую связь между ними.

### 1.6 Климатическая характеристика

Исследуемый регион находится в зоне сурового климата, где летние периоды прохладные и кратковременные, а зимы продолжительные, холодные и снежные. Годовое количество осадков здесь значительно превышает испарение.

Климатические условия варьируются в зависимости от сезона: зимой наблюдается недостаток солнечной радиации, в то время как летом ее количество увеличивается. Интенсивный западный перенос воздушных масс также играет важную роль в формировании климата. Частые атлантические циклоны отводят

теплый морской воздух, в то время как арктические воздушные массы часто проникают в регион, что приводит к нестабильной погоде.

Климат данной территории характеризуется повышенной влажностью, которая обусловлена наличием большого количества болот и рек. Термический режим определяется солнечной радиацией и циркуляцией атмосферы, связанной с характером подстилающей поверхности.

В летний период радиационный фактор становится более важным при ослаблении атмосферной циркуляции, что приводит к понижению температуры воздуха с юга на север. Изменения температуры обычно связаны с особенностями местности, в особенности с рельефом. Зимой на земную поверхность района исследований падает меньше солнечной радиации. В районах, расположенных за полярным кругом, зимой, когда солнечная радиация равна нулю, наступает полярная ночь. В это же время циклоническая деятельность значительно возрастает, что приводит к понижению температуры воздуха с запада на восток.

На северо-востоке продолжительность холодного периода увеличивается. Весной на юге района исследований температура воздуха устойчиво переходит через  $0^{\circ}\text{C}$  примерно 25 апреля, в то время как на крайнем севере это происходит около 1 июня.

В конце сентября на севере района исследований средняя суточная температура воздуха опускается ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , а на юге района исследований это происходит около 10 октября. Зима на территории района исследований характеризуется холодом и является самым продолжительным временем года.

На севере района исследований холодный период длится 230-250 дней, а на юге - 200 дней. Кроме того, северные районы испытывают более суровый климат в холодный период, чем южные. В январе на юге средняя месячная температура составляет около  $-17^{\circ}\text{C}$ , а на севере  $-21\dots-22^{\circ}\text{C}$ . В редкие дни, когда воздух из Арктики проникает в район, температура может опускаться до  $-55^{\circ}\text{C}$ .

Лето в зоне исследований характеризуется прохладой. В данное время года в этом районе наблюдается идеальное освещение.

В первой декаде августа на севере начинается переход температуры воздуха на  $10^{\circ}\text{C}$ , в то время как на юге это происходит лишь в конце августа. Это означает, что лето на севере длится всего 30-40 дней, а на юге – около 80 дней. В районе исследований возможны заморозки в любом летнем месяце. Кроме того, температура воздуха летом понижается с юга на север.

В июле среднемесячная температура воздуха колеблется от  $+16^{\circ}\text{C}$  на юге до  $+12^{\circ}\text{C}$  на севере. В случае кратковременных прорывов тропического воздуха, температура может подниматься до  $+35^{\circ}\text{C}$  на юге и  $+30^{\circ}\text{C}$  на севере.

В таежной зоне ветер дует со средней скоростью 3-4 м/сек, а в зоне тундры – до 6,5 м/сек.

Зимой относительная влажность воздуха достигает своего максимума и составляет около 82-86%. Это значение практически не изменяется по всей территории. В то же время, в теплый период года относительная влажность снижается до 63-75%.

На территории исследуемого района количество осадков уменьшается от юга к северу, и составляет от 560 до 430 мм. Однако в Тиманском регионе годовая сумма осадков возрастает до 750-800 мм, а в горах Урала – до 1500 мм и выше. Снегопады накапливаются зимой, и высота снежного покрова достигает 50-60 см на открытых участках и до 100 см в лесу. В горах Урала высота снежного покрова может достигать 3-5 м, что приводит к образованию значительных снежных скоплений и питанию ледников.

## 2 Методы прогноза максимальных заторных уровней

Прогнозирование максимальных заторных уровней основывается на применении нескольких ключевых методов. Эти методы включают в себя прогнозирование затора льда, который обусловлен прогнозированием места формирования затора, максимального заторного уровня и продолжительности стояния затора. Данные подходы применяются в гидрологической практике для выявления возможных превышений максимальных заторных уровней. Далее приведены общие принципы этих методов прогнозирования и описания методик, разработанных для специфических условий северных рек.

Затор льда определяется как накопление льда в русле реки, которое сужает ее активное сечение и вызывает повышение уровня воды в месте скопления льда и в некоторых областях выше него. Затопления представляют опасность из-за возможности быстрого и значительного подъема уровня воды в реке, что может привести к выходу воды за пределы берегов и затоплению прилегающих территорий.

### 2.1 Методы оценки риска и прогноза зазорных и заторных наводнений

#### 2.1.1 Прогнозирование зазоров льда и максимальных зазорных уровней

Индикацией предстоящего наводнения является превышение прогнозируемого максимального зазорного уровня воды над отметкой, которая соответствует началу затопления заселенных территорий [5].

При разработке методик прогнозирования максимальных зазорных уровней воды используются срочные показатели этой характеристики. В случае, если в некоторые годы данные показатели отсутствуют, строятся графики связи срочных и средних суточных значений уровня воды, которые позволяют восстановить ряд срочных значений.



Ключевые показатели процесса образования зажора для данного речного участка определяются на основе статистического анализа соответствующих данных, собранных в течение длительного периода времени. Детерминированные вклады этих показателей рассчитываются с использованием следующей формулы:

$$\delta_{x_i} = \frac{r_{yx_i} \cdot a_{yx_i} \cdot \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}}{R_y^2} \quad (2.1)$$

где  $y$  – прогнозируемая величина (максимальный уровень);

$x_i$  – показатели;

$r_{yx}$  – коэффициент парной корреляции  $y$  и  $x_i$ ;

$a_i$  – коэффициент линейного уравнения, описывающего зависимость  $y$  от  $x_i$ ;

$\frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}$  – отношение средних квадратических отклонений от нормы предсказателя  $x_i$  и  $y$ ;

$R_y$  – полный коэффициент корреляции.

Если доля вклада какого-либо аргумента получается близкой или меньше  $\frac{2 \cdot (1 - R_y^2)}{R_y \cdot \sqrt{n-1}}$ , то аргумент  $x_i$  считается не эффективным и исключается из числа рассматриваемых предсказателей.

Прогностическая зависимость в виде линейного уравнения устанавливается статистическим путем:

$$y = a_0 + \sum a_i \cdot x_i, \quad (2.2)$$

В уравнении (2.2)  $a_i$  – постоянные коэффициенты, которые могут иметь как положительный знак, так и отрицательный. Учитывая нелинейные зависимости между уровнями воды и факторами, которые их определяют (например, расходами воды), для целей прогнозирования возможно применение уравнений криволинейной регрессии:

$$y_0 = b_0 + b_1 y_1 + b_2 y_2 + \dots + b_k y_k, \quad (2.3)$$

где  $y_0$  – оптимальное прогностическое значение;

$y_1, \dots, y_k$  – прогностические значения, полученные по « $k$ » индивидуальным методикам.

После возникновения экстремальных условий зажорообразования, прогностические зависимости подвергаются коррекции.

Прогнозы максимальных зажорных уровней основаны на трех показателях процесса замерзания рек:

а) расход воды у перемещающейся вверх по течению кромки ледяного покрова ( $Q_{кр}$ ), который меньше  $Q_3$  на величину ежесуточного расхода воды, необходимого для формирования подпорной призмы зажора.

б) длительности ледохода (шугохода) ( $T_l$ );

в) средняя температура воздуха за период замерзания ( $\theta_{cp}$ ), которая характеризует интенсивность теплообмена между водой и атмосферой.

Ввиду тесной взаимосвязи между параметрами  $T_l$  и  $\theta_{cp}$ , при формировании прогноза максимальных зажорных уровней, учитывается только одна из этих переменных. Прогнозирование уровня  $H_3$  производится в день, когда начинаются ледовые явления. Для данного дня, используя функциональную зависимость  $Q=f(H)$ , по измеренному уровню воды определяется расход воды в начале замерзания, обозначаемый как  $Q_0$ . Расход воды  $Q_{кр}$  прогнозируется на основе его корреляции с расходом  $Q_0$ . С началом формирования первых осенних ледяных образований, река переходит к грунтовому питанию, что приводит к уменьшению стока воды. В случае, если данное уменьшение обнаруживается как устойчивое, то расход воды предусчитывается по соответствующей формуле:

$$Q_{кр} = Q_0 \cdot \exp(-k \cdot T_l), \quad (2.4)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от погодных условий в период замерзания, в частности, от  $\theta_{cp}$ .

Значение  $T_l$  рассчитывается по выражению:

$$T_l = D + \frac{L}{V_{кр}}, \quad (2.5)$$

где  $D$  – период между датами начала ледостава у нижнего по течению гидрологического поста и ледохода у верхнего гидрологического поста, для которого, составляется прогноз;

$L$  – расстояние от верхнего поста до кромки ледяного покрова на день составления прогноза, определяемое в ходе ледовой авиаразведки;

$V_{кр}$  – скорость перемещения кромки вверх по течению

$$V_{кр} = -\frac{m\theta}{V_n}, \quad (2.6)$$

где  $m$  – эмпирический коэффициент;

$\theta$  – температура воздуха, прогнозируемая синоптическими методами;

$V_n$  – поверхностная скорость течения.

### 2.1.2 Прогноз максимальных заторных уровней воды

В современном контексте прогнозирование наводнений, вызванных ледяными заторами, преимущественно проводится для тех участков рек, где ледяные скопления формируются на регулярной основе. В основном это места с резким снижением продольного уклона реки или комбинациями различных русловых препятствий для передвижения льдины, как, например, крутой поворот с конусом выноса. Для прогнозирования заторных максимумов уровня обычно используются их эмпирические зависимости от факторов, влияющих на процесс формирования затора, которые определяются на основании данных, полученных в ходе многолетних гидрометеорологических наблюдений. Однако, из-за различия

местных условий формирования заторов на разных реках, методика прогнозирования для каждого отдельного заторного участка является уникальной. Это означает, что каждая методика основывается на своем специфическом наборе факторов, обуславливающих формирование затора [4].

Прогнозирование максимального уровня во время затора льда осуществляется в соответствии с предложением Л.Г. Шуляковского (1951 г.), согласно которому используется эмпирическая зависимость уровня от комплекса факторов процесса образования затора [39, 40]. В 1972 году Р.А. Нежиховский [30, 31] предложил внести в качестве аргумента прогностической зависимости один интегральный показатель: расход воды у кромки ледяного покрова во время ее перемещения вниз по течению в пределах участка сбора льда ( $Q_{кр}$ ). И.Я. Лисер обратил внимание на необходимость дополнительного учета в прогнозе максимальных заторных уровней другого значимого фактора помимо  $Q_{кр}$  – степени зашугованности русла [25, 26]. В дальнейшем опыт прогностической практики подтвердил, что для повышения устойчивости прогностического решения в процессе прогнозирования наводнений, вызванных ледяными заторами, можно использовать следующие интегральные показатели процесса формирования затора:

а) максимальным уровнем в начале ледостава ( $H_{лс}$ ), характеризующим мощность скопления шуги в русле, у верхней границы которого весной формируется затор;

б) расходом воды у перемещающейся вниз по течению реки кромки ледяного покрова ( $Q_{кр}$ ), который является характеристикой сил, развиваемых водным потоком в зоне торошения льда;

в) глубиной предпаводочной сработки водохранилища (для зон выклинивания кривых уровней подпора воды в водохранилищах) [26].

Максимальный уровень в начале ледостава ( $H_{лс}$ ) не только отображает мощность скопления шуги в русле, но также весной определяет площадь промоин и закраин. При наличии значительных открытых областей чистой воды, сплав льда вниз по течению реки значительно облегчается.

Первый фактор процесса заторообразования имеет весомое значение на реках, замерзающих по зажорному типу. На некоторых водотоках, таких как Амур, Ангара, Селенга и Сухона, наблюдается настолько сильная корреляция между  $H_3$  и  $H_{лс}$ , что эти показатели могут быть использованы для долгосрочного прогнозирования максимального заторного уровня с заблаговременностью в несколько месяцев. В таблице 2.1 представлены коэффициенты корреляции между максимальными заторными уровнями воды ( $H_3$ ) и уровнями  $H_{лс}$  для отдельных речных участков севера ЕТР.

В случаях, когда связь  $H_3=f(H_{лс})$  не является особенно тесной, и при этом значительный вклад в формирование максимальных заторных уровней воды вносят факторы, определяющие погодные условия вскрытия реки весной, отклонения точек от линии связи можно рассматривать как величину, независимую от  $H_3$ .

Так как предсказать ее изменения с большой заблаговременностью невозможно, для прогноза уровня  $H_3$  может быть применен вероятностный подход. В этом случае к уровню, предсказываемому по связи  $H_3=f(H_{лс})$ , добавляется поправка разной обеспеченности.

В этом контексте отметке начала затопления территории соответствует разная вероятность превышения отметки начала затопления ( $p$ ) при различных значениях  $H_{лс}$ . Это дает возможность построить график связи  $p=f(H_{лс})$ . С помощью этого графика можно определить вероятность затопления территории по максимальному зажорному уровню воды текущей зимы.

Стоит подчеркнуть, что для рек, протекающих в областях, где зима характеризуется частыми оттепелями, периодами, в течение которых с одной стороны наблюдаются перемещения льда, а с другой – скопления шуги активно разрушаются, влияние зажорных явлений наиболее адекватно оценивается через предпаводочный уровень воды. Если за длительный период времени доступны данные ледемерных съемок, то в прогнозах максимальных заторных уровней учитывается непосредственно объем льда на участке реки непосредственно перед вскрытием. Еще один показатель объема льда в русле перед вскрытием – это толщина

ледяного покрова, который формируется за счет постепенного нарастания льда снизу из-за теплового потока от воды к атмосфере ( $t_l$ ). Как правило, коэффициенты корреляции между  $H_3$  и  $t_l$  невысоки и редко достигают значения 0.45.

Таблица 2.1 – Коэффициенты корреляции между максимальными заторными уровнями воды рек севера ЕТР и максимальными уровнями в начале ледостава

Река	Пункт	Значение коэффициента
Северная Двина	д. Медведки	0.36
	г. Котлас	0.35
	д. Усть – Курье	0.63
	д. Абрамково	0.62
	с. Нижняя Тойма	0.55
	д. Сидоровская	0.51
Сухона	д. Звоз	0.58
	с. Каликино	0.65
	г. Великий Устюг	0.56
Юг	д. Гаврино	0.48
Вычегда	г. Сыктывкар	0.30
Вага	г. Шенкурск	0.35
	с. Усть-Сюма	0.42
Юг	д. Пермас	0.20
	с. Кичменский Городок	0.30
	р.п. Подосиновец	0.42
Мезень	с. Дорогорское	0.33
	д. Малонисогорская	0.52
Печора	с. Ермицы	0.52
	с. Усть-Кожва	0.38
	с. Усть-Уса	0.41
	с. Усть-Цильма	0.31

Ожидаемые максимальные заторные уровни на участках рек без зажорных явлений определяются по зависимости, аргументом, которой служит только затороформирующий расход  $Q_3$ . На крупных реках он прогнозируется с использованием связей соответствующих по ледовым фазам расходов воды, учитывая их изменение вдоль реки, то есть:

$$Q_3 = f(Q_{кр}, Q_{np}, q_{np}), \quad (2.7)$$

где  $Q_{кр}$  – это средний расход воды на границе ледяного покрова по пути его движения в пределах области накопления льда, который приближенно равен произведению средней поверхностной скорости течения на продолжительность ледохода с плотностью от 1.0 до 0.3. Это определяется по данным гидрологического поста, расположенного выше по течению;  $Q_{np}$  – расход воды крупного притока ( $Q_{np}/Q_{кр} > 0.4$ ), который открывается раньше основной реки или одновременно с ней;  $q_{np}$  – это диффузный приток из частного бассейна между створами верхнего и нижнего постов.

В зависимости от условий формирования стока учитывается только часть предикторов  $Q_3$ . Верхний (информационный) гидрологический пост выбирается с учетом необходимой точности и достаточной заблаговременности прогноза (обычно на расстоянии 70 – 200 км от створа, для которого дается прогноз). Заблаговременность предсказания расхода  $Q_3$  и, следовательно, максимального заторного уровня ( $H_3$ ) зависит от скорости перемещения кромки ледяного покрова. Эта скорость, в свою очередь, определяется скоростью перемещения фронта потепления ( $V_\theta$ ) и разницей между продолжительностями периодов таяния льда в нижнем и верхнем створах ( $\Delta T_m$ ):

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{V_\theta} + \Delta T_m. \quad (2.8)$$

Для крупных рек, протекающих на севере, включая Северную Двину, Печору, Обь, Лену и Енисей, возможно обеспечить предварительный прогноз параметров  $Q_3$  и  $H_3$  на промежутке 10 – 15 суток. Расчет расхода воды  $Q_{кр}$  проводится на основании одной из кривых расхода, которые соответствуют различным ледовым условиям оттока воды весной на верхнем гидрологическом посту. При составлении прогноза выбор конкретной кривой основывается на данных о ледовых условиях и интенсивности подъема уровня воды в день вскрытия реки на данном посту. Дата публикации прогноза  $H_3$  согласуется с датой вскрытия реки на верхнем посту или выбирается позднее, например, в день завершения густого ледохода. Это позволяет увеличить точность вычисления расхода  $Q_{кр}$  благодаря более тесной корреляции между параметрами  $H$  и  $Q$  в последние дни ледохода, однако сокращает срок предварительного прогноза. На участках рек, где заторы образуются на волне половодья, сформированной в бассейне до вскрытия крупного притока, прогноз  $H_3$  формируется в день вскрытия этого притока на одном из его верхних створов.

Для речных участков, которые размораживаются одновременно по всей их длине в результате половодья, предварительный расчет максимального заторного уровня воды проводится в дни, когда наблюдается максимум бокового притока. Ежедневные значения этого параметра определяются согласно формуле:

$$q_{np} = F_{np} \cdot \sum_1^n M_i , \quad (2.9)$$

где  $F_{np}$  – площадь частного бассейна;

$M_i$  и  $n$  – соответственно модули стока и количество рек – аналогов, в качестве которых выбираются небольшие реки с наибольшей вероятностью состояния «чисто» и «редкий ледоход» в день выпуска прогноза.

Исходя из того, что на дату  $q_{np,мк}$  состояние льда у верхнего створа может варьироваться, дополнительный аргумент – положение кромки ледяного покрова



в отношении места заторообразования – включается в прогностическую формулу. В случае, если затор образуется на пике весеннего половодья, методы прогноза стока по данным о распределении воды в русловой сети обычно используются в существующих методиках прогнозирования заторных явлений. Помимо расхода  $Q_z$ , важными показателями водности реки в период формирования затора являются максимальные снегозапасы на водосборе ( $t_{сн,мк}$ ) и характеристика потенциальной сопротивляемости ледяного покрова  $\varphi_{лн}$  (где  $\varphi$  — это соотношение прочности льда на  $T$ -ый день таяния к прочности в начале таяния). Значение  $\varphi_{лн}$  на дату вскрытия реки в одном из расположенных выше по течению створов вычисляется согласно методике С.Н. Булатова [15]. В качестве примеров можно привести прогностические зависимости для реки Печора в районе села Усть-Кожва:

$$H_z = 284 + 0,794H_{лс} + 0,523t_{сн,мк} , \quad (2.10)$$

где  $t_{сн,мк}$  (см) устанавливается по данным метеостанции урочище Верхний Щугор.

Метод прогнозирования максимального заторного уровня воды на крупных реках, протекающих в основном в широтном направлении, где только отдельные участки вскрываются в направлении от верхнего к нижнему течению, а также на средних реках, предлагается следующим образом. Данный метод основывается на предположении о взаимосвязи интенсивности процессов подготовки реки к вскрытию и формирования ледовых заторов. Прогноз строится на основании информации об изменении количественных характеристик весеннего половодья и процесса подготовки реки к вскрытию непосредственно на участке реки, для которого формируется прогноз.

Прогнозируемый максимальный заторный уровень воды  $H_z$  определяется не через эмпирическую зависимость, а посредством кривой расходов при летних условиях, с использованием величины расхода воды  $Q_{H_z}$ :

$$Q_{H_3} = \frac{\eta Q_3}{k_3}, \quad (2.11)$$

где  $\eta$  – коэффициент местных условий заторообразования, отражающий специфические для данного участка реки условия, определяющие образование затора (соотношение теплового и механического факторов в процессе вскрытия, степень зашугованности русла, наличие подпора и боковой приточности, русловыправительные и дноуглубительные работы на участке и т. д.);

$Q_3$  – затороформирующий расход воды, который меньше  $Q_{кр}$  на величину расхода фильтрации через скопление льда [18];

$k_3$  – коэффициент для зимних условий в день  $H_3$ , который является суммарным показателем, учитывающим в целом все изменения гидравлических условий водного потока при наличии льда в русле, а также особенности поперечного сечения русла. Он определяется по следующей формуле:

$$k_3 = (1 - a)k_{лс} + a, \quad (2.12)$$

где  $k_3$  – зимний коэффициент на день  $H_3$ ;

$k_{лс}$  – отношение расходов воды при ледоставе и заторе.

Зависимости (2.11) и (2.12) расчетные. Для прогноза по ним максимального заторного уровня необходимо заранее знать расход воды, который зависит от дружности весны, определяющей интенсивность таяния снега и льда, от увеличения расхода воды и уменьшения прочности ледяного покрова, а также от длительности подготовительного к вскрытию периода [6]. Этот расход может быть предвычислен по простому выражению, основанному на местной информации о развитии весеннего половодья,

$$Q_3 = Q_0 + 86,4 \cdot \Delta\tau \cdot i_m \cdot F, \quad (2.13)$$

где  $Q_0$  – расход воды накануне половодья ( $\text{м}^3/\text{с}$ );

$\Delta\tau$  – период от начала половодья до даты максимального заторного уровня воды, зависящий от толщины ледяного покрова и интенсивности увеличения модуля стока в расчетном створе (сутки);

$i_m$  – интенсивность увеличения модуля стока за период  $\Delta\tau$ , связанная с его интенсивностью до даты выпуска прогноза, ( $\text{л}/\text{с км}^2$ );

$F$  – площадь водосбора ( $\text{км}^2$ ).

При разработке методики прогнозирования основополагающим фактором является выбор даты публикации прогноза. Эта дата должна гарантировать подходящую заблаговременность и точность предсказания ожидаемых значений. Верность прогноза уменьшается с увеличением его заблаговременности, однако существует определенное оптимальное соотношение этих двух основных характеристик методики. В рассмотренном методе это соотношение достигается, если дату публикации прогноза синхронизировать с датой, когда в расчетном створе наблюдается условие отделения ледяного покрова от берегов:

$$H > H_{лс} + 0,9t_l, \quad (2.14)$$

где  $H$  – уровень воды на текущий день;

$H_{лс}$  – максимальный уровень в первые дни ледостава,  $t_l$  – толщина ледяного покрова перед началом весеннего половодья.

С момента выполнения условия (2.14) начинаются подвижки ледяного покрова и процесс формирования скопления льда. При выбранном подходе к определению даты составления прогноза, заблаговременность прогноза на средних реках европейской части России варьируется от 1 до 10 дней. Этого временного интервала достаточно для принятия необходимых мер, направленных на минимизацию возможного ущерба от предстоящего наводнения.

На дату выпуска прогноза рассчитывается интенсивность увеличения модуля стока:

$$i_{\text{мпр}} = \frac{Q_{\text{нпр}} - Q_0}{86,4 \cdot F \cdot \Delta\tau_{\text{нпр}}}, \quad (2.15)$$

где  $Q_{\text{нпр}}$  – расход воды на дату прогноза;

$\Delta\tau_{\text{нпр}}$  – период устойчивого подъема уровня воды до даты выпуска прогноза.

В ситуациях оперативного управления, когда замеры водного расхода прекращаются перед открытием реки, информация о величине  $Q_{\text{нпр}}$ , необходимая для расчета  $i_{\text{мпр}}$ , отсутствует. В этом случае расход  $Q_{\text{нпр}}$  можно вычислить следующим образом:

$$Q_{\text{нпр}} = Q_{\text{Ннпр}}[(1 - a) \cdot k_{\text{лс}} + a], \quad (2.16)$$

где  $Q_{\text{Ннпр}}$  – расход воды, установленный через  $H_{\text{нпр}}$  по кривой расходов для летних условий. Коэффициент «а» коррелирует с отношением  $Q_{\text{нпр}}/Q_0$  и ледовыми условиями на день формирования прогноза. Предложенный прогностический подход позволяет предвидеть формирование ледяных заторов и максимальный заторный уровень воды для рек с водосборной площадью от 8000 до 70000 кв. км, обеспечивая прогнозную заблаговременность на 4 дня больше по сравнению с методом соответствующих уровней (расходов) воды по ледовым фазам. Однако, текущее ограничение по величине водосбора определяется доступными данными об отслеживаемых реках, использованных при определении прогностических зависимостей. Несмотря на всеобщую применимость прогностического метода, его применение на реках с водосборной площадью, превышающей указанный диапазон, без предварительной проверки не рекомендуется, так как в основных расчетных формулах участвует модуль стока, который подвержен редукции в зависимости от величины водосбора.

Встречается ситуация, когда требуется спрогнозировать максимальный заторный уровень воды на отдельных участках реки, находящихся в непосредственной близости от строящихся или недавно возведенных экономических объектов. Однако, этот прогноз может быть невозможным на основе эмпирических зависимостей, для которых необходимы долгосрочные наблюдения за гидрологическим режимом на прогнозируемом участке реки, а такие данные могут отсутствовать из-за разреженности гидрологических станций в рассматриваемом регионе. Проблему предсказания максимального заторного уровня воды для участка реки, который не покрыт многолетними гидрометрическими наблюдениями, можно решить, применив зависимости, вытекающие из теории заторных явлений и общего характера этих явлений на относительно длинных участках рек, где условия вскрытия являются однородными или меняются плавно вдоль потока.

Используя совокупный подход для решения системы уравнений гидродинамики неравномерного водного течения под ледяным покровом и статического равновесия ледяных образований на речном участке для затора, превышающего шесть ширин реки, можно получить следующее уравнение:

$$\mu = \frac{\rho_v \cdot I}{\rho_l \cdot t_{ск}} \left[ \omega_3 - \frac{1}{r^{2/3+1}} \left( \omega_3 - \frac{\rho_l}{\rho_v} \cdot B t_{ск} \right) \right], \quad (2.17)$$

где  $\mu$  – безразмерный обобщенный коэффициент физико-механических свойств заторного льда;

$\rho_v$  и  $\rho_l$  – плотность воды и льда, кг/м<sup>3</sup>;

$I$  – уклон водной поверхности при заторе;

$t_{ск}$  – толщина скопления, м;

$\omega_3$  – площадь поперечного сечения русла, соответствующая максимальному заторному уровню воды, м<sup>2</sup>;

$r$  – отношение коэффициента шероховатости нижней поверхности льда ( $n_l$ ) к коэффициенту шероховатости русла ( $n_p$ );

$B$  – ширина реки, м.

Уравнение (2.17) определяет условие стабильности ледяного затора. Если значение правой части уравнения превосходит значение левой, состояние стабильности ледяного затора нарушается, ведущее к его нестабильности и последующему движению или прорыву. Из уравнения (2.17) можно определить значение  $\omega_3$  в момент прорыва затора, что в свою очередь позволяет определить максимальный заторный уровень воды ( $H_3$ ) на основе соотношения между уровнем и площадью поперечного сечения реки. Для расчета уровня  $H_3$  важно иметь информацию о интегральном индексе механических свойств ледяного затора – коэффициенте  $\mu$ .

Применяя формулу (2.17), были получены значения коэффициента  $\mu$  для 11 заторообразующих участков девяти рек северной части Европейской территории России, при наибольшем и среднем заторных уровнях [8]. Результаты подсчета коэффициента  $\mu$  показывают, что пространственная и временная вариативность этого параметра физико-механических характеристик заторов отражается в следующей линейной функциональной связи:

$$\mu = \frac{0,00512B}{t_{ck}} + 0,301 . \quad (2.18)$$

Данная связь обладает корреляционным коэффициентом между  $\mu$  и  $B/t_{ck}$ , равным 0.91, что свидетельствует о высокой степени соответствия. Среднеквадратическое отклонение для определения  $\mu$  с использованием установленной зависимости для рек северной территории составляет 0.28.

Подставляя (2.18) в уравнение (2.17) и перенос всех компонентов, зависящих от толщины скопления, в левую часть уравнения, и тех, что не зависят от  $t_{ck}$ , в правую часть, приводят нас к следующему выражению:

$$\frac{0,301 \cdot t_{ck}^2 + B \cdot t_{ck} [0,00512 - 1,25 I_0 \cdot (r^2 + 1)]}{1,25 (r^2 + 1) \cdot [1 - (r^3)^2 + 1]^{-1}} = \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot I_{Q_3} \cdot \omega_{Q_3} . \quad (2.19)$$

С помощью данного выражения можно вычислить координаты кривой корреляции между  $t_{ск}$  и  $\omega Q_3$  для специфического заторного участка реки, где  $\omega Q_3$  представляет собой площадь поперечного сечения русла, соответствующую заторному расходу воды  $Q_3$  при условиях свободного от льда русла. После получения этих координат, можно легко вычислить  $\omega_3 = \omega Q_3 + 0,9Vt_{ск}$ , а затем определить максимальный заторный уровень воды. Для предварительного расчета уровня  $H_3$  указанным методом, необходимо заранее знать расход воды  $Q_3$ . Его можно прогнозировать с использованием методов, предложенных ниже, при условии, что  $Q_3 \approx Q_{кр}$ .

В случае, когда на речном участке выше по течению есть бесприточный участок, на верхнем створе которого осуществляются постоянные гидрологические измерения, прогноз вычисляется с использованием следующей формулы:

$$Q_{кр.н} = Q_{кр.н} \cdot k_{з.в} \cdot \frac{F_n}{F_в}, \quad (2.20)$$

где  $Q_{кр.в}$  – расход воды в верхнем по течению створе, определенный по летней кривой расходов при уровне  $H_{з.в}$ ;

$k_{з.в}$  – зимний коэффициент в верхнем створе;

$F_n$  и  $F_в$  – площадь водосбора соответственно в нижнем и верхнем створах.

В случаях, когда расстояние между створами значительно и коэффициент корреляции между их расходами меньше 0,6, или когда на участке между ними встречается крупный приток, который вскрывается раньше и значительно меняет характер формирования ледового затора, прогноз расхода  $Q_{кр}$  стоит создавать в день начала вскрытия реки в расчетном створе с использованием следующей формулы. Эта формула была получена путем определения производной по времени функции  $Q = \beta(H - H_0)^m$ , описывающей кривую расходов:

$$Q_{кр} = \xi \cdot T \cdot \beta \cdot k_3 \cdot m \cdot (H_{ср} - H_0)^{m-1} \cdot i_y, \quad (2.21)$$

- где  $\xi$  – эмпирический коэффициент, устанавливаемый по материалам ближайших гидрологических постов с длинными рядами наблюдений;
- $T$  – время подъема уровня воды от начала устойчивого подъема до даты вскрытия реки, сутки;
- $\beta$  и  $m$  – параметры кривой расходов;
- $k_3$  – зимний коэффициент по последнему измеренному в период ледостава расходу воды;
- $H_m$  – средний за период  $T$  уровень воды;
- $H_o$  – уровень, при котором прекращается сток воды в русле;
- $i_H$  – средняя суточная интенсивность подъема уровня за  $T$  суток.

Прогнозы, составленные по формуле (2.20) для рек с площадью водосбора, превышающей 40000 км<sup>2</sup>, обеспечивают заблаговременность от 1 до 8 суток. Значение определяется как отношение расстояния между верхним и нижним створами к скорости передвижения кромки ледяного покрова вниз по течению. При использовании формулы (2.21), заблаговременность составления прогнозов не превышает 5 суток:

$$\tau = 1,31 \lg F - 5 . \quad (2.22)$$

Для осуществления прогноза уровня  $H_3$  с использованием зависимости (2.19), необходимо также иметь кривые площадей поперечного сечения русла и скоростей течения воды в реке. Реализация кривой площадей осуществляется посредством измерения русла и поперечного сечения берегов. Координаты кривой скоростей определяются на основе формулы Шези. Информацию о водных уровнях перед вскрытием можно получить через наблюдения на временных гидрологических постах.

Для определения максимального заторного уровня воды можно использовать информацию о характеристиках ледохода на расположенных выше по течению участках реки и её притоков. Данные о числовых характеристиках ледохода на участке выше заторного получают во время проведения ледовых авиационных



разведок. Предполагаемый максимум определяется с использованием зависимости заторного подъема уровня воды от предполагаемой длины ледяного скопления (рис. 2.1.2.1). Для определения высоты над межей используется следующая формула:

$$A_n = 2,07 \lg \frac{F}{\sqrt{I_0}} - a, \quad (2.22)$$

где  $F$  – площадь водосбора (км<sup>2</sup>);

$I_0$  – уклон водной поверхности при свободной ото льда реке;

$a$  – численный коэффициент.

Для речных участков с низкой поймой  $a \geq 11,0$ , с поймой средней высоты  $4,41 < a < 11,0$ , с высокой поймой и беспойменных участков  $a \leq 4,41$ .

Используя формулу (2.22), можно классифицировать участок реки, на котором формируется ледяной затор, по трем категориям в зависимости от высоты поймы. Выбор конкретной кривой на рисунке 2.1 осуществляется в соответствии с этой классификацией, что позволяет определить  $\Delta H_3$  в зависимости от длины ледяного скопления, которую можно наблюдать с борта воздушного судна.

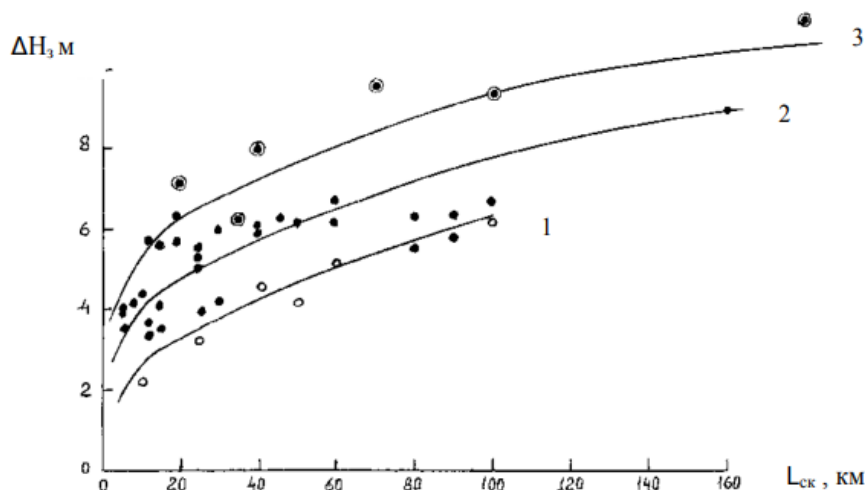


Рисунок 2.1 – Зависимость подъема уровня воды при заторе ( $\Delta H_3$ ) от длины скопления льда ( $L_{ск}$ ). 1 – речные участки с низкой поймой, 2 – с поймой средней высоты, 3 – с высокой поймой и участки без поймы

Конечно, для перехода от значения  $\Delta H_3$  к подъему уровня воды над межени-  
ным уровнем, можно применить следующее уравнение:

$$A_3 = \frac{\Delta H_3}{0,418+1180I_0}. \quad (2.23)$$

Если мы можем предсказать развитие скопления льда в течение времени, то можно спрогнозировать значение  $A_3$  с заблаговременностью, равной периоду от даты выпуска прогноза до даты окончания формирования затора. Эта дата определяется окончательным объемом льда, подходящим к затору с верхних участков реки. Длину скопления льдины можно спрогнозировать, используя следующую формулу:

$$L_{ск} = L_{ск,0} + \frac{B}{r_i} \sum_{i=1}^n m_{л,i} \cdot L_{л,i} \cdot B_{л,i}, \quad (2.24)$$

где  $L_{ск,0}$  – начальная длина скопления (м);

$B$  – ширина реки на заторном участке;

$r_t$  – коэффициент упаковки льда, равный отношению толщины скопления ( $t_{ск}$ ) к толщине подплывающих к нему льдин ( $t_l$ );

$m_{л,i}$  – густота ледохода на расположенных выше по течению участках реки и ее притоков с льдотранзитом до затора;

$L_{л,i}$  и  $B_{л,i}$  – длина и ширина участка реки с густотой ледохода  $m_{л,i}$ .

В этом случае, коэффициент упаковки льда ( $r_t$ ) определяется с использованием уравнения баланса льда у верхней кромки затора:

$$r_t = m_l \cdot \frac{V_l - V_{ск}}{V_{ск}(1-\varepsilon)}. \quad (2.25)$$

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

$t_{ск}$  и  $\varepsilon$  – толщина и пористость скопления льда. Значения  $r_t$  изменяются в большом диапазоне: от 2 до 20. Однако, пористость скопления льда меняется весьма незначительно, в среднем она равна 0.4. Предполагая, что затор образуется в основном из-за среднего и густого ледохода, значение  $m_l$  может быть признано равным 0.8. Таким образом, коэффициент  $r_t$  в основном определяется отношением скоростей  $V_{ск}$  и  $V_l$ , которые можно определить в ходе регулярной аэрофотосъемки.

Повторные аэрофотосъемки позволяют оценить скорости перемещения верхней границы скопления льда вверх по реке ( $V_{ск}$ ) и смещения верхней границы участка с густым и средним ледоходом вниз по реке ( $V_l$ ). Снимки, полученные с помощью метеорологических и геофизических искусственных спутников Земли, также могут использоваться для оценки параметров, представленных в уравнениях (2.24) и (2.25). Однако, для точного определения плотности ледохода и границ между неподвижным и движущимся льдом, снимки должны обладать достаточно высоким разрешением.

Максимальный срок заблаговременности прогноза максимального уровня воды в заторах, основанного на данных ледовой авиаразведки, соответствует периоду формирования ледового затора. В настоящий момент, прогнозы по максимальным заторным уровням воды формируются региональными отделениями Росгидромета для всех крупных и многих средних рек России [13, 14, 12, 9, 11, 17, 20, 19, 24, 30, 31,32, 28]. Точность прогнозов в большинстве случаев превышает естественную обеспеченность прогноза на уровне от 10 до 30%.

### 2.1.3 Методика прогнозов заторов и обусловленных ими уровней воды на реках севера ЕТР

Заторные процессы являются неотделимыми элементами процедуры вскрытия рек на севере Европейской части России [9, 21, 27]. Ледяные заторы на северных реках формируются каждый год, часто вызывая катастрофические наводнения, влекущие за собой существенный материальный убыток. Северная

Двина отмечена формированием мощных заторов в районе дельты: заторные наводнения в Архангельске происходят с периодичностью раз в 3 – 4 года. В 1961 году около половины города было затоплено из-за мощного ледяного затора. В 1966 году, из-за образования крупных заторов на Печоре, часть города Нарьян-Мар была затоплена. Заторы льда вызывают серьезные трудности на реке Сухона у города Великий Устюг. Последнее значительное наводнение в городе произошло весной 2013 года.

В 1972 году Р.А. Нежиховский и Н.П. Саковская разработали методику прогнозирования максимальных заторных уровней воды для нижнего течения Северной Двины [30]. Согласно данной методике, заторный максимум уровня воды определяется исключительно средним расходом воды на краю ледяного покрова вдоль его пути перемещения на ледосборном участке. Дальнейшие исследования условий вскрытия устья Северной Двины, проведенные в 1980 году сотрудником Северного УГМС В.П. Поповым [34], подчеркнули необходимость учета объема ледокольных работ в дельте при прогнозировании максимального заторного уровня воды реки в городе Архангельск. На более высоко расположенном участке от с. Усть-Пинега до д. Звов, мощность скоплений льда, формирующихся здесь в начале зимы, стала существенным фактором, определяющим высоту заторного уровня. Зависимости для прогноза максимальных заторных уровней воды Северной Двины на данном участке, предложенные В.Н. Карновичем и Т.В. Кулешовой [21] в 1984 году, учитывают как весеннюю водность реки, так и условия формирования ледяного покрова. В качестве индикатора водности используется максимальная интенсивность подъема уровня вода в верховьях реки – с. Нижняя Тойма.

В дальнейшем, специалисты Государственного гидрологического института успешно разработали процедуры для краткосрочного прогнозирования пиковых заторных уровней воды для некоторых крупных рек северной европейской территории России, включая Северную Двину, Сухону, Вагу, Пинегу, Мезень и Печору.

В соответствии с проведенными исследованиями, определены специфические прогностические зависимости для двух заторных участков Малой Северной Двины в регионе города Котлас:

$$H_3 = 0,028H_{лс} + 3,68t_l + 0,273Q_{Тотьма} + 4,93\theta - 27, \quad (2.26)$$

где  $H_{Кич.Гор}$  – уровень воды р. Юг в первый день ледохода у с. Кичменгский Городок;

$Q_{Тотьма}$  – расход воды р. Сухоны в первый день ледохода у г. Тотьма, который при прогнозе вычисляется через уровень ( $H_{Тотьма}$ ) и подъем уровня ( $\Delta H$ ) в этот же день

$$Q_{Тотьма} = 2,74H_{Тотьма} - 0,783\Delta H - 206. \quad (2.27)$$

Транзитные заторы льда наблюдаются на участке Северной Двины от места впадения реки Вычегды до устья реки Ваги. Они продолжительное время не остаются на одном месте из-за прямолинейного продольного профиля данного участка, перемещаясь вниз по течению во время вскрытия.

Был проведен анализ наименее изученного участка на реке Печора, расположенного ниже устья реки Ижма, который играет значительную роль в формировании режима этого участка. Река Ижма, текущая с юга на север, вскрывается в среднем на 8-10 дней раньше широтного участка Печоры, где она впадает в основную реку в нижней части. Образование заторов льда и разрушение ледяного покрова в нижнем течении Печоры происходит на первой волне половодья, сформировавшейся на Ижме и двух других левобережных притоках Печоры: Пижме и Цильме. Последующие волны, идущие сверху от верхней части Печоры и ее притока Усы, имеют незначительное влияние на процесс вскрытия нижнего участка реки.

Связь между заторным подъемом уровня воды и расходом воды, формирующим заторы, на рассматриваемом участке Печоры, аналогична связи на реке

Сухона и является обратной. Это связано с наличием широкой поймы, где при выходе воды и льда замедляется прирост уровня.

Одним из факторов, влияющих на силу заторов в нижнем течении Печоры, также является готовность ледяного покрова к разрушению, которую можно оценить по превышению уровня воды на дату составления прогноза (дата достижения максимального уровня воды после весенних ледовых явлений на реке Ижма у населенного пункта Картайоль) над максимальным уровнем воды в начале образования ледостава. Вышеизложенные факты отражены в зависимостях, которые были установлены для участков на реке Печора у населенных пунктов Усть-Цильма и Ермицы,

$$\Delta H_z = -0,0106Q_{кр.У.-Ц} + c , \quad (2.28)$$

$$\Delta H_z = -0,0187Q_{кр.У.-Ц} - 0,261(H' - H_{лс}) + 497 , \quad (2.29)$$

где  $Q_{кр.У.-Ц}$  – расход воды у кромки ледяного покрова при вскрытии Печоры у с. Усть-Цильма, м<sup>3</sup>/с;

$c$  – величина, зависящая от ледовой обстановки у с. УстьЦильма в день составления прогноза, (см. таблицу 2.2).

Расход воды  $Q_{кр.У.-Ц}$  предвычисляется со средней заблаговременностью 9 суток по формуле:

$$Q_{кр.У.-Ц} = 4,86Q_{И.К} + 0,744Q_{М.М} , \quad (2.30)$$

где  $Q_{И.К}$  и  $Q_{М.М}$  – расходы воды на день выпуска прогноза в реках Ижма у с. Картайоль и Печора у д. Мутный Материк.

При анализе текущей ситуации на реке Печора в данное время может наблюдаться разнообразная ледовая обстановка, которая принимается во внимание при расчете расхода  $Q_{М.М}$  с помощью зимнего коэффициента.

Ожидаемые максимальные уровни заторов воды на реке Печора у населенных пунктов Усть-Цильма и Ермицы определяются путем сложения подъемов  $\Delta H_3$  с уровнями  $H_{Q_{кр}}$ . Значения последних определяются на основе летней кривой расходов.

Таблица 2.2 – Значение параметра  $s$

Ледовая обстановка на Печоре у с.Усть-Цильма в день выпуска прогноза	Значение $s$
Ледостав	341
Подвижка	294
Ледоход	233

Своевременность прогнозирования максимальных заторных уровней на реке Печора по представленной методике зависит от значения расхода  $Q_{кр.У.-Ц}$  и ледовой обстановки в день составления прогноза на рассматриваемом участке реки.

Разработанные методики краткосрочного прогнозирования максимальных заторных уровней на северных реках были оценены по двум критериям: отношению среднеквадратической ошибки прогноза ( $s$ ) к естественной вариации предсказываемого уровня ( $\sigma H$ ) и отношению ошибки  $s$  к вариации изменения уровня за период прогноза ( $\sigma \Delta H$ ). Для оценки соответствия прогнозов ( $p$ ) также была определена вероятность непревышения допустимой ошибки прогноза, если в качестве ожидаемого уровня принимается средний уровень за несколько лет или уровень, рассчитанный по формуле:

$$H_3 = H' + \overline{\Delta H}, \quad (2.31)$$

где  $\overline{\Delta H}$  – норма превышения максимального заторного уровня над уровнем на дату выпуска прогноза ( $H'$ ).

Значение в таблице 2.3 показывают количественные показатели эффективности разработанных локальных методик прогнозирования максимальных заторных уровней воды. Эти методики можно охарактеризовать как удовлетворительные как по критерию  $\frac{s}{\sigma_H}$ , так и по критерию  $\frac{s}{\sigma_{\Delta H}}$ . Особенно эффективными являются методики прогнозирования уровней на реке Пинега, где вклад расходов воды значителен в формировании максимальных заторных уровней. Методики прогнозирования максимальных заторных уровней на реке Сухона менее точны, так как они в основном опираются на местные ледовые условия.



Таблица 2.3 – Сведения об эффективности методик краткосрочных прогнозов максимальных заторных уровней воды рек севера ЕТР

№ п/п	Река	Пункт	Средняя заблаговременность прогнозов	Средняя квадр. погрешность s, см	Оценка эффективности через среднее квадратическое отклонение от нормы					
					уровня воды ( $\sigma_H$ )			изменения уровня за период заблаговременности прогноза ( $\sigma_{\Delta H}$ )		
					$\frac{s}{\sigma_H}$	Оправд. Прогнозов %	Обесп. прогноза по норме	$\frac{s}{\sigma_{\Delta H}}$	Оправд. Прогнозов %	Обесп. прогноза по норме
1	Северная Двина	д. Медведки	4	66	0,71	62	39	0,58	72	44
2		г. Котлас	5	65	0,59	75	42	0,47	80	59
3		д. Абрамково	3	75	0,62	70	59	0,68	67	46
4		с. Нижняя Тойма	4	82	0,62	72	51	0,62	72	44
5		д. Идоровская	6	85	0,62	69	49	0,68	62	54
6	Сухона	д. Каликино	7	99	0,71	67	56	0,73	64	44
7		г. Великий Устюг	4	92	0,59	70	56	0,64	74	46
8	Юг	д. Гаврино	3	74	0,65	90	62	0,54	89	28
9	Вага	г. Шенкурск	3	81	0,69	56	38	0,80	54	44
10		с. Усть-Сюма	5	65	0,58	75	59	0,59	75	47
11	Пинега	с. Кулогоры	4	57	0,53	82	51	0,60	74	54
12		с. Кузомень	5	76	0,55	82	54	0,61	82	46
13	Мезень	д. Малонисогорская	3	42	0,74	67	51	0,58	77	51
14	Печора	с. Усть-Цильма	9	115	0,72	72	44	0,74	72	56
15		с. Ермицы	11	77	0,72	67	51	0,42	90	38

## 2.2 Прогнозирование заторов и максимальных заторов уровней воды

### 2.2.1 Прогноз образования возможных участков и зон заторов льда на реках

Ледовые заторы, возникающие на реках, могут приводить к значительным ущербам, в связи с этим своевременное предсказание этих явлений является одной из главных функций органов Росгидромета [38].

Разнообразие условий формирования заторов льда на различных водотоках и даже на одном водотоке, но на разных участках, затрудняет разработку единой методики прогноза. Другим обстоятельством, мешающим разработке, является недостаточность данных наблюдений. В то же время существуют схожие морфометрические особенности русел, которые позволяют определить участок реки как заторообразующий.

Исходными данными для выявления таких участков, а также разработки прогностических методик являются: различные тематические карты, исторические свидетельства, а также данные непосредственных гидрометеорологических наблюдений. Обычно при разработке методик все эти данные используют комплексно.

Одним из факторов, способствующих образованию затора, является скопление зажорных скоплений льда, сохранившихся с осеннего периода. Еще одним показателем высокой вероятности возникновения затора является повышение зимнего уровня.

Для участков, где потенциально могут сформироваться заторы и зажоры, определены возможные подъемы уровней. Подобная информация позволяет спланировать и своевременно принять меры по предотвращению возможного ущерба от этих опасных явлений.

Разработка методик прогнозирования осуществляется как в случае наличия исходных гидрометеорологических данных, так и при их отсутствии.

В качестве исходных выступают многолетние данные о расходах и уровнях воды, сведения о толщине льда и сроках наступления ледовых явлений, информация о температуре воздуха. Кроме того привлекается информация об объеме бокового притока, так как это определяет дополнительные объемы наступления массы льда.

### 2.2.2 Прогнозирование подъема уровня воды и возможность последствий заторного наводнения

Во время заторов и зажоров, из-за уменьшения площади живого сечения, наблюдается повышение уровня воды, нередко приводящее к затоплению. Именно поэтому, в первую очередь разрабатываются методики прогноза паводков и половодий, вызываемый этими явлениями [24, 22]. В качестве прогнозируемой характеристики выступает уровень воды, а также дата его наступления.

Первый этап прогнозирования включает оценку вероятности возникновения затора (зажора). Например, по картам определяют:

$$\Delta H_{\max} = 12.1\sqrt{\sum \theta_-} + 5.48i + 2.76h_c - 71.4 \frac{\sum \theta_{+H}}{\sum \theta_{+B}} - 7, \quad (2.32)$$

где  $\sum \theta_-$  – сумма отрицательных температур воздуха от начала ледостава до 31 января;

$h_c$  – высота снега на льду;

$i$  – интенсивность подъема уровня воды до первой подвижки льда;

$\sum \theta_+$  – количество тепла, требующееся для сливания ледяного покрова;

$H$  – уровень воды при вскрытии.

Использование данного уравнения позволяет выпускать прогнозы с заблаговременностью до 4 дней [2]. Нередко для разработки привлекают данные об уклоне, глубине и скорости течения, а также ширине русла.

Для многих рек характерным является превышение максимальных заторных уровней воды над уровнями весеннего половодья и летних паводков. Согласно методическим рекомендациям [35], необходимо добавлять вычисленные «приращения» к рассчитанному максимальному уровню весеннего половодья. В случае катастрофических заторов приращение составляет более 5 м, для сильных заторов – 3 – 5 м, для средних заторов – 1 – 3 м, а для слабых заторов – 1 – 2 м [23, 36]. Эти рекомендации позволяют учесть потенциальное увеличение уровня воды в результате заторных явлений и способствуют оценке максимального заторного уровня на реке.

Обладая информацией об опасных уровнях воды и имея прогноза максимальных заторных уровней, можно определить зону затопления [3, 37] и определить населенные пункты, которые станут подвержены риску наводнения.

Практически все разработанные методики прогноза максимальных заторных уровней относятся к краткосрочным прогнозам с заблаговременностью от 1 – 2 до 8 – 10 дней и относятся только к тем участкам, где заторы образуются регулярно [36].

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

#### 3.1 Характеристика заторных участков

Вскрытие реки Печоры распространяется с верховьев к низовью. Лед, двигаясь с юга, на своем пути неоднократно вступает в зону ледостава, создает заторы, иногда со значительными подъемами уровней воды. На участке от Троицко-Печорска до Усть-Щугора заторы льда обычно бывают кратковременными и не приносят большого ущерба, так как на берегах реки нет крупных населенных пунктов. Максимальные уровни весеннего половодья на этом участке, как правило, выше, чем максимальные ледоходные уровни. А по водопосту Усть-Кожва максимальные уровни при ледоходе зачастую превышают стокковые максимумы в результате образования заторов льда, которые почти ежегодно наблюдаются в районе селений Песчанка и Соколово (854 – 847 км от устья). Реку Печора можно разделить на 3 участка от Усть-Щугора до Усть-Вои (1038-998 км):

1) Участок реки Печора от Усть-Щугора до Усть-Вои (1038 – 998 км). Река протекает в возвышенных берегах, в районе с.Усть-Щугор она прорезает крайнюю западную гряду Урала. На большом протяжении этого участка берега реки беспойменные, лишь местами имеется узкая полоса пойменного берега шириной до 1 км. В границах этого участка реки сильно меандрируется в слабо разработанной долине, образуя большие излучины. Русло сложено преимущественно из галечно-каменистых, слабо деформирующихся грунтов.

2) От селения Усть-Воя до с.Усть-Кожва (998 – 872 км). Река протекает по сравнительно широкой, до 3 км, пойме со значительным количеством островов, протоков, осерёдков, с широкими песчано-гравелистыми отмелями, косами и галечными скоплениями. Возвышенные крутые берега встречаются реже. Русло реки песчаное, гравелисто-галечное, слабо деформирующееся.

3) От с.Усть-Кожва до с.Соколово (872 – 846 км). Долина реки Печора расширяется, здесь она резко асимметрична – высокий левый берега и широкая пойма (от 3 до 10 км) на правом берегу. В долине много широких залесённых и частично заболоченных террас. Пойма высотой 6-8 м покрыта луговой растительностью и кустарниками, пересечена старицами, протоками и небольшими озерами. Русло реки в основном песчано-гравелистое, деформирующееся, в нем в большом количестве имеются неустойчивые осередки, косы, мели: возрастает количество островов. Русло реки разветвляется на рукава.

На описываемом участке реки Печора имеется 3 порога: Щугорский (1037 км), Аранецкий (943 км) и Кожвинский (862 км).

Место образования затора льда на реке Печора в районе города Печора не является постоянным. Участок реки изобилует островами и протоками (шарами). При установлении заторов в основном русле шары часто освобождаются от льда раньше него. Заторы льда образуются:

1. На участке в районе железнодорожного моста (874 км) наблюдается сужение русла, в 1.5 км ниже моста расположен остров Середовой, рядом с ним Кожвинская протока огибает остров Медлапевди. Схема участка представлена на рисунке 3.1.

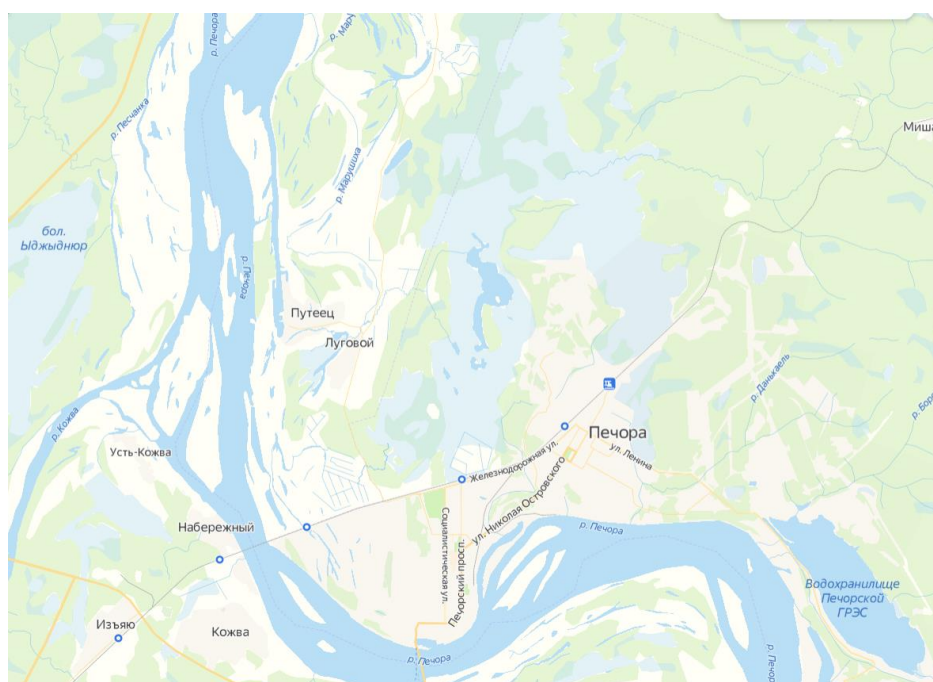


Рисунок 3.1 – Карта первого участка

2. Выше выхода Марушкурьи от 864 км в основном русле образуется сужение протяженностью 4-5 км. На 862 км находится Кожвинский порог. У с.Песчанка расположены острова Малый и Большой Кипради, остров Лыханди отделяется от основного русла протоку Лыхан Шар. Схема участка представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Карта второго участка

3. Ниже по течению до с.Соколово остров Конканди отделяет протоку Конкан Шар. Схема участка представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Карта третьего участка

4. Дальше от с. Соколово до с. Уляшово располагается еще группа островов, но заторы льда на Уляшовских перекатах городу уже не страшны. Схема участка представлена на рисунке 3.4.

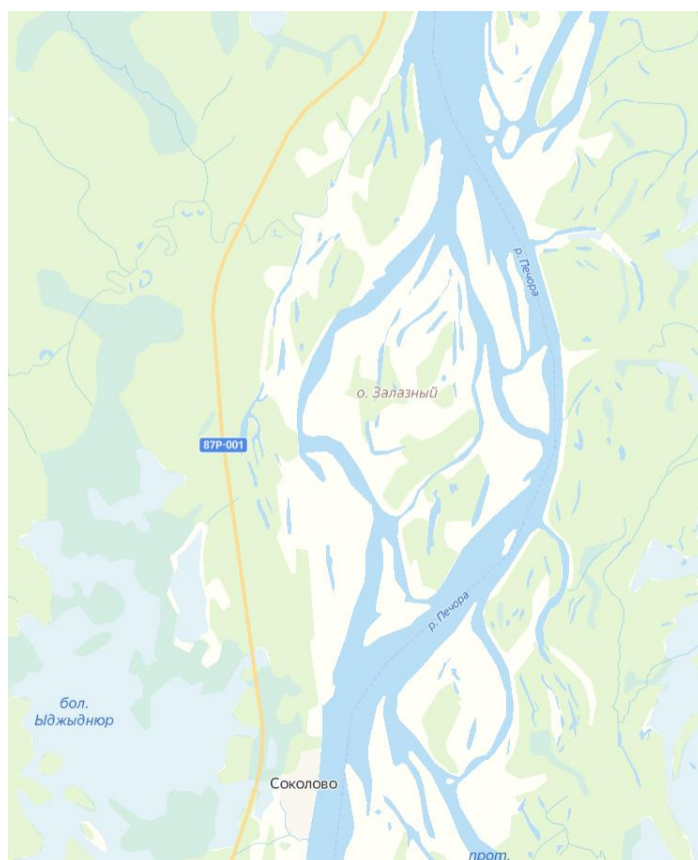


Рисунок 3.4 – Карта четвертого участка



### 3.2 Исходные данные для разработки методики

В гидрологическом отношении река достаточно хорошо изучена. Стационарные водомерные наблюдения проводились на 30 постах начиная с 10-ых годов прошлого века, а первые посты были открыты в 1895 году (с. Усть-Кожва, с. Усть-Уса). В настоящее время действует более 10 постов. На рисунке 3.5 приведена схема расположения действующих постов.

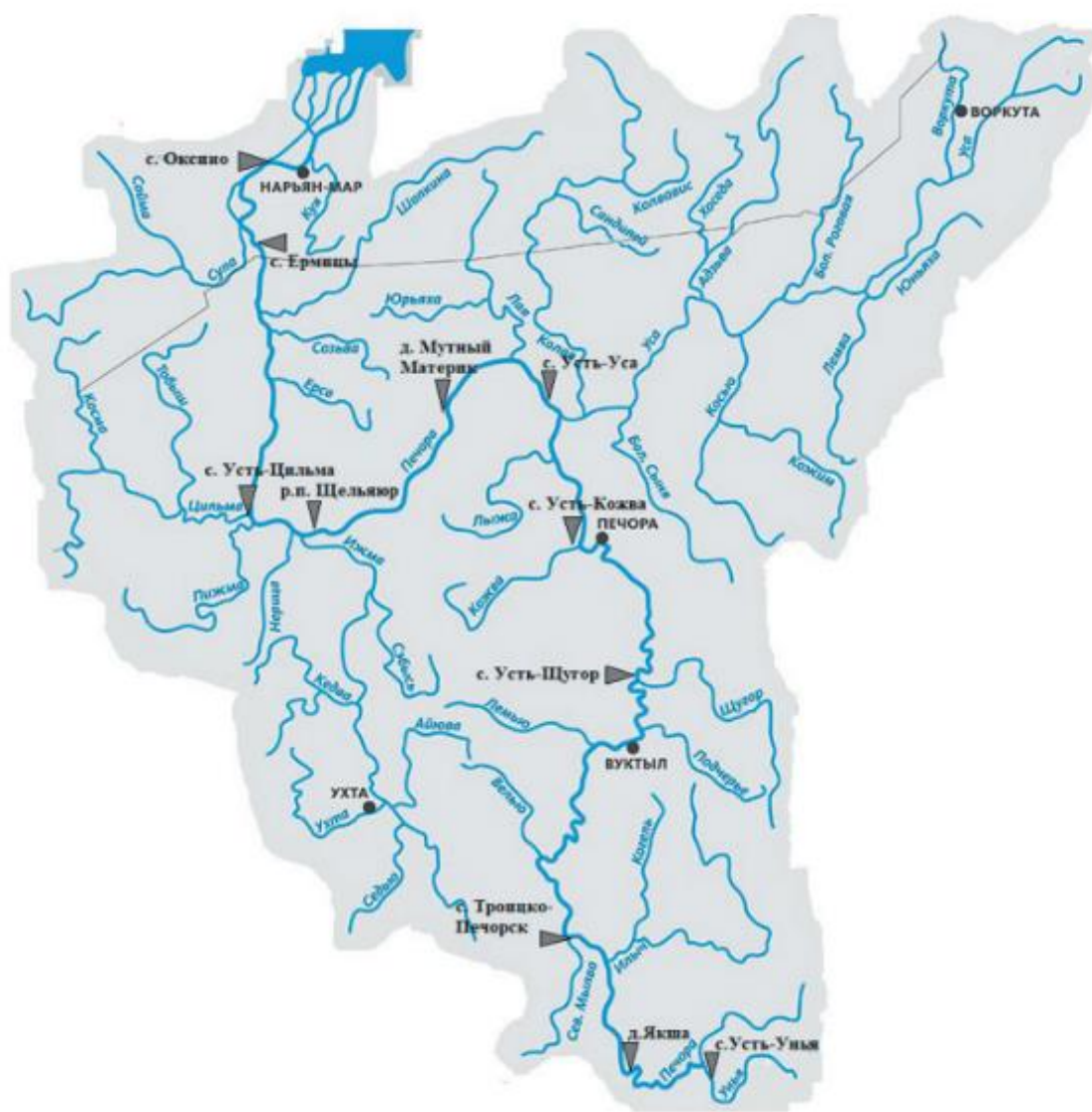


Рисунок 3.5 – Пункты гидрологических наблюдений (треугольники) на р. Печора

Водомерный пост Усть-Кожва (расстояние от устья 872 км, площадь водосбора 74600 км<sup>2</sup>) расположен в 3.5 км выше впадения реки Кожва, в 0.5 км ниже железнодорожного моста. Русло прямолинейное, песчано-гравелистое.

Берега умеренно крутые, открытые, левый высотой 10 – 15 м, правый – 5 – 6 м. Пост находится на левом берегу, оборудован деревянными и металлическими сваями. Наблюдения на водпосту Усть-Кожва ведутся только за уровнем воды. Между тем для оценки величины заторного подъема уровня воды и вообще интенсивности заторной деятельности необходимо иметь кривую расходов воды  $Q = f(H)$ . Ближайший стоковый водпост Концебор (расстояние от устья 939 км, площадь водосбора 71500 км<sup>2</sup>) открыт только в 1980 г. Вышележащим стоковым постом является Усть-Щугор (расстояние от устья 1036 км, площадь водосбора 67500 км<sup>2</sup>).

Образование заторов льда вызывается множеством факторов, среди которых основным являются: более позднее вскрытие нижних участков течения; формирование волны половодья со значительными расходами и скоростями течения; значительная толщина и прочность льда [16] и другие факторы.

В связи с этим для разработки методики прогноза исходные данные включают сведения об уровне и ледовом режиме по ближайшим гидрологическим постам. В работе исходными служили данные наблюдений по водпостам Усть-Щугор и Усть-Кожва за период с 1921 по 2021 год взятые из Гидрологических ежегодников и фондовых таблиц Коми ЦГМС Печора:

- максимальные уровни в период образования ледостава; минимальные уровни в зимний период (с 1 января до вскрытия);
- средние уровни за первые 5 дней ледостава;
- максимальная толщина льда; даты перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С;
- даты подъема уровня ( $> 10$  см/сут.;  $> 20$  см/сут.);
- даты появления и уровни воды при появлении закраин;
- даты начала подвижки льда и уровни при подвижке;
- сумма температур от даты перехода через 0 °С до даты вскрытия;
- даты вскрытия и уровень воды при вскрытии;

- даты максимального уровня ледохода и максимальные уровни при ледоходе;
- даты очищения ото льда; максимальные уровни весеннего половодья;
- максимальные снеготзапасы за зиму и др.

Источником исходных данных служили Гидрологические Ежегодники и фондовые таблицы Коми ЦГМС Печора. Данные представлены в приложение А.

### 3.3 Методика прогноза максимальных заторных уровней

В настоящее время процесс заторообразования достаточно хорошо изучен в натурных и лабораторных условиях [18, 28]. Общие сведения о заторах льда подробно освещены в работе Попова В.П. [34]. На образование льда влияет совокупность нескольких факторов. Но максимальный заторный уровень главным образом обусловлен расходом воды у движущейся вниз по реке кромки ледяного покрова, прямо пропорционален ему. Таким образом представляется возможным для целей прогнозов максимального заторного уровня ( $H_{зтр.макс.}$ ) ограничиться установлением эмпирической зависимости вида  $H_{зтр.макс.}=f(Q_{зтр.})$ .

Затор льда формируется при расходе воды:

$$Q_{вскр.} < Q_{зтр.} < Q_{пр.}, \quad (3.1)$$

где  $Q_{вскр.}$  – расход при вскрытии;

$Q_{зтр.}$  – расход воды у кромки льда;

$Q_{пр.}$  – расход, при котором происходит прорыв затора.

$Q_{вскр.}=f(\sigma h_{л.})$  и  $Q_{пр.}=f(\sigma h_{л.})$ , где  $\sigma h_{л.}$  – прочность ледяного покрова при вскрытии реки. Теоретически для каждого конкретного пункта водомерных наблюдений существует вполне определенное соотношение между  $Q_{зтр.}$  и  $\sigma h_{л.}$  [28].

По этому принципу разработан целый ряд методик. Например, заторные уровни воды р. Лены у г. Ленска определяются только одним фактором – расходом воды у кромки ледяного покрова ( $Q_{кр.}$ ) [7]

$$H_{зтр.} = f(Q_{кр.}) \quad (3.2)$$

Прогноз максимального заторного уровня ( $H_{макс.зтр.}$ ) на реке Великой у г. Пскова основан на ожидаемой величине максимального расхода весеннего половодья ( $Q_{макс.}$ ) [29].

В основу методики положена зависимость  $H_{зтр.} = H(Q_{зтр.}) + \Delta H_{зтр.}$ , где  $H(Q_{зтр.})$  – уровень воды, соответствующий в условиях открытого русла расходу воды на дату  $H_{зтр.}$ ;  $\Delta H_{зтр.}$  – дополнительный подъём уровня в верхнем бьефе затора за счёт стеснения русла скоплением льда

$$\Delta H_{зтр.} = f(\sigma h_{л.}) \quad (3.3)$$

На реках Сибири получены хорошие связи максимального заторного уровня от максимального уровня при установлении ледостава.

Влияние заторно-зажорных скоплений льда, сохранившихся к началу весны, оказывается подчас настолько значительным, что обнаруживается достаточно тесная зависимость между предсказываемым уровнем  $H_{зтр.макс.}$  и высшим уровнем в начале зимы [28].

Авторы Карнович В.Н., Кулевский Г.А., Кулешова Т.В. выдвигают положение, что роль условий замерзания достаточно велика, в некоторых случаях может быть решающей [21]. Для р. Ангары у г. Каменска получена зависимость  $H_{зтр.} = f(H_{лост.})$ , коэффициент корреляции этой зависимости составляет 0.81.

Лисер И.Я. [25] заключает, что для р. Оби удельный вес обеих составляющих  $Q_{вскр.}$  и  $H_{мнз.}$  примерно одинаков, т.е. оба фактора одинаково значимы

$$H_{\text{макс.вскр.}} = f(Q_{\text{вскр.}} \cdot H_{\text{зам.}}), \quad (3.4)$$

$$H_{\text{макс.вскр.}} = f(Q_{\text{вскр.}} \cdot H_{\text{мнз.}}), \quad (3.5)$$

где  $Q_{\text{вскр.}}$  – расход воды при вскрытии;

$H_{\text{зам.}}$  – максимальный уровень при установлении ледостава;

$H_{\text{мнз}}$  – максимальный уровень при ледоставе.

Все полученные зависимости просты при использовании, за исключением тех, которые включают в себя  $\sigma h_{\text{л}}$ , когда нужно выполнять расчёт по методу Булатова. Трудность заключается в определении расходов воды, особенно если в прогнозируемом пункте расходы воды не измеряются.

Как правило заторы льда на р. Печора устанавливаются, когда теплый период, вызывавший вскрытие, резко сменяется похолоданием. Сказывается также плохая подготовка к вскрытию нижележащего участка.

На первом этапе разработки методики были построены графики связи максимальных уровней весеннего ледохода (включая заторные максимумы) по водпосту Усть-Кожва ( $H_{\text{макс лдх. У.-К.}}$ ) с уровнями при вскрытии ( $H_{\text{вскр. У.-Щ.}}$ ) и максимальными уровнями весеннего ледохода по водпосту Усть-Щугор ( $H_{\text{макс лдх. У.-Щ.}}$ ) (рисунки 3.6 и 3.7). На этих графиках наблюдается большой разброс точек. На графике связи максимальных уровней весеннего ледохода на водпосту Усть-Кожва ( $H_{\text{макс лдх. У.-К.}}$ ) с уровнями при вскрытии по Усть-Кожва ( $H_{\text{вскр. У.-К.}}$ ) (рисунок 3.8) прослеживается общее направление поля точек. На рисунках 3.9 и 3.10 представлены графики связи максимального уровня при ледоходе на водпосту Усть-Кожва с расходами при вскрытии по Усть-Щугору и Усть-Кожве. Исходные гидрологические данные для построенных графиков связей представлены в Приложение А.

$H_{\max}$  лдх. У.-К.

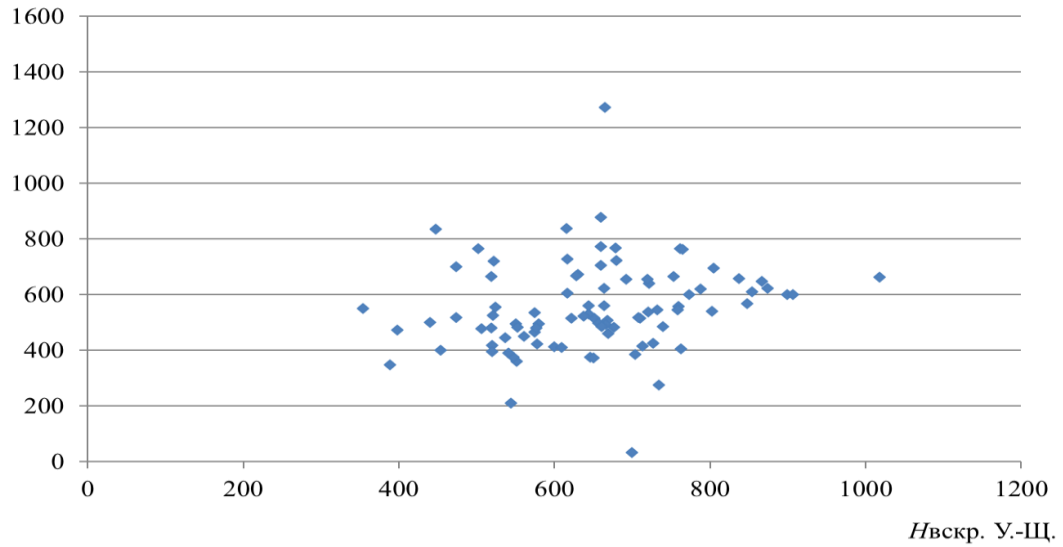


Рисунок 3.6 – График зависимости максимального уровня воды при ледоходе (водпост Усть-Кожва) от уровня воды при вскрытии (водпост Усть-Щугор)

$H_{\max}$  лдх У.-К.

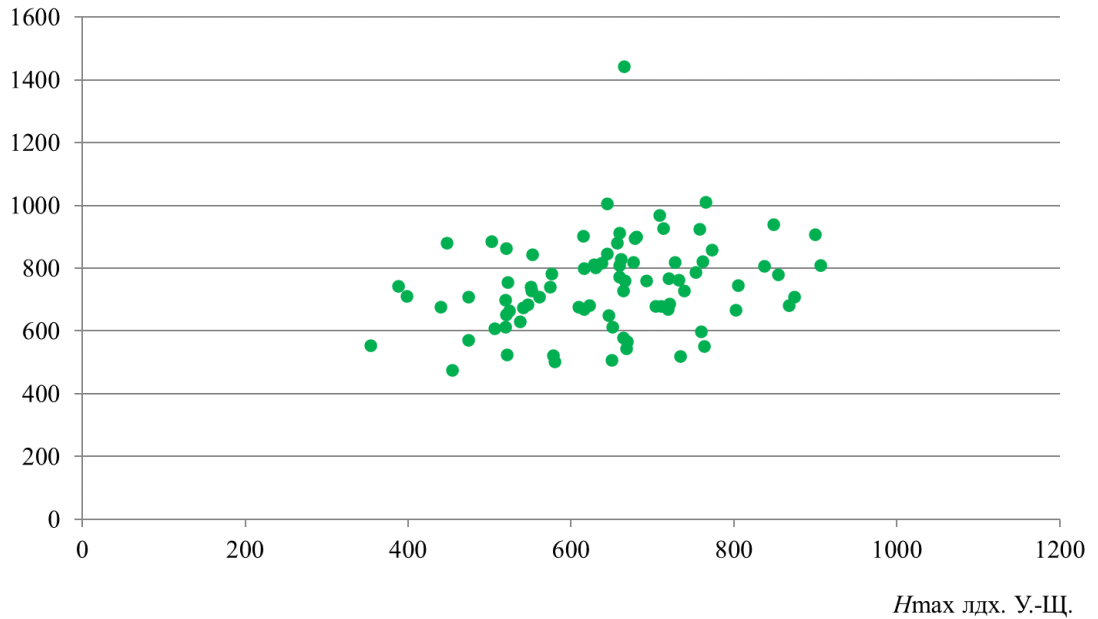


Рисунок 3.7 – График зависимости максимального уровня воды при ледоходе (водпост Усть-Кожва) от уровня воды при ледоходе (водпост Усть-Щугор)

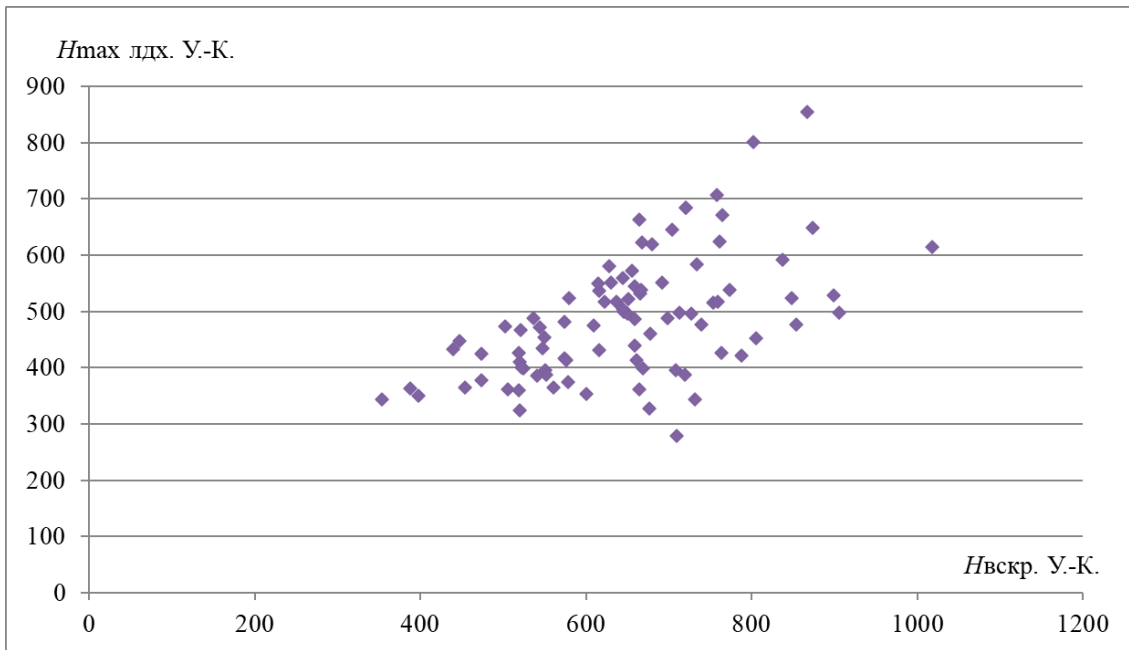


Рисунок 3.8 – График зависимости максимального уровня воды при ледоходе (водпост Усть-Кожва) от уровня воды при вскрытии (водпост Усть-Кожва)

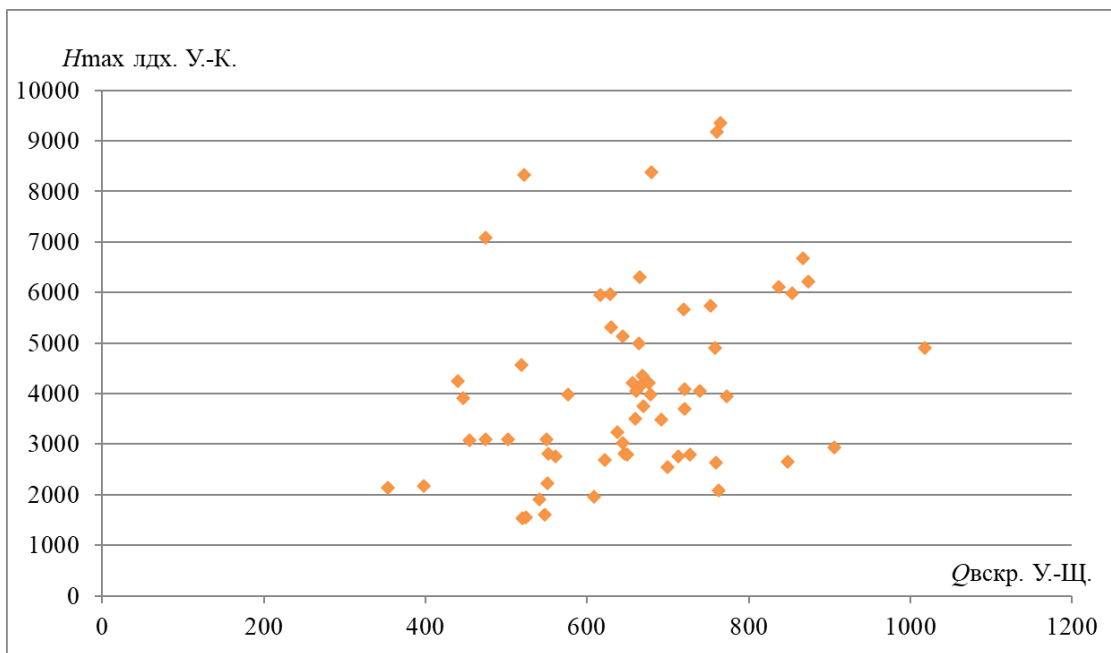


Рисунок – График зависимости максимального уровня воды при ледоходе (водпост Усть-Кожва) от расхода воды при вскрытии (водпост Усть-Щугор)

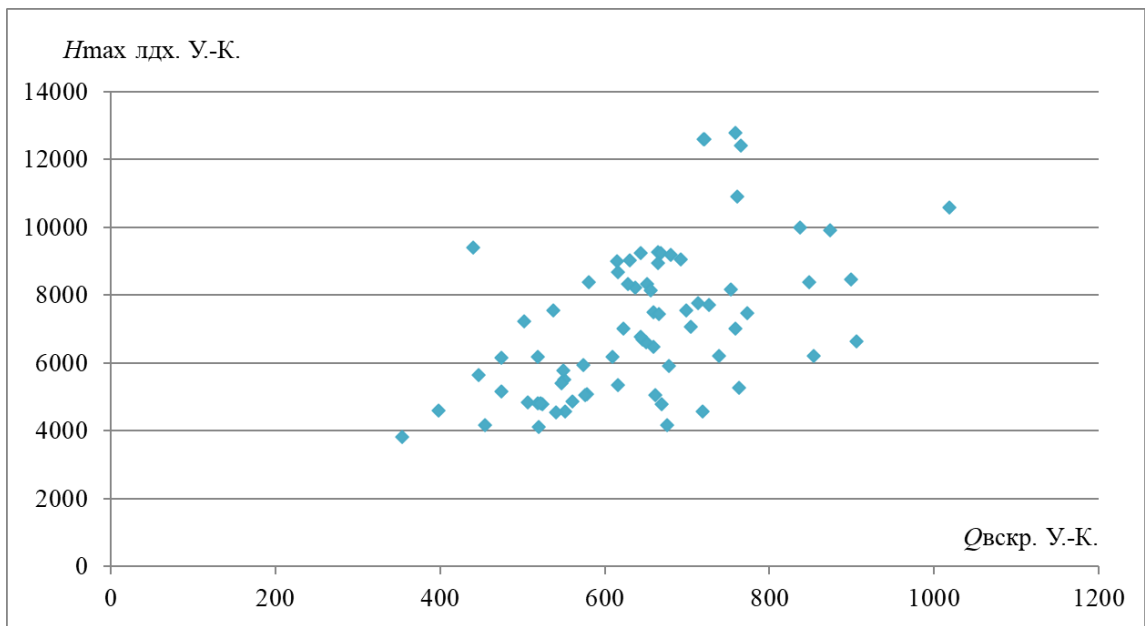


Рисунок 3.9 – График зависимости максимального уровня воды при ледоходе (водпост Усть-Кожва) от расхода воды при вскрытии (водпост Усть-Кожва)

Наиболее тесная связь была получена для зависимости максимальных уровней по водпосту Усть-Кожва при ледоходе от расходов воды по посту Усть-Щугор в день вскрытия Печоры на водпосту Усть-Кожва (рисунок 3.10), которая была аппроксимирована степенной и экспоненциальной зависимостями.

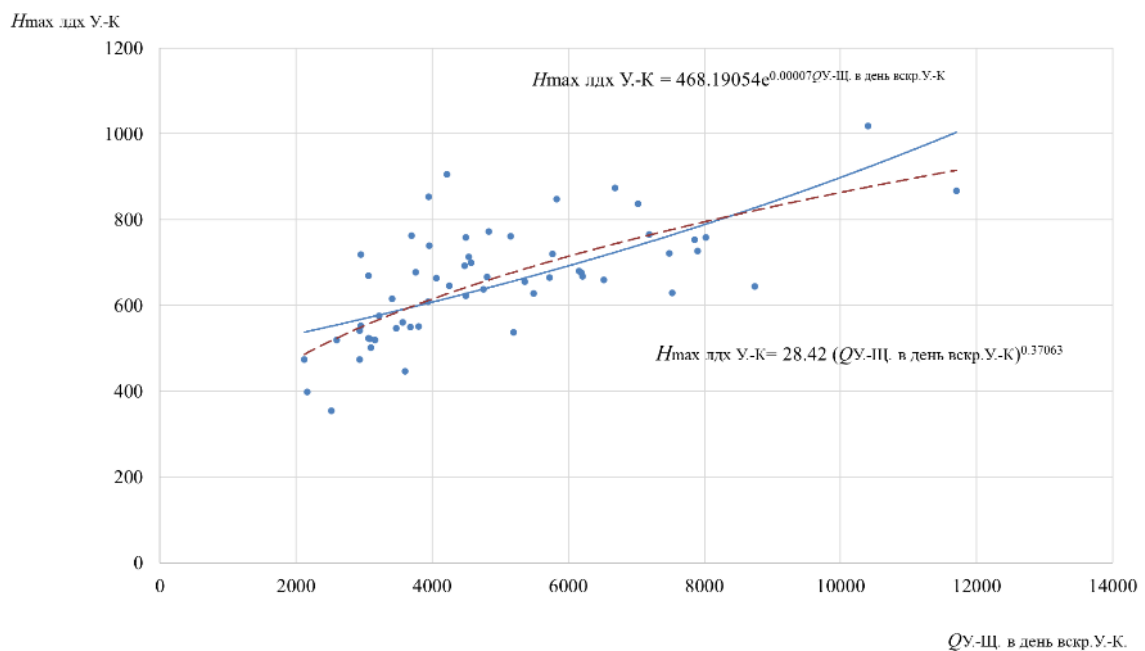


Рисунок 3.10 – График зависимости максимального уровня воды при ледоходе на Усть-Кожва от расхода воды на Усть-Щугоре в день вскрытия Усть-Кожва



Оценка на зависимом материале (1955 – 2016 гг.) экспоненциальной и степенной зависимостей позволила оценить методику как эффективную:  $S/\sigma = 0.79$  и  $S/\sigma = 0.73$ . Исходные данные и результаты прогнозов приведены в Приложении Б. На рисунке 3.11 приведены фактические и прогнозные значения уровней.

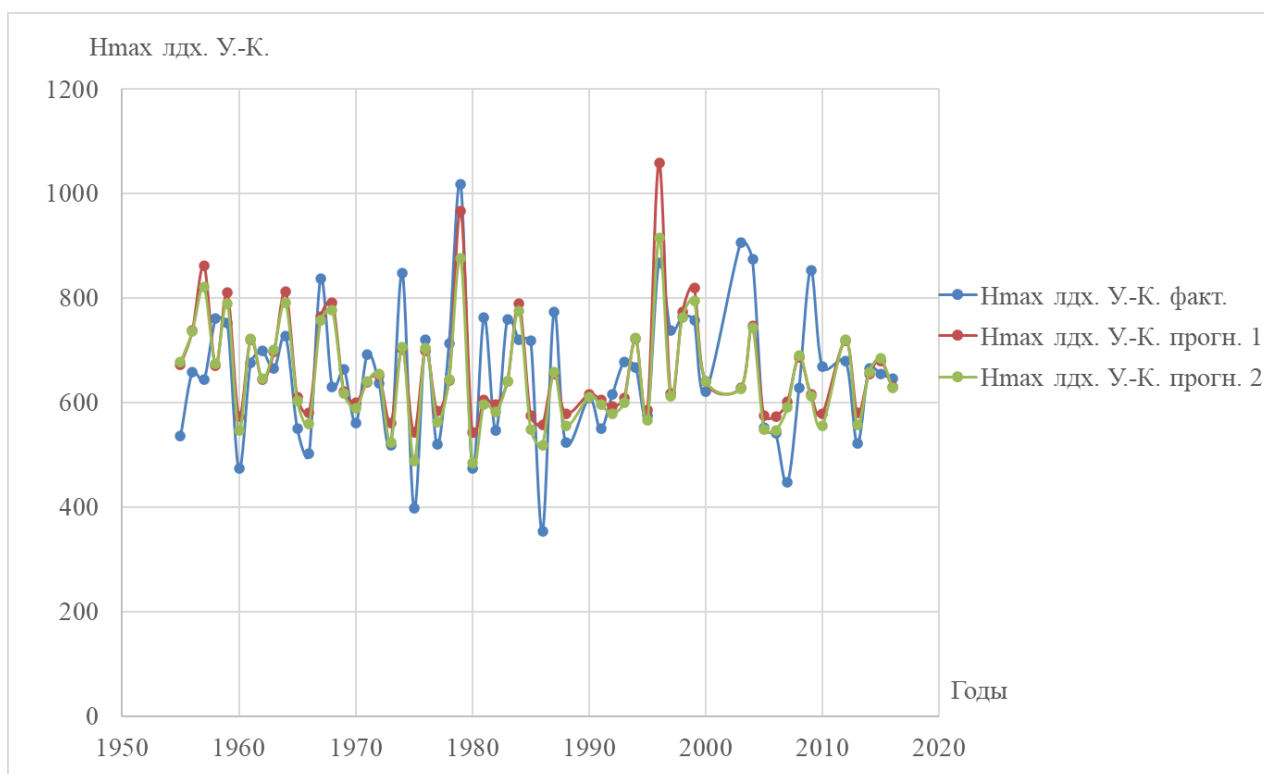


Рисунок 3.11 – График связи фактических и прогнозных значений максимального уровня воды при ледоходе на водпосту Усть-Кожва в зависимости от года

Оценка методики на независимом материале проводилась для данных с 2017 по 2021 годы. Результаты поверочных прогнозов приведены в таблице 3.1. Поверочные прогнозы оправдались в 60% случаев, что говорит о недостаточной эффективности работы методики.

Таблица 3.1 – Результаты проверки методики на независимом материале (2017 – 2021 гг.)

Год	$H_{\text{махлдж.У.-К.}}$ факт.	$H_{\text{мах лдж. У.-К.}}$ прогн.		Ошибка прогноза		Оправдываемость	
		эксп.	степ.	эксп.	степ.	эксп.	степ.
		завис.	завис.	завис.	завис.	завис.	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	-	+

#### 3.4 Использование методов многомерной статистики для совершенствования методик прогнозирования

В связи с невысокой эффективностью полученных методик было принято решение использовать дискретно-непрерывные модели, разрабатываемые с применением методов многомерного статического анализа. Дискретно-непрерывные модели используются в тех случаях, когда совокупность данных является неоднородной и разделяется на изолированные группы (классы), в которых связь между предсказываемой величиной (предиктантом) и определяющими факторами (предикторами) существенно различны.

Построение подобных моделей заключается в выполнении двух основных этапов. На первом этапе с помощью дискретной части модели выявляются неоднородности в совокупности данных и проводится разделение на однородные классы. На втором этапе для каждого класса строятся регрессионные прогностические уравнения.

Для решения задачи оценки однородности и разделения на однородные группы (классы) использовались методы кластерного анализа, реализуемые в программе Statistica. Преимуществом данного метода является то, что он дает

возможность проводить разделение объектов на по одному признаку, а по целому их ряду. Кроме того, он не накладывает ограничения на вид данных и позволяет исследовать множество данных произвольной природы.

#### 3.4.1 Метод $k$ – средних

Для выделения однородных групп может быть использован дивизивный метод  $k$ -средних. В основе метода лежит предположение, что существует некоторое количество кластеров  $m$ , отличных друг от друга, и дающих определенные решения. Количество кластеров и принадлежность к ним признаков (предикторов) можно изменять и сравнивать между собой полученные решения.

При реализации метода в программе Statistica сначала задается  $m$  случайно выбранных кластеров, а затем изменяет принадлежность объектов к ним, чтобы минимизировать изменчивость внутри кластеров и максимизировать изменчивость между кластерами. Алгоритм случайным образом в пространстве назначает центры будущих кластеров. Затем вычисляет расстояние между центрами кластеров и каждым объектом, и объект приписывается к тому кластеру, к которому он ближе всего. Завершив приписывание, алгоритм вычисляет средние значения для каждого кластера. Этих средних будет столько, сколько используется переменных для проведения анализа, –  $k$  штук. Набор средних представляет собой координаты нового положения центра кластера. Алгоритм вновь вычисляет расстояние от каждого объекта до центров кластеров и приписывает объекты к ближайшему кластеру. Вновь вычисляются центры тяжести кластеров, и этот процесс повторяется до тех пор, пока центры тяжести не перестанут «мигрировать» в пространстве.

Перед проведением кластеризации необходимо стандартизовать переменные. В таблице 3.2 приведены двенадцать факторов, влияющие на уровень воды при ледоходе на Усть-Кожве с 1955 по 2021 год, которые были стандартизированы, в таблице 3.3 – стандартизированные.

Таблица 3.2 – Исходные данные для метода k – 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	$S_{\text{max}}$ (У-Щ)	$S_{\text{max}}$ (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	$\Sigma X$ (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от $D_0$ 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	$S_{\text{max}}$ (У-Щ)	$S_{\text{max}}$ (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	$\Sigma X$ (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	$S_{\text{max}}$ (У-Щ)	$S_{\text{max}}$ (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	$\Sigma X$ (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от $D_0$ 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	$S_{\text{max}}$ (У-Щ)	$S_{\text{max}}$ (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	$\Sigma X$ (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от $D_0$ 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

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	$S_{\text{max}}$ (У-Щ)	$S_{\text{max}}$ (Шежимдекост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	$\Sigma X$ (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от $D_0$ до $D_{\text{вскр.}}$
1955	0.00413	-0.65634	0.207527	–	0.249312	-0.1287	–	3.511422	-2.84465	-0.67476	-0.87421	0.360054
1956	-0.45387	0.926369	-0.25351	-0.30935	0.921132	-2.01388	–	-1.14827	-1.44593	0.936254	1.070989	0.042867
1957	0.691125	-0.14501	0.946929	-0.56214	2.051011	-0.76415	–	-0.54574	-1.51341	0.030056	-0.11774	0.452399
1958	1.301788	1.279435	1.668934	2.740304	0.223864	0.358486	–	-0.58218	0.447651	0.634188	0.746789	-0.0361
1959	0.271295	0.682874	0.48589	0.895452	1.603131	0.273759	–	0.121623	-0.35804	0.432811	0.314522	0.360054
1960	-0.59699	-0.21805	-0.39704	-0.52987	-0.90602	-0.44642	–	-1.43757	0.279969	-0.07063	0.422589	-0.5634
1961	-1.52253	-0.4372	-1.26258	0.072529	0.753177	0.506759	–	0.74047	0.650097	1.439697	1.395188	-0.28369
1962	0.00413	-3.17651	0.207527	-0.82569	-0.07133	0.63385	–	0.839736	0.04276	-1.68165	-1.73874	0.265032
1963	0.423961	4.3779	0.820796	1.196652	0.513968	0.125486	–	-0.8536	0.429247	0.030056	-0.00968	-0.1164
1964	0.080463	-0.77809	0.281467	-0.68585	1.623489	–	–	-1.11808	0.543762	1.23832	1.395188	0.042867
1965	-0.8737	-1.17986	-0.67106	-0.99243	-0.46322	-2.62815	–	0.006931	-1.42344	0.332122	0.206456	-0.2074
1966	-0.12945	1.279435	0.072695	-0.52449	-0.81949	-0.10751	-0.09439	-1.75124	0.731893	-0.27201	-0.33388	-0.70259
1967	0.996457	0.628088	1.277486	1.094459	1.175609	-0.97597	-3.14853	0.043149	0.834139	-0.97683	-1.19841	0.469798
1968	0.605251	0.725486	0.851242	0.669551	1.435176	-0.63706	-0.45798	0.977457	-0.72612	0.634188	0.530655	0.022792
1969	-1.20765	0.043702	0.955628	0.492058	-0.3309	-1.88679	-1.00336	-2.88453	-1.63611	1.842452	1.827455	-0.34927
1970	-1.17903	-0.63808	-0.94942	-0.71274	-0.58028	-1.23015	-1.02154	0.07512	-1.17805	1.137631	0.962922	-0.24488
1971	0.614793	0.622001	0.86429	-0.31473	-0.11714	0.040759	-0.71249	-0.18355	-1.2762	1.439697	1.395188	-0.24488
1972	0.290378	-0.19371	0.507637	-0.44919	0.020282	0.676214	-0.05803	-0.59425	0.241116	2.144518	2.151655	-0.21142
1973	-0.58745	0.676787	-0.38834	0.266158	-1.07397	0.612668	0.360092	-0.33894	0.971147	-1.58096	-1.41454	-0.44697
1974	0.347628	0.086313	0.572879	-0.76115	0.569953	0.019577	1.396318	0.001341	0.331092	0.634188	0.530655	-0.43492
1975	-1.31261	-0.49807	-1.0712	-1.0247	-1.29791	-0.06515	-0.18529	0.044714	0.302463	-1.37958	-1.63068	-0.62229



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	$S_{\text{max}}$ (У-Щ)	$S_{\text{max}}$ (Шежимдекоост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	$\Sigma X$ (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от $D_o$ до $D_{\text{вскр.}}$
1976	1.874284	-0.09631	2.408336	-0.20178	0.539416	0.527941	0.269195	-0.10329	0.868902	0.130745	0.098389	-0.28904
1977	-1.55115	-0.96071	-1.27998	-1.36893	-0.78896	-0.44642	0.323733	-0.3054	-0.56458	-0.47339	-0.65808	0.365407
1978	0.099546	-0.84505	0.303214	-0.71274	-0.0866	1.375214	1.3236	0.204568	1.842278	1.641075	1.827455	-0.55939
1979	1.206372	0.664612	1.538451	0.443651	2.895875	0.591487	0.778218	-1.51738	-0.26398	0.332122	0.206456	0.132536
1980	-1.04545	0.895932	-0.82764	1.62156	-1.31827	-1.39961	-1.40331	-0.1489	-0.26398	-0.57408	-0.87421	-0.28637
1981	-0.58745	-0.91201	-0.78066	-1.06773	-0.51412	1.20576	1.92352	0.943474	-1.13511	0.634188	0.422589	-0.15119
1982	-0.51112	-1.09463	-0.71803	-1.3259	-0.63118	-0.02279	-0.54888	0.009166	0.429247	-0.27201	-0.44194	0.163318
1983	0.280836	0.019352	-0.01864	-0.77191	-0.11205	1.523487	0.650962	0.777807	1.860682	-1.17821	-0.76614	-0.27298
1984	1.874284	0.524603	2.408336	0.007986	1.409728	0.930396	2.014417	1.377427	0.020266	0.734877	0.638722	-0.14049
1985	-0.95003	0.622001	-1.07816	0.857802	-0.89584	-0.76415	-0.82157	-1.72128	-1.25985	0.332122	0.314522	-0.60489
1986	-1.36986	-0.02326	-1.40872	-1.04621	-1.11469	0.97276	-0.58524	-0.17752	0.298373	-0.27201	-0.33388	-0.44295
1987	0.490752	0.275021	0.172732	-0.06731	0.060999	-0.97597	-0.36708	-0.74807	-0.6341	0.5335	0.530655	0.100416
1988	-0.84507	0.007178	-0.99204	-1.35817	-0.83985	-1.27251	-0.71249	0.170362	-1.20872	0.634188	0.638722	-0.54467
1989	0.338086	-0.72331	0.03355	-1.05697	-0.06624	0.252577	0.069222	0.358609	-0.56867	0.835565	0.854855	0.28243
1990	-0.11991	-0.88158	-0.38399	-1.13765	-0.39197	0.86685	1.105447	0.192719	0.097972	-1.07752	-0.98228	0.655827
1991	-0.32028	-0.36415	-0.55971	-0.52987	-0.5243	0.824487	0.832756	-0.45676	0.625558	-1.58096	-1.41454	-0.099
1992	-0.53974	1.06029	-0.74152	1.008402	-0.66172	-0.63706	0.41463	0.212841	-0.42757	0.734877	0.638722	0.184731
1993	-0.25349	1.297697	-0.50186	-0.05118	-0.48358	2.47667	1.63265	0.031971	1.650056	0.332122	0.314522	-0.0642
1994	1.282705	-0.28502	0.948669	0.147829	0.763356	-0.40406	-1.0579	-0.07892	0.429247	-0.27201	-0.33388	-0.42154
1995	-0.70195	-0.45546	-0.87461	-0.0458	-0.75842	-0.06515	-0.36708	1.378321	0.120466	-2.08441	-2.06294	0.501918
1996	3.505899	0.567215	—	1.395659	3.557516	-0.21342	—	0.214406	0.224757	0.5335	0.422589	0.113799

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	$S_{\text{max}}$ (У-Щ)	$S_{\text{max}}$ (Шежимдекоост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	$\Sigma X$ (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от $D_0$ до $D_{\text{вскр.}}$
1997	-0.10083	-0.41894	-0.3666	-0.00815	-0.38179	0.040759	-0.49434	0.100831	-0.0554	-1.07752	-1.41454	-0.21543
1998	1.750244	1.273348	2.321348	2.842497	1.262131	1.248123	-0.58524	-1.56992	0.079568	1.339009	1.179055	0.123167
1999	2.093741	-0.05978	2.495325	0.44903	1.684564	0.316123	-0.36708	-1.53795	-0.4153	0.231434	0.206456	-0.49381
2000	0.280836	-0.23023	-0.01864	-0.74501	-0.11205	0.104304	–	0.742706	-0.2149	-1.07752	-1.41454	0.081679
2001	-0.74966	-0.71113	-0.91375	-0.32011	-0.78896	-0.63706	-0.14893	-0.71632	-0.55435	-0.87614	-0.98228	-0.12978
2002	-1.25536	-1.70337	-1.3226	-1.48726	-1.0587	-0.1287	0.996371	-0.45788	0.690995	-0.17132	-0.33388	0.420279
2003	0.099546	0.287196	-0.18392	-0.61593	-0.24946	0.252577	0.796397	-0.92805	2.040633	0.030056	0.638722	-0.04145
2004	1.530787	0.415031	1.24269	1.148245	1.007654	0.676214	0.12376	0.75545	0.915935	1.036943	1.179055	-0.62898
2005	-0.95003	-0.4372	-1.07816	-0.68047	-0.89584	-1.84442	–	0.104185	-1.60952	-0.17132	-0.33388	-0.08294
2006	-0.96911	-0.99115	-1.09382	-1.16454	-0.90602	-0.2346	0.251016	0.607445	-0.77111	0.734877	0.746789	-0.46169
2007	-0.38708	1.717725	-0.61625	-0.08345	-0.56502	0.97276	0.214657	0.442225	1.367859	-0.97683	-1.19841	7.615205
2008	0.881958	0.695049	0.546782	1.01378	0.396909	1.290487	0.905474	1.047882	0.791196	1.23832	1.179055	-0.46704
2009	-0.11037	0.335895	-0.3666	1.024538	-0.38688	-0.08633	-0.29437	1.076723	-0.5155	1.137631	1.070989	-0.2248
2010	-0.84507	-0.56503	-0.99204	-0.16951	-0.83985	-0.08633	0.178298	-1.40739	0.464011	-0.77545	-0.98228	-0.28235
2011	-0.8737	0.214148	-0.99204	0.841666	-0.85512	-1.42079	-1.91233	0.104185	-1.4991	-1.68165	-0.87421	0.109784
2012	1.25408	1.023766	0.919963	2.315396	0.737908	-1.31488	-1.94869	0.901889	-1.01037	-1.07752	-1.19841	-0.27834
2013	-0.82599	1.011592	-0.97639	2.288503	-0.82967	-0.31933	-0.78521	-0.68525	-0.84882	-0.87614	-0.55001	-0.13112
2014	0.48121	-0.37024	0.164033	0.045636	0.050819	-0.31933	-0.13075	0.439766	1.345365	-0.77545	-0.87421	-0.56206
2015	0.805625	-0.34589	0.470232	0.072529	0.330744	0.760941	0.360092	0.820956	1.255389	0.130745	0.098389	0.062942
2016	0.118629	-1.08855	-0.16652	-0.67509	-0.2342	-0.84888	–	1.205277	-0.00427	-1.48027	-1.52261	0.06428
2017	-0.52066	-0.33371	1.01391	0.088665	-0.65154	0.97276	-0.31255	0.026158	0.15114	0.5335	0.422589	-0.62898

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	$S_{\text{max}}$ (У-Щ)	$S_{\text{max}}$ (Шежимдекоост)	$\Sigma\Theta$ - (Печора)	$\Sigma X$ (Печора)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (10см)	$\Delta D_{\text{пол}}$ (20см)	$\Sigma\Theta$ от $D_o$ до $D_{\text{вскр.}}$
2018	0.090004	-1.10072	-0.19262	-0.68585	-0.25455	1.163396	0.578245	1.186497	0.167499	1.036943	1.070989	-0.32518
2019	-0.70195	-0.41894	-0.87461	-0.00815	-0.75842	1.43876	0.160119	0.932966	1.079527	0.231434	0.422589	-0.19803
2020	0.156796	0.031527	-0.13173	0.572737	-0.20366	1.735306	1.850803	1.790141	1.924074	-0.87614	0.206456	0.132536
2021	-1.17903	-0.93028	-1.26345	-0.53525	-1.01799	-1.44197	0.014683	-0.5207	-0.31919	-1.68165	-1.41454	0.366746

Алгоритм проведения кластерного анализа в программе *Statistica* включает несколько этапов. Используем команду *Многомерный разведочный анализ* из вкладки *Анализ* и выбираем *Кластерный анализ*. В появившемся окне можно выбрать необходимый метод (рисунок 3.12), например метод k-средних.

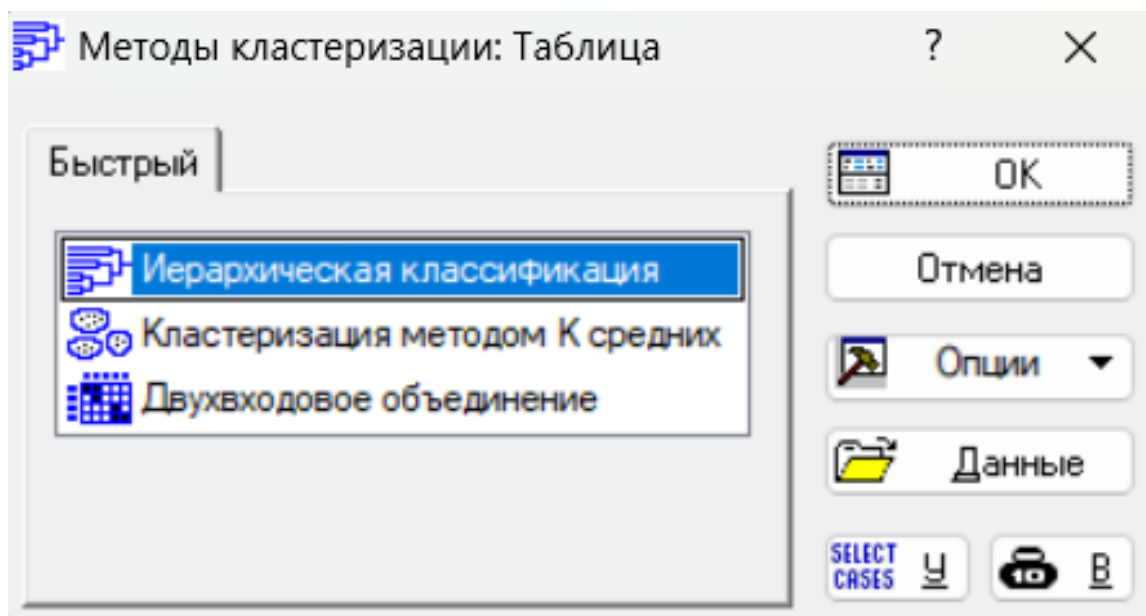


Рисунок 3.12 – Диалоговое окно модуля *Кластерный анализ*

В диалоговом окне (рисунок 3.12) необходимо указать те переменные, которые будут подвергаться анализу. В поле *Объекты* указываются то, что мы собираемся кластеризовать – переменные (строки), так как нас интересуют группы факторов, влияющих на предиктант, но не их признак.

На первом этапе количество кластеров неизвестно, поэтому зададимся значением 5. Приемлемость разбиения будет определяться при помощи ряда показателей, например, расстоянием между кластерами, средним значением переменных, графиком средних и т.д.

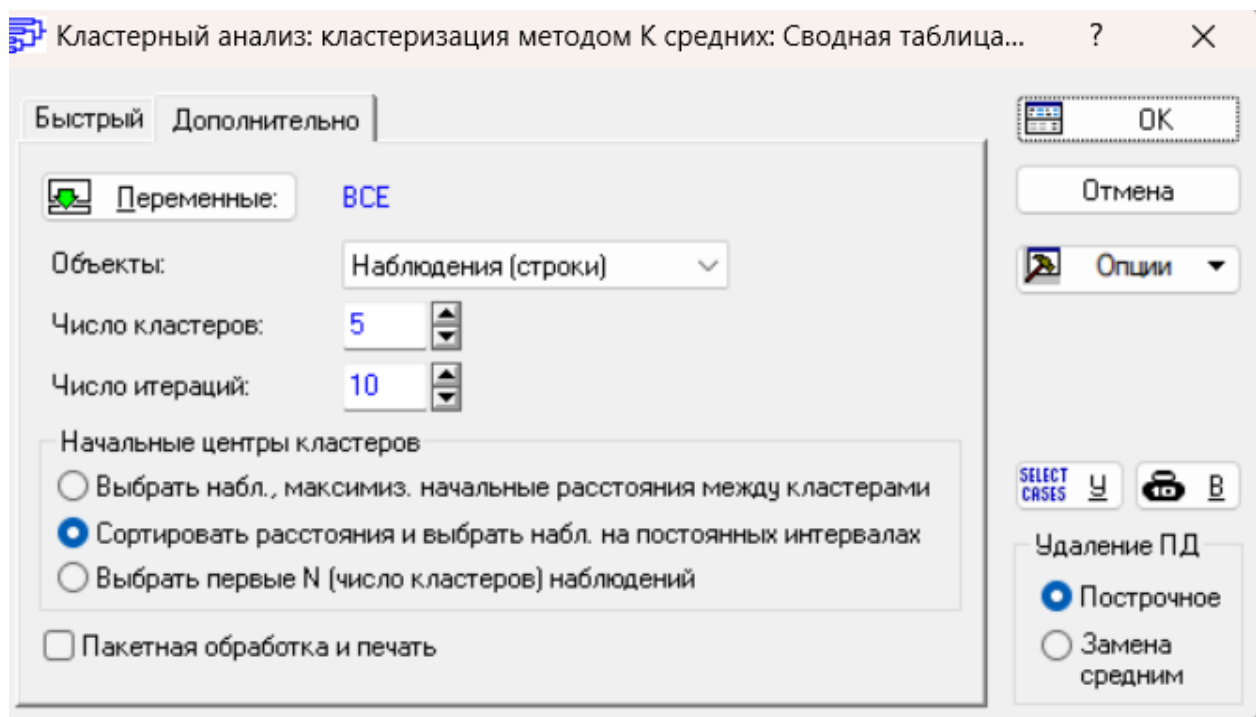


Рисунок 3.13 – Диалоговое окно метода k – среднего

При проведении анализа средние значения в кластерах визуализируют с помощью графика. Для этого в появившемся диалоге на вкладке *Дополнительно* нажимаем на кнопку *График средних* (рисунок 3.14).

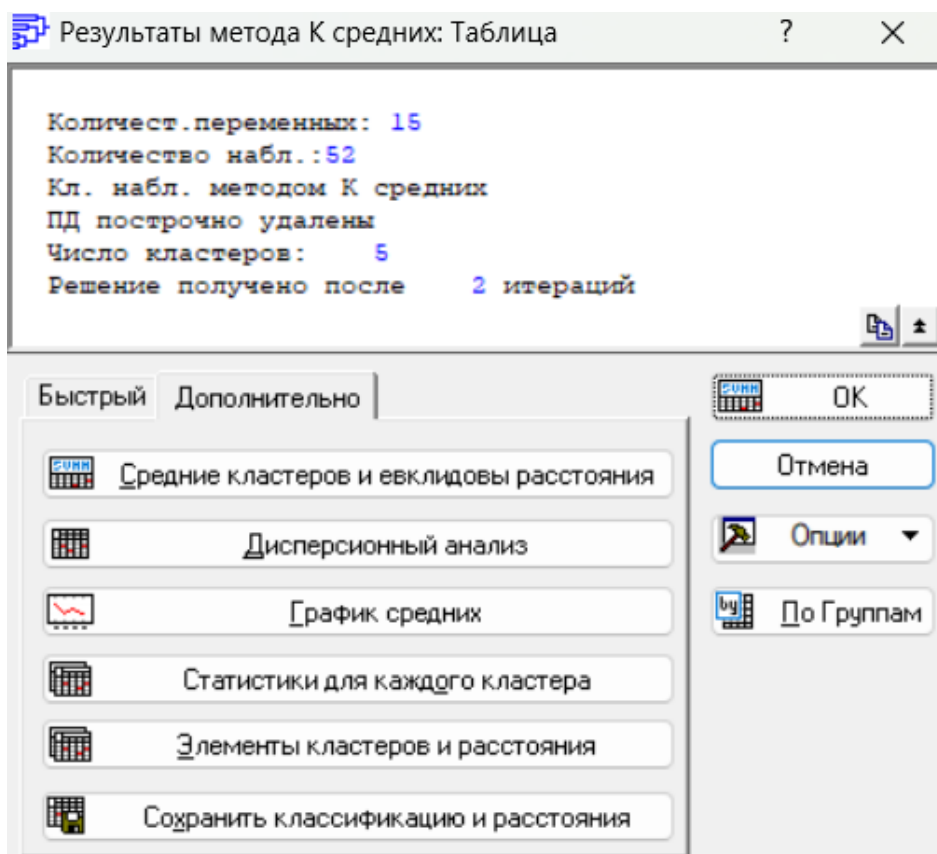


Рисунок 3.14 – Результаты метода k – средних

На рисунке 3.15 приведен график средних, полученных для пяти кластеров, внутри которых объекты сходны. Качество кластеризации выше, если средние более сильно отличаются друг от друга. В нашем случае линии средних для кластеров 1 и 4, а также 2 и 3 проходят близко друг к другу, что говорит об их несущественном отличии и о том, что число кластером можно сократить до трех. В результате нового разбиения расстояние между средними увеличилось (рисунок 3.16). Однако в областях нескольких переменных (предиктантов) расстояние между 1 и 3 остается не значительным. Малые расстояния между переменными свидетельствуют о том, что кластеры по этим переменным недостаточно различаются, т.е. данные переменные неинформативны в плане кластеризации.

Поэтому их можно удалять из анализа. Для того чтобы правильно выбрать переменные для удаления из анализа, можно воспользоваться услугами *Дисперсионного анализа*.

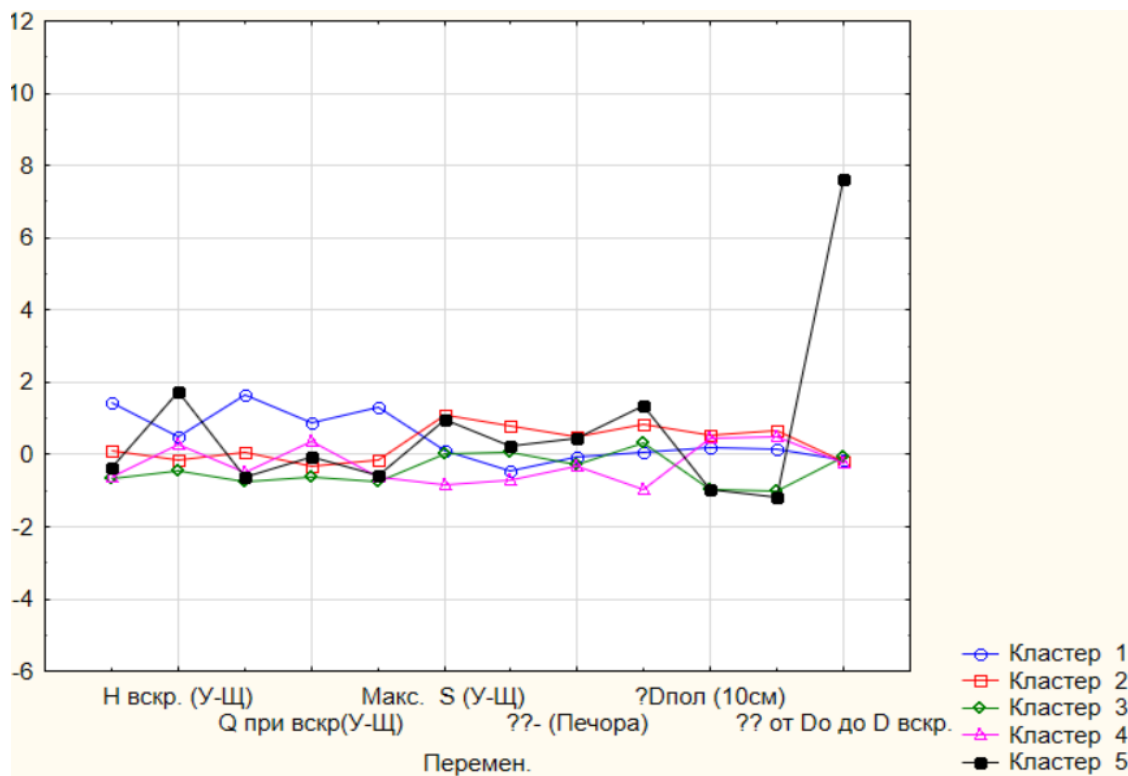


Рисунок 3.15 – График средних для каждого кластера

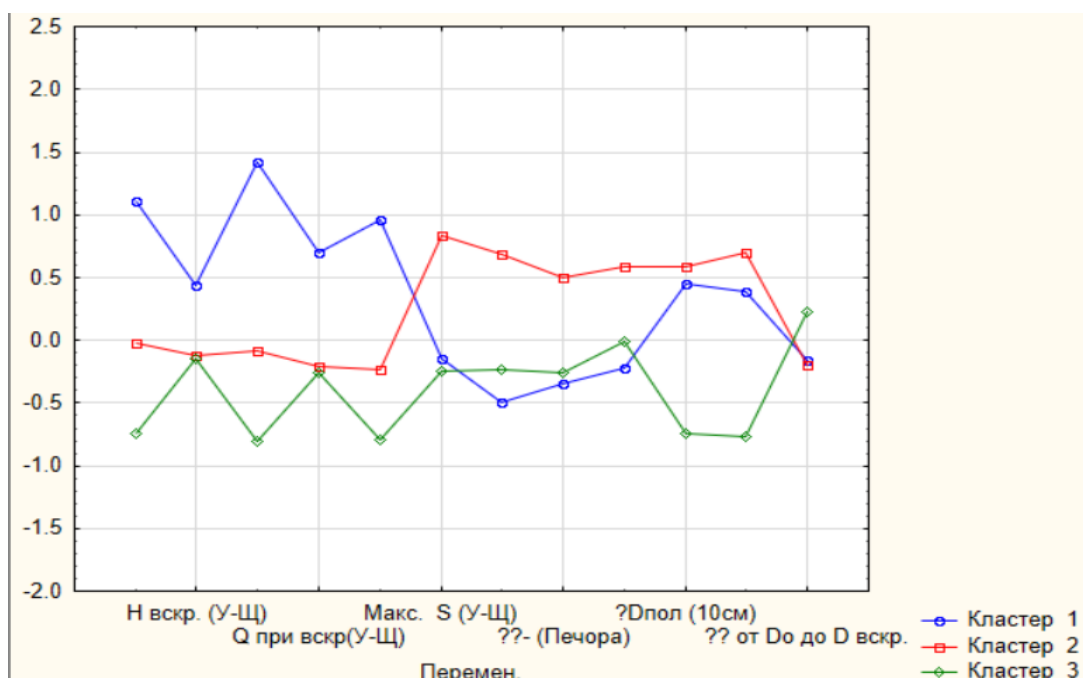


Рисунок 3.16 – График средних для трех кластеров

Результаты анализа приведены на рисунке (Рисунок 3.17), в которой по значениям межгрупповой (*Между SS*) и внутригрупповой (*Внутри SS*) дисперсий можно оценивать вклад каждого из признаков. Маленькие значения внутригрупповой и большие значения межгрупповой дисперсий свидетельствуют о большем вкладе каждого отдельного признака.

перемен.	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. p
<b>Н вскр.(У-К)</b>	<b>27.94456</b>	2	18.59221	49	36.82413	0.000000
Н вскр. (У-Щ)	3.25231	2	26.08615	49	3.05455	0.056212
Q при вскр. (У-К)	40.46804	2	16.30649	49	60.80199	0.000000
Q при вскр(У-Щ)	8.52029	2	40.47846	49	5.15699	0.009278
Q по У-Щ в день вскр. У-К	25.15914	2	13.57595	49	45.40374	0.000000
Макс. S (У-Щ)	12.53634	2	34.73259	49	8.84300	0.000526
Макс. S (Шежимдекост)	12.41612	2	38.58388	49	7.88399	0.001075
??- (Печора)	7.28246	2	36.99502	49	4.82282	0.012247
?X (Печора)	5.51008	2	41.10378	49	3.28430	0.045865
?Dпол (10см)	20.71227	2	33.14499	49	15.31002	0.000007
?Dпол (20см)	23.11755	2	28.55372	49	19.83559	0.000000
?? от До до D вскр.	2.05764	2	62.91343	49	0.80129	0.454540

Рисунок 3.17 – Результаты дисперсионного анализа

Другими параметрами, позволяющими оценить качество кластеризации являются  $F$  и  $p$ . Те предикторы, у которых значения параметра  $p$  большие (например, больше 0.05) можно исключить. Анализ данных дисперсионного анализа позволили исключить из процедуры кластеризации такие переменные, как: сумма температур от  $D_0$  до  $D_{\text{вскр}}$ , сумма осадков на метеостанции Печора, сумма отрицательных температур на метеостанции Печора, максимальные снегозапасы в Шежимдекост, максимальные снегозапасы в Усть-Щугоре, расход воды при вскрытии реки в Усть-Щугоре и уровень воды при вскрытии реки на гидрологическом посту Усть-Щугор. Результаты вновь проведенного дисперсионного анализа и оценки средних приведены на рисунках 3.18 и 3.19.

перемен.	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. p
Н вскр.(У-К)	31.36806	2	22.15439	63	44.60036	0.000000
Q при вскр. (У-К)	38.80911	2	26.19089	63	46.67604	0.000000
Q по У-Щ в день вскр. У-К	35.34503	2	17.80729	63	62.52317	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

Рисунок 3.18 – Результаты повторного дисперсионного анализа

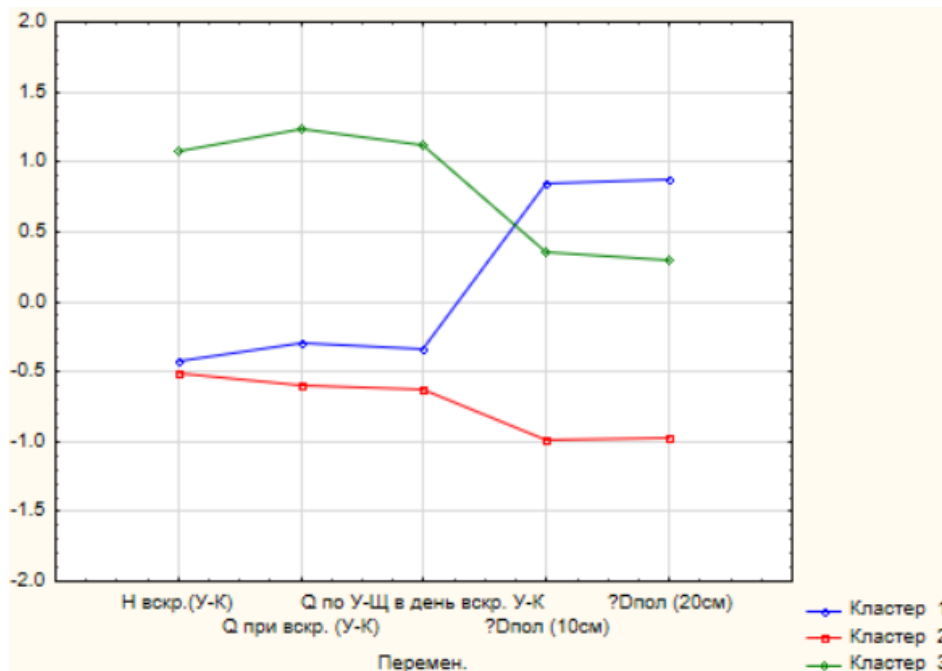


Рисунок 3.19 – График средних для трех кластеров и исключением ряда предикторов

Как видно из рисунка 3.19 такие переменные, как Дата подъема уровня воды на 10 см и на 20 см выпадают из графика средних для первого кластера и дают не



качественную кластеризацию. Поэтому мы повторяем предыдущую процедуру, исключая из анализа еще два предиктора. Вновь воспользуемся дисперсионным анализом. Как видим из таблицы на рисунке 3.20 и на рисунке 3.21, нет переменных со значением больше  $p$ , большим 0.05 и нет параметров, которые дают некачественную кластеризацию.

перемен.	Между SS	сс	Внутри SS	сс	F	значим. p
Н вскр.(У-К)	42.18299	2	11.33945	63	117.1806	0.000000
Q при вскр. (У-К)	52.75617	2	12.24383	63	135.7271	0.000000
Q по У-Щ в день вскр. У-К	37.23393	2	15.91839	63	73.6801	0.000000

Рисунок 3.20 – Результаты дисперсионного анализа

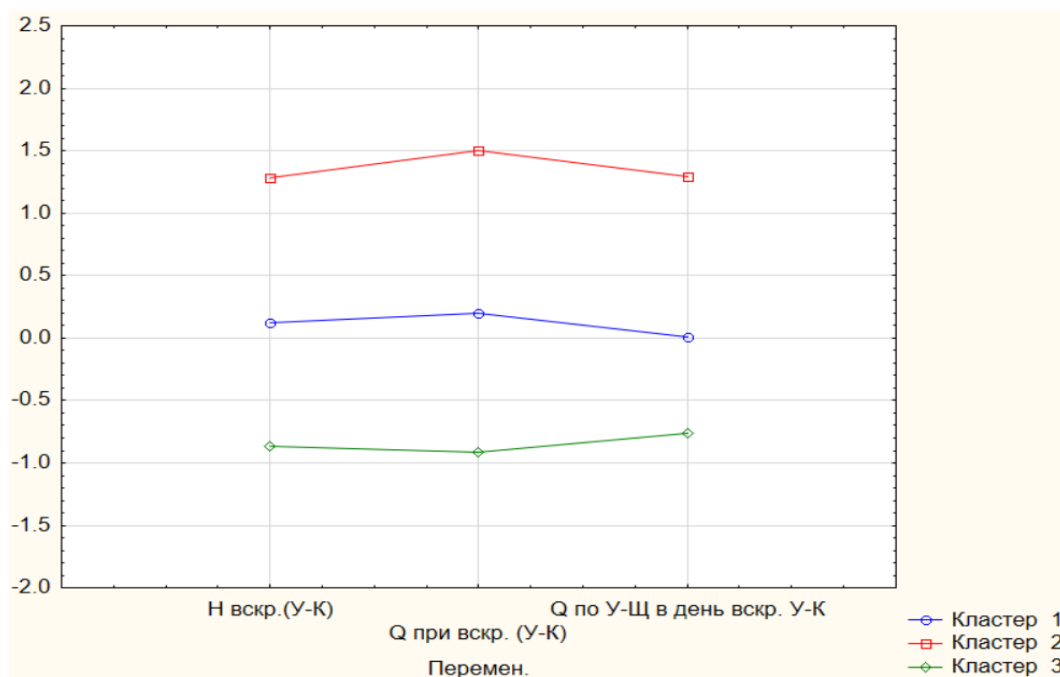


Рисунок 3.20 – Окончательный график средних для трех кластеров

В результате проведенного анализа годы с максимальными уровнями по совокупности трех факторов можно разделить на три группы однородности. Это означает, что внутри каждой группы условия формирования максимальных уровней схожи, а между группами – существенно различны. Что говорит о том, что при разработке прогностических уравнений необходимо учитывать групповую принадлежность.

### 3.4.2 Метод иерархической классификации

Еще одним методом кластерного анализа является метод *Иерархическая классификация*. В стартовом диалоге метода (рисунок 3.21), как и в предыдущем методе, указываются все переменные для анализа, а в поле *Файл данных* – необходимые исходные данные, в поле *Объекты* – Наблюдения (строки), в поле *Правило объединения* – Метод Варда и, наконец, в поле *Мера близости* – Евклидово расстояние.

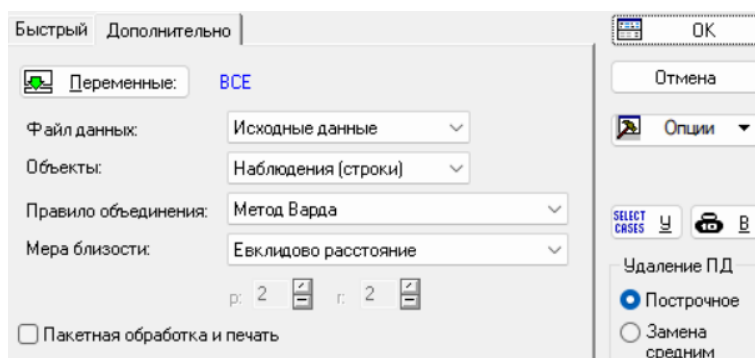


Рисунок 3.21 – Диалоговое окно метода *Иерархическая классификация*

Классификацию осуществляем так же, как и в предыдущем случае, по стандартизированным данным. В результате работы инструмента появляется окно, представленное на рисунке 3.22, позволяющее вывести на экран рисунок с изображением древовидной диаграммы.

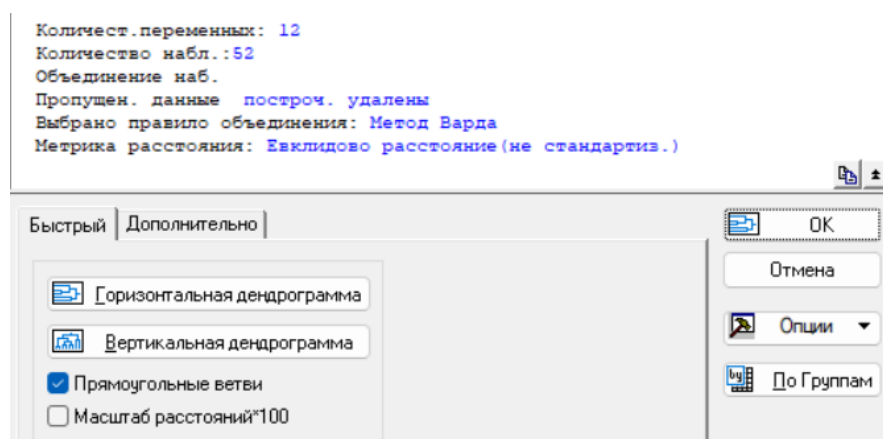


Рисунок 3.22 – Результаты иерархической классификации

Диаграмма начинается с каждого объекта (предиктора) (рисунок 3.23). В левой части вдоль вертикальной оси указаны номера объектов в исходной таблице данных. Вдоль горизонтальной оси указано расстояние между объектами, которое

является критериями объединения. По мере увеличения значения расстояния новые объекты объединяются в группы, т.е. постепенно понижается порог, относящийся к решению об объединении двух и более объектов в один кластер. В результате связывается всё большее число объектов и объединяются все больше кластеров, состоящих из все более различающихся элементов. На последнем шаге все объекты объединяются окончательно в один кластер – исходную выборку.

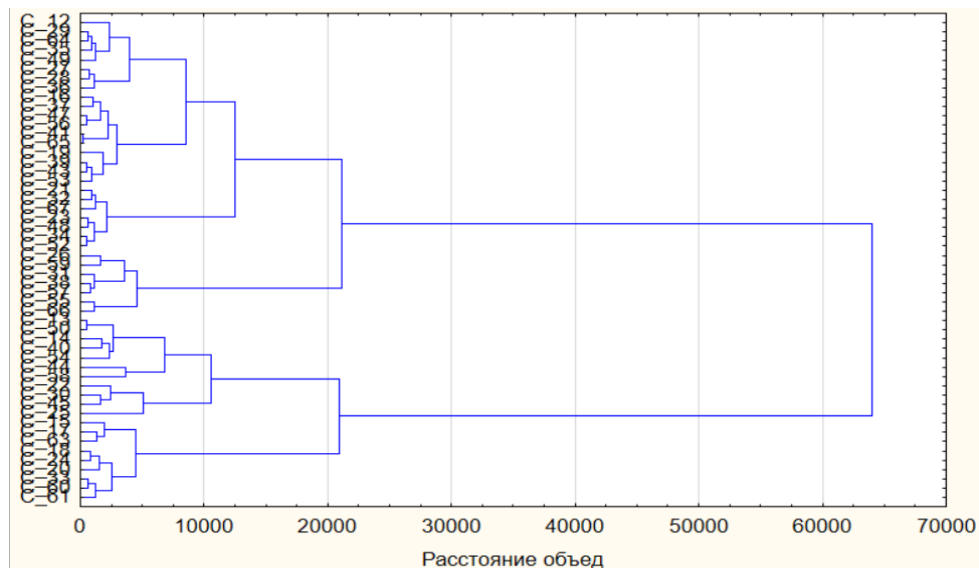


Рисунок 3.23 – Дендрограмма для 52 наблюдений (метод Варда, Евклидово расстояние)

Более подробно, с указанием расстояний, процедура объединения отображена в таблице (рисунок 3.24), которая доступна при помощи кнопки *Схема объединения*.



Если нажать на кнопку *График схемы объединения*, программа построит ступенчатую линию последовательного роста расстояния объединения – значений, приведенных в первом столбце таблицы *Схема объединения*. Вертикальная ось соответствует значениям расстояния, горизонтальная ось – шагам (итерациям) процедуры объединения.

При кластеризации методом  $k$  – средних нам удалось успешно выделить три кластера (не менее успешно можно было бы разделить наши гидрологические факторы и на два кластера). Если посмотреть внимательно на рисунок 3.23, то можно увидеть эти же кластеры на дендрограмме с небольшими изменениями в их составе.

Таким образом, иерархическая классификация, в отличие от метода  $k$  – средних, позволяет пользователю увидеть непосредственно в виде схемы весь процесс кластеризации, т.е. увидеть процедуру кластеризации поэтапно, в «интерактивном режиме» [1].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной работе разрабатывалась методика прогноза максимальных заторных уровней на реке Печора.

На первом этапе была подготовлена физико-географическая характеристика района исследования, изучены особенности ледового режима реки Печора.

На втором этапе были изучены существующие методы прогноза заторных и зажорных уровней воды на реках северных регионов. Анализ выполненных ранее разработок показал, что из-за особенностей формирования заторов на каждом конкретном участке, в настоящее время не существует единой методики прогнозирования. В основе применяемых методов чаще всего лежит статистический анализ связи прогнозируемого уровня воды от определяющих его факторов. К последним относятся как метеорологические характеристики (температура воздуха), так и гидрологические характеристики (расходы и уровни воды на исследуемом и вышележащем участках, характерные даты наступлений различных видов ледовых явлений, сведения о толщине льда и другие). Для конкретного участка водного объекта совокупность определяющих факторов может отличаться даже от набора факторов на соседнем участке.

На третьем этапе выполнения выпускной работы были изучены особенности формирования заторов на р. Печора в районе города Печора. В ходе исследования выявлены участки реки, где формируются скопления льда, вызывающие стеснение русла и приводящие к подъемам уровней воды. Анализ условий формирования максимальных заторных уровней воды на р. Печора в районе г. Печора показал, что наблюдается их неоднородность год от года: различие мест образования заторов, ледовых условий, водности реки и других факторов. Для разработки методики были собраны сведения по гидрометеорологическим характеристикам за период с 1921 по 2021 год.

На следующем этапе была изучена методика, применяемая в настоящее время в Коми ЦГМС. Методика разрабатывалась в 80-ых годах прошлого века под руководством с.н.с. Государственного гидрологического института Бузина В.А. прошлого века и нуждается в усовершенствовании. В ходе выполнения выпускной работы используемые в методике прогностические уравнения были уточнены с учетом данных последних лет. Была проведена апробация обновленной методики как на зависимом, так и независимом материале (2017 – 2021 гг.), выполнена оценка оправдываемости прогнозов и эффективности методики. Однако апробация используемой в настоящее время в Коми ЦГМС методики, усовершенствованной за счет включения данных последних лет, показала ее недостаточную эффективность. Это подтверждает тот факт, что выявленная неоднородность условий образования не позволяет разработать универсальную методику прогноза максимальных заторных уровней.

Для решения данной проблемы балы начата разработка дискретно-непрерывной модели, позволяющей разделить случаи формирования максимальных заторных уровней на классы и для каждого из них разработать свою прогностическую методику. В ходе проведенной работы был выполнен кластерный анализ, которые позволил выделить три класса случаев формирования максимальных уровней в зависимости от максимальный уровней вскрытия на посту Усть-Кожва, расходов воды при вскрытии по посту Усть-Кожва и расходов воды на посту Усть-Щугор в день вскрытия на посту Усть-Кожва.

Дальнейшие исследования будут направлены на построение многофакторных прогностических зависимостей с использованием дискриминантного анализа и с учетом принадлежности к классу.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 STATISTICA 6. Математическая статистика с элементами теории вероятностей. Учебник. – М.: Издательство Бином, 2010. – 496 с.
- 2 Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 422 с.
- 3 Борец С.В., Филатов Ю.Д. Анализ и обработка статистических данных о последствиях наводнений на реках Российской Федерации. – М.: ВНИИ ГОЧС, 1995.
- 4 Бузин В.А. Зажоры и заторы льда на реках России. – Санкт-Петербург: Гос. гидрологический ин-т, 2015. – 240 с.
- 5 Бузин В.А. Заторы и зажоры на реках России. – Труды ГГИ, 2016.
- 6 Бузин В.А. Метод прогноза максимальных уровней воды при заторах льда на средних реках. – Метеорология и гидрология, 2001, № 9. – С. 84 – 89.
- 7 Бузин В.А. Проект методических указаний по прогнозу заторов льда и заторных уровней воды. – Л.: ГГИ, 1980.
- 8 Бузин В.А. Результаты расчета параметров теоретических моделей заторов льда по данным гидрометрических наблюдений. – Труды ГГИ, 1991, вып. 354. – С. 3 – 11.
- 9 Бузин В.А. Факторы образования и прогноз заторов льда на реках севера ЕТР. – Метеорология и гидрология, 2010, № 4. – С. 63 – 74.
- 10 Бузин В.А. Факторы, определяющие максимальный заторный уровень воды. Труды ГГИ, вып. 270, 1980. – 33 с.
- 11 Бузин В.А., Банщикова Л.С. Условия формирования и прогноз наводнений на р. Лена у г. Ленск. – Сб. работ по гидрологии, 2011, №28. – С. 49 – 68.
- 12 Бузин В.А., Чачина Н.С., Шаночкин С.В. Прогнозы максимальных зажорных и заторных уровней воды рек Северной и Западной Двины. – Труды ГГИ, 1986, вып. 323. – С. 19 – 27.



- 13 Бузин В.А., Шаночкин С.В. О возможности применения метода соответственных уровней воды для прогноза заторных максимумов на реке Лена. – Труды ГГИ, 1982, вып. 287. – С. 94 – 97.
- 14 Бузин В.А., Шаночкин С.В. Прогнозы максимальных заторных уровней воды рек Амура и Уссури. – Труды ГГИ, 1985, вып. 309. - С. 44 – 52.
- 15 Булатов С.Н. Расчет прочности тающего ледяного покрова и начала ветрового дрейфа льда. – Труды ГМЦ, 1970, вып 74. – 118 с.
- 16 Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. Учебник. – СПб., изд. РГГМУ, 2007. – 436 с.
- 17 Головина А.П., Головин В.С. Прогнозирование заторных явлений на приустьевых участках Лены и Яны. – Труды ААНИИ, 1974, т. 308, с. 143- 172.
- 18 Деев Ю.А., Попов А.Ф. Весенние заторы льда в русловых потоках. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 110 с.
- 19 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.
- 20 Карнович В.Н., Куколевский Г.А., Кулешова Т.В. Прогнозирование максимальных заторных уровней на участке береговых складов древесины в нижнем течении Ангары. – Сб.: Ледотермические явления и их учет при 181 возведении и эксплуатации гидроузлов и гидротехнических сооружений. – Л.: Энергия, 1979. – С. 150 – 155.
- 21 Карнович В.Н., Кулешова Т.В. Прогноз максимальных уровней воды при заторах льда на Северной Двине. – Метеорология и гидрология, 1984, № 12. – С. 111 – 113.
- 22 Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. I, Европейская часть СССР. – Л. Гидрометеиздат, 1976. – 548 с.
- 23 Каталог основных понятий РСЧС в ЧС. ГКЧС РФ. – М.:1993. – 76 с.
- 24 Кильмянинов В.В. Анализ условий формирования и долгосрочный прогноз заторных уровней на Лене. – Метеорология и гидрология, 1992, № 4. – С. 82 – 89.

- 25 Лисер И.Я. О зависимостях для прогноза максимальных заторных (ледоходных) уровней воды при вскрытии сибирских рек. – Метеорология и гидрология, 1981, № 11. – С. 83 – 87.
- 26 Лисер И.Я. О закономерностях весеннего заторообразования на участках выклинивания водохранилищ. – Труды коорд. совещаний по гидротехнике, 1968, вып. 42. – С. 237 –246.
- 27 Лупачев Ю.В. Особенности динамики весенних ледоходов и заторов льда в устьях Северной Двины и Печоры. Водные ресурсы, 2001. – С. 63 – 70.
- 28 Нежиховский Р.А., Бузин В.А. Условия образования и прогнозы заторов льда на реках. – Метеорология и гидрология, 1977, № 5. – С. 70 – 75.
- 29 Нежиховский Р.А., Некипелов Л.К., Ардашева Г.В. Прогноз максимального заторного уровня р. Великой у г. Пскова. Труды ГГИ, вып.193, 1971.
- 30 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.
- 31 Нежиховский Р.А., Саковская Н.П. Прогнозы максимальных заторных уровней воды рек Северной Двины и Немана. – Труды ГГИ, 1975, вып. 227. – С. 70 – 86.
- 32 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.
- 33 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>
- 34 Попов В.П. Исследование заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания. – Изд. Сев. упр. Госкомгидромета, Архангельск, 1980. – 122 с.
- 35 СНиП 2.01.15-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой СССР, 1983.

- 36 Справочник по опасным природным явлениям в республике, краях и областях Российской Федерации. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 1996. – 980 с.
- 37 Филатов Ю.А., Юзбеков Ю.Д. Анализ и обработка статистических данных о последствиях наводнений на реках Российской Федерации. – М.: ВНИИ ГОЧС, 1995.
- 38 Шахраманьян М.А., Векслер А.Б., Пчелкин В.И., Трегуб Г.Б., Дебольский В.К., Карнович В.Н., Козлов Д.В., Косырев А.А., Матвеев В.И., Нигметов Г.М., Пчелкин В.И., Самойлов Р.С., Сосунов И.В., Терехов А.В., Трегуб Г.А., Филатов Ю.А., Шаталина И.Н., Шахраманьян М.А., Шванштейн А.М. Методические рекомендации по предотвращению образования ледовых заторов и зажоров на реках Российской Федерации и борьбе с ними. – М.: ВНИИ ГОЧС, 2004. – 234 с.
- 39 Шуляковский Л.Г. О заторах льда и заторных уровнях воды при вскрытии рек. – Метеорология и гидрология, 1951, № 7. – С. 45 – 49.
- 40 Шуляковский Л.Г., Еремина В.И. К методике прогноза заторных уровней воды. – Метеорология и гидрология, 1952, № 1. – С. 46 – 51.

Приложение А. Исходные гидрометеорологические данные для разработки методики прогноза

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

Годы	$H$ макс. уст. лдет.	$H$ в первый день лдет.	$H$ <sub>макс.</sub> лдет.	Дата подвиж.	$H$ подвиж.	$H$ <sub>вскрытия</sub>	Дата вскры- тия	$H$ <sub>макс.лдх</sub>	Дата $H$ макс.лдх.	$H$ <sub>макс.срочные</sub> при заторе	$Q$ при вскр.	Макс. сне- гозапасы (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. лдет.	$H$ в первый день лдет.	$H$ макс. лдет.	Дата подвиж.	$H$ подвиж.	$H$ вскрытия	Дата вскры- тия	$H$ макс.лдх	Дата $H$ макс.лдх.	$H$ макс.срочные при заторе	$Q$ при вскр.	Макс. сне- гозапасы (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 вскры- тия	$H$ макс.лдх	Дата $H$ макс.лдх.	$H$ макс.срочные при заторе	$Q$ при вскр.	Макс. сне- гозапасы (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. лדת.	$H$ в первый день лדת.	$H$ макс. лדת.	Дата ПОДВИЖ.	$H$ подвиж.	$H$ вскрытия	Дата вскры- тия	$H$ макс.лדת	Дата $H$ макс.лדת.	$H$ макс.срочные при заторе	$Q$ при вскр.	Макс. сне- гозапасы (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.	$H$ <sub>вскрытия</sub>	Дата вскры- тия	$H$ <sub>макс.лдх</sub>	Дата $H$ макс.лдх.	$H$ <sub>макс.срочные</sub> при заторе	$Q$ при вскр.	Макс. сне- гозапасы (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. лдст.	$H$ в первый день лдст.	$H$ макс. лдст.	Дата подвиж.	$H$ подвиж.	$H$ вскрытия	Дата вскрытия	$H$ $H_{\text{макс.лдх}}$	Дата $H$ макс.лдх.	$H$ макс.срочные при заторе	$Q$ при вскр.	Макс. сне- гозапасы (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

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

Годы	$H_{\text{макс. уст.лде}}$	$H$ в первый день лдет.	$H_{\text{макс. лдет.}}$	Дата по-ДВИЖКИ	$H_{\text{подвиж.}}$	$H_{\text{вскры- тие}}$	Дата вскры- тия	$H_{\text{макс.лдх.}}$	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. сне- гозапасы ( $S$ )
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 лдет.	$H_{\text{макс. лдет.}}$	Дата по- движки	$H_{\text{подвиж.}}$	$H_{\text{вскрытие}}$	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. сне- гозапасы ( $S$ )
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	$H_{\text{макс. уст.лде}}$	$H$ в первый день лдст.	$H_{\text{макс. лдст.}}$	Дата по- движки	$H_{\text{подвиж.}}$	$H_{\text{вскрытие}}$	Дата вскрытия	$H_{\text{макс.лдж.}}$	Дата $H_{\text{макс.лдж.}}$	$H_{\text{макс.срочные}}$ при заторе	$Q$ при вскр	$Q_{\text{по У-}}$ Щ в день вскр. У-,К	Макс. снего- запасы ( $S$ )
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	$H_{\text{макс. уст.лдс}}$	$H$ в первый день лдст.	$H_{\text{макс. лдст.}}$	Дата по- движки	$H_{\text{подвиж.}}$	$H_{\text{вскрытие}}$	Дата вскры- тия	$H_{\text{макс.лдх.}}$	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. сне- гозапасы ( $S$ )
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	$H_{\text{макс. уст.лдс}}$	$H$ в первый день лдст.	$H_{\text{макс. лдст.}}$	Дата по- движки	$H_{\text{подвиж.}}$	$H_{\text{вскрытие}}$	Дата вскры- тия	$H_{\text{макс.лдх.}}$	Дата $H_{\text{макс.лдх.}}$	$H_{\text{макс.срочные}}$ при заторе	$Q$ при вскр	$Q$ по У- Щ в день вскр. У-,К	Макс. сне- гозапасы ( $S$ )
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

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	$N_{\text{мах лдх. У.-К. факт.}}$	$Q_{\text{У.-Щ. в день вскр. У.-К.}}$	$N_{\text{мах лдх. У.-К. прогн.}}$		Ошибка прогноза		Оправдываемость	
			эсп. завис.	степ. завис.	эсп. завис.	степ. завис.	эсп. 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	
			эсп. завис.	степ. завис.	эсп. завис.	степ. завис.	эсп. 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	
			эсп. завис.	степ. завис.	эсп. завис.	степ. завис.	эсп. 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	+	+