



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

Кафедра инженерной гидрологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

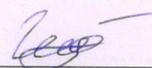
На тему **Оценка изменчивости**  
**минимального стока рек**  
**Камчатки**

Исполнитель Рогожина Яна Александровна  
(фамилия, имя, отчество)

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

Викторова Наталья Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

  
\*(подпись)

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

Гайдукова Екатерина Владимировна  
(фамилия, имя, отчество)

«02» июня 2025 г.

Санкт-Петербург  
2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 3  |
| 1 Обзор основных методов и результатов в области исследования<br>минимального речного стока .....                   | 6  |
| 1.1 Термины и определения .....   | 6  |
| 1.2 Особенности формирования минимального стока .....   | 8  |
| 1.3 Исследования минимального стока и процессов его формирования .....  | 9  |
| 1.4 Современное состояние проблемы расчетов минимального стока .....  | 13 |
| 1.5 Особенности статистического анализа минимального стока.....   | 14 |
| 1.6 Методы расчета минимального стока.....  | 17 |
| 2 Региональные исследования закономерностей колебаний<br>минимального стока.....                                    | 24 |
| 2.1 Физико-географические характеристики и гидрологические<br>особенности Камчатки.....                             | 24 |
| 2.2 Физико-географические характеристики бассейна р. Быстрой .....  | 27 |
| 2.3 Физико-географические характеристики бассейна р. Авачи .....  | 29 |
| 2.4 Вероятностные закономерности минимального стока на примере<br>некоторых рек Камчатки .....                      | 31 |
| 2.5 Региональный подход к оценке распределения вероятностей<br>продолжительностей маловодных периодов.....          | 46 |
| 2.6 Расчет вероятных изменений характеристик гидрологического режима<br>водных объектов в бассейне р. Камчатки..... | 52 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 60 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 62 |

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ последних десятилетий, опирающийся на современные данные гидрометеорологического наблюдения, неоспоримо свидетельствует о том, что климатические изменения оказывают значительное влияние на гидрологический режим рек в различных крупных регионах. Учитывая уже наблюдаемый рост температур и высокую вероятность его продолжения, становится крайне важной задача оценки изменений речного стока. Это необходимо для обеспечения потребностей водохозяйственного и гидротехнического планирования, требующего точного определения параметров, характеризующих режим речного стока. В связи с этим, особое внимание уделяется вычислению сезонного и минимального стока.

Влияние водопользования на окружающую среду достигло критических масштабов, что приводит к тому, что экологические требования, необходимые для сохранения водной среды, и даже возможность использования водных ресурсов, становятся фактором, ограничивающим социально-экономическое развитие. Растущий спрос на воду, неравномерное распределение водных ресурсов в пространстве и времени, а также слабо контролируемое загрязнение, требуют более тщательного анализа стока в критические периоды и сезоны.

Создание методов количественного описания минимального стока всегда было важной задачей для гидрологов. Однако, вопрос о существовании универсальной «теоретической» модели, которая наилучшим образом описывает данные о минимальном стоке, остается нерешенным. Произошедшие гидрометеорологические изменения и высокая вероятность их дальнейшего развития в будущем требуют пересмотра подходов к определению параметров водохозяйственных систем и правил их использования.

Растущие темпы глобального потепления ставят под сомнение концепцию стабильности многолетних колебаний гидрометеорологических параметров, и в настоящее время использование теоретических кривых распределения

не позволяет достичь адекватного соответствия между теоретическими и наблюдаемыми распределениями. В связи с этим, расчет минимального стока в условиях уже произошедших и прогнозируемых климатических изменений становится одной из самых актуальных задач в инженерной гидрологии.

Объектом исследования настоящей работы гидрологический режим рек.

Предметом исследования выступает оценка изменчивости минимального стока рек некоторых рек Камчатки.

Целью данной работы является изучение характера многолетних колебаний минимального стока и применение новых методов (подходов) к его расчету. В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

- изучить особенности формирования минимального стока;
- провести исследование минимального стока и процессов его формирования;
- рассмотреть современное состояние проблемы расчетов минимального стока;
- выявить особенности статистического анализа минимального стока;
- показать методы расчета минимального стока;
- исследовать физико-географические характеристики и гидрологические особенности Камчатки и некоторых рек региона;
- определить вероятностные закономерности минимального стока на примере некоторых рек Камчатки;
- представить региональный подход к оценке распределения вероятностей продолжительностей маловодных периодов;
- провести расчет вероятных изменений характеристик гидрологического режима водных объектов в бассейне р. Камчатки.

Предметом анализа являлись речные системы Камчатского региона, в частности реки Авача, Быстрая, Камчатка, а также притоки, составляющие речную систему Камчатки. В процессе работы применялись многолетние сведения, полученные в результате мониторинга минимального среднемесячного

тридцатидневного стока. Методологической основой исследования послужили вероятностно-статистические методы анализа многолетних колебаний стока. Для анализа данных применялись программные средства «Excel» и «Statistica».

Ценность данной работы для практического применения состоит в проведении локального исследования изменений характеристик минимального стока. Применение полученных выводов будет способствовать повышению точности гидрологических расчетов минимального стока.

# 1 Обзор основных методов и результатов в области исследования минимального речного стока

## 1.1 Термины и определения

Прежде чем углубиться в изучение процессов формирования наименьшего речного стока и разработку методов его вычисления, логично рассмотреть ключевые понятия и определения, используемые для его описания, а именно термины: «межень» и «минимальный сток».

В гидрологии под меженью понимают фазу водного режима, которая характеризуется низкими уровнями воды и стабильными, незначительными значениями расходов воды.

Меженный сток – это речной сток, наблюдаемый в периоды малого количества воды, когда отсутствуют значительные дождевые или снеговые паводки. В этот период выделяется временной отрезок с наименьшими значениями стока, который и представляет собой минимальный сток. Этот период, длящийся от одного до тридцати дней, называется периодом минимального стока. Поскольку факторы, определяющие величину минимального стока, различны в разные сезоны, их анализ проводится отдельно. Продолжительность этого периода определяется устойчивостью межени. В зимний период она зависит от продолжительности и стабильности периода низких температур. В летне-осенний период – от объема и интенсивности осадков, вызывающих подъем уровня воды [14].

Для гидрологических расчетов, согласно установленным нормам, основными расчетными параметрами являются:

- средний многолетний расход воды (нормативное значение);
- средний расход воды в период межени;
- 30-дневный расход воды, вычисляемый как среднее значение за 30 дней внутри летне-осенней или зимней межени с самым низким уровнем

стока; минимальный суточный расход воды и меженные (минимальные) расходы заданной вероятности превышения (75%, 90%, 95%, 97%, 99%).

А.М. Владимиров предлагал использовать эти характеристики для анализа этапов годового цикла и для получения расчетных параметров. «Меженный» и «минимальный» сток отражают период низкого уровня воды в течение года [11].

Для эффективного управления водными ресурсами в хозяйственной деятельности необходимо определить объемы лимитирующего стока, то есть количество воды, доступное в периоды наименьшей водности. В северных регионах России это зимний период, а в южных и западных – летне-осенний. Важно различать понятия "маловодный период" и "маловодный цикл", последний из которых используется для оценки многолетних колебаний речного стока. Таким образом, маловодье можно рассматривать как сезонный или многолетний дефицит воды [26].

Анализ подходов к изучению минимального стока в других странах затруднен из-за отсутствия единых методов его определения и анализа. Это касается и самого понятия «межень». Существует более полутора сотен различных интерпретаций этого термина. На данный момент исследователи пришли к общему мнению только в отношении общего определения: межень – это уменьшение объема воды на определенной территории в определенный момент времени.

В соответствии с международным гидрологическим словарем, "низкий сток" – это объем воды, перемещаемый рекой в течение продолжительного периода отсутствия дождей. Это определение, однако, не предлагает четкого разделения между сезонным снижением водности и засухой. В то время как низкий сток представляет собой регулярное сезонное явление и неотъемлемую часть режима реки, засуха – это природное бедствие, вызванное недостатком осадков. Период засухи включает в себя время низкого стока, но длительная межень не всегда является результатом малого количества осадков.

Помимо термина «низкий сток», за рубежом используется понятие «базисный сток», обозначающее генетически обусловленную составляющую стока, формируемую за счет подземного питания.

Во время низкой водности рек преобладающую роль в формировании стока играют подземные воды, тогда как в периоды высокой водности доминируют базисный и «быстрый» сток. Базисный сток эквивалентен подземному стоку. Понятие «низкий сток» объединяет в себе «меженный» и «минимальный» сток. Для расчетов часто используют индекс низкого стока, представляющий собой минимальный среднесуточный расход воды за определенное количество дней, рассчитанный для каждого года отдельно.

Прежде чем приступить к изучению характеристик меженного стока, зарубежные специалисты в области гидрологии рекомендуют проводить разделение на летнюю и зимнюю межень.

## 1.2 Особенности формирования минимального стока

Режим речного потока и объемы воды, наблюдаемые в периоды обмеления, определяются комплексом взаимосвязанных факторов. Ведущую роль в этом играют атмосферные условия. А.М. Комлев разделяет их на две категории: климатические и метеорологические [31].

Особенности рельефа местности оказывают непосредственное влияние на характер водного потока. При изучении параметров стока земли влияние характеристик водосборных площадей становится особенно заметным.

По классификации А.М. Владимирова, факторы, определяющие формирование минимального стока, могут быть систематизированы в три основные группы.

Первая группа объединяет факторы, непосредственно формирующие сток, такие как осадки и поступление грунтовых вод.

Вторая группа включает косвенные факторы, а именно гидрогеологическое строение водосборных бассейнов и особенности рельефа.

Третья группа представлена азональными характеристиками водосборной территории [11].

Необходимо также учитывать влияние деятельности человека на величину минимального водного стока.

Колебания минимального речного стока объясняются изменениями климатических условий, в частности, температурных показателей, влажности и испаряемости. На изменения зимнего стока влияют погодные условия, оцениваемые суммой выпавших осадков и суммой отрицательных температур.

Влияние температуры на колебания минимального стока зимой также проявляется через изменение продолжительности зимнего периода.

В отличие от зимнего стока, летний и осенний сток формируются также за счет дождевых осадков, выпадающих в эти сезоны.

Распределение коэффициентов вариации минимального зимнего расхода воды отражает географическую зональность, то есть общую степень увлажнения местности.

Уровень увлажнения в предшествующий период указывает на запасы воды, которые сложно оценить. Ранее, для большей части территории России, зимы отличались устойчивыми низкими температурами, что приводило к меньшей изменчивости минимального зимнего стока.

Для характеристики периодов маловодья важны такие параметры, как длительность и стабильность меженного периода. Климатические условия определяют продолжительность и устойчивость межени. В зимний период для стока существенна продолжительность периода с устойчивыми морозами. Летом и осенью важны объем и интенсивность выпавших осадков.

### 1.3 Исследования минимального стока и процессов его формирования

Исследование сезонного распределения речного стока на территории Советского Союза началось в последние годы 30-х и в 40-е годы XX века. Первоначальные работы фокусировались на реках, расположенных в Европейской части страны. Важно отметить, что границы сезонов определялись унифицированно для всей исследуемой территории.

Экономический рост послужил стимулом для исследований, направленных на изучение проблем, связанных с минимальным стоком рек. Более глубокое понимание процессов формирования меженного стока привело к интеграции гидрологических и гидрогеологических подходов к оценке водных ресурсов.

Д.И. Кочерин занимался изучением закономерностей, определяющих распределение минимальных значений годового стока.

Позднее, П.Д. Ордодворец провел анализ данных о минимальном стоке рек, расположенных в Азиатской части Советского Союза.

Параллельно с формированием кадастров в конце 30-х годов был предложен аналитический подход к исследованию минимального стока, основанный на выявлении корреляций между минимальным расходом воды и другими факторами. В дальнейшем исследования развивались благодаря объединению этих двух подходов. В.А. Урываев создал карту изолиний минимальных годовых среднесуточных значений и предложил формулу для учета влияния озер на речной сток. В.Г. Андреев внес значительный вклад в разработку зависимостей для расчета минимального стока, предложив формулы для определения минимальных среднесуточных модулей стока отдельно для зимнего и летнего периодов. Он также предложил косвенный метод расчета параметров ( $C_s$  и  $C_v$ ) рядов минимального стока.

Анализ распределения воды в течение года включал изучение сезонного стока, требующее точного определения дат начала и окончания каждого сезона. Введение фиксированных дат было продиктовано практическими потребностями. Однако, подобное упрощение создавало сложности для исследований из-за различной природы сезонного стока в разных регионах. Помимо

этого, В.Г. Андреев активно участвовал в разработке методов расчета сезонного стока, учитывая, что продолжительность сезонов варьируется в зависимости от климатических особенностей региона.

Работы В.Г. Андреева стали основой для дальнейшего изучения распределения сезонного стока по различным регионам. М.П. Колпачева разработала метод прогнозирования вероятностного сезонного стока. И.М. Лившиц исследовал пространственное распределение сезонного стока, а И.Н. Стеженская изучала зональные особенности речного стока. А.М. Комлев анализировал характеристики зимнего стока рек.

Несовершенства существовавших способов оценки минимального речного стока подтолкнули к поиску новых подходов. Желание более точно вычислять этот параметр привело к формированию комплексного гидрологического подхода. Например, А.М. Норватов предложил схему разделения территории на районы по характеристикам минимального стока, основываясь на карте распространения подземных вод [43]. Он акцентировал внимание на важности гидрогеологических факторов в формировании этого стока. Однако, практическое применение его разработки оказалось сложным из-за трудности учета индивидуальных особенностей каждого водосборного бассейна [7].

Н.П. Чеботарев попытался провести генетический анализ процесса формирования минимального стока, используя теорию изохрон [66]. Тем не менее, определение необходимых для анализа параметров не давало существенного прироста точности по сравнению с непосредственным определением модуля стока через корреляционные зависимости. А.Г. Курдов использовал эту схему для создания расчетных формул минимальных расходов воды в реках [39]. Чтобы получить адекватные результаты, он был вынужден прибегнуть к эмпирическим зависимостям. Работы Б.В. Полякова были посвящены выявлению причин внутризональных отклонений, учету местных особенностей и разработке метода оценки минимального расхода воды. Изучая территории со

сложными гидрогеологическими условиями, он заключил, что метод географической интерполяции неприменим для описания закономерностей распределения минимального стока [48].

Существенный вклад в изучение маловодного стока внес А.М. Владимиров, впервые комплексно проанализировав вопросы оценки временных, количественных и качественных характеристик минимального стока [11]. В начале шестидесятых годов он сформулировал принципы выделения межениных периодов на гидрографах. В его работах представлен анализ формирования стока в период маловодья, предложена классификация факторов, влияющих на сток, и разработаны способы определения расчетных характеристик речного стока.

В дальнейшем методы расчета были улучшены. Особое значение приобрел метод переходных коэффициентов. В восьмидесятые годы были сформулированы основные принципы, описывающие закономерности формирования межениного стока в разные сезоны года.

Современный этап развития гидрологии начался в конце 1960-х годов, когда в связи с ростом потребления воды стала очевидной проблема истощения водных ресурсов. В приоритет вышло использование статистических обобщений и метода гидрологической аналогии. Значительную роль в развитии этого направления сыграли исследования С.Н. Крицкого [35]. В этих исследованиях применялись методы теории случайных процессов.

В академических кругах до сих пор сохраняются неразрешенные противоречия относительно дефиниций «минимальный сток» и «межень». Б.В. Поляков определял межень как речной сток, не подверженный влиянию паводков [48]. С.В. Дерибизова рассматривала ее как объем воды, наблюдаемый в периоды летней засухи и зимнего маловодья, подпитываемый подземными источниками [18]. Д.Л. Соколовский утверждал, что минимальный сток фиксируется, когда реки переходят исключительно на подпочвенное питание [57].

В.А. Урываев применял "средние многолетние показатели наименьшего годового стока" в качестве определяющего параметра [62]. Л.Н. Попов при создании картографических изображений изолиний минимального летнего и

зимнего стока опирался на среднестатистический многолетний месячный модуль стока [49]. В.Г. Андреев приравнивал средние месячные минимальные значения к величине зимнего суточного минимума [4]. Б.В. Поляков считал зимний суточный минимум определяющим для всей исследуемой территории [48]. Следовательно, отсутствие четкой терминологии приводит к смешению различных по своей природе характеристик минимального стока.

#### 1.4 Современное состояние проблемы расчетов минимального стока

В последние десятилетия вопросы изучения минимального речного стока приобрели особую актуальность. Это связано с исследовательскими данными, свидетельствующими об изменениях в гидрологическом режиме рек, особенно в периоды их наименьшей водности. И.А. Шикломанов, анализируя динамику речного стока в европейской части континента, заключает, что увеличение стока в меженный период является следствием реакции речных бассейнов на наблюдаемое повышение температуры [69].

Автор полагает, что особого внимания заслуживает географическое распределение данного явления: в южной части Восточно-Европейской равнины его можно рассматривать как элемент многолетних колебаний речного стока.

Научное сообщество в целом согласно с климатической природой этих изменений, связывая увеличение меженного стока с ростом запасов подземных вод. Эти утверждения подкрепляются исследованиями И.С. Зекцера, который указывает на взаимосвязь между характерным перераспределением стока в течение года, увеличением меженного стока и усилением питания подземных вод, а также подъемом их уровня [26].

Следует подчеркнуть, что начиная со второй половины 1970-х годов на территории России преобладают положительные температурные аномалии. Согласно информации об изменениях отклонений температуры воздуха в период с 1976 по 2006 год, общее потепление по России составило приблизительно 1.4°C.

М.Л. Марков связывает увеличение зимнего стока не столько с увеличением естественных запасов подземных вод, сколько с возрастанием дренирующей способности рек в зимний период [42]. К аналогичным выводам для рек бассейна реки Алдан приходит Е.В. Гуревич [17].

Основной проблемой в современных методах расчета минимального стока остается недостаточная точность получаемых результатов. Это объясняется ограниченным объемом информации, полученной на гидрологических постах. Кроме того, сложность представляет собой неустраняемая генетическая неоднородность рядов минимального стока. В гидрологических расчетах применяются ряды различной протяженности без достаточного обоснования выбора репрезентативного периода, а анализ таких характеристик, как стационарность, однородность и автокорреляция, проводится редко.

Нередко встречаются разногласия относительно причин нестабильности и усиленной автокорреляции в минимальных стоковых рядах. Проблема выбора теоретической функции распределения для адекватного моделирования эмпирических кривых распределения вероятностей требует дальнейшего изучения.

В гидрологии одной из задач является разработка методик для оценки параметров минимального стока в условиях различной степени обеспеченности исходными данными. Решение данной задачи требует анализа статистической структуры рядов с оценкой генетической однородности первичных данных.

### 1.5 Особенности статистического анализа минимального стока

При использовании вероятностных методов для изучения многолетних данных минимального речного стока необходимо учитывать его уникальные характеристики изменчивости. Стохастическая природа минимального стока обусловлена совокупным действием разнообразных факторов, что отражает

общую случайность гидрологических явлений. Несмотря на кажущуюся непредсказуемость колебаний стока, в них прослеживаются выраженные динамические составляющие, которые обычно интерпретируются как временная зависимость стока (например, сезонные изменения и долгосрочные тенденции различной водности). Исследования демонстрируют, что колебания стока характеризуются цикличностью с разной длиной циклов и различным влиянием на общую дисперсию ряда, при этом данные параметры могут существенно различаться в зависимости от географического региона. Для адекватного понимания этой структуры требуется более продвинутый математический инструментарий, нежели простая теория одномерных распределений случайных величин [16, 20, 29].

Важно интерпретировать временной ряд гидрологических параметров не как изолированный набор случайных значений, а как результат случайного процесса. Анализ должен быть нацелен на идентификацию долговременных трендов в динамике стока, определение и смену фаз различной водности, и оценку их продолжительности. Однако, поскольку доступные данные представляют собой лишь одну из возможных реализаций случайного процесса, гидрологи вынуждены опираться на определенные допущения относительно его свойств, таких как стационарность и эргодичность. Эти допущения формулируются в виде проверяемых гипотез. Как правило, стационарный процесс с единственной точкой равновесия, вокруг которой происходят флуктуации, считается эргодичным. Если же стационарный процесс характеризуется множественными состояниями равновесия, возникающими под влиянием внешних факторов, то он теряет свойство эргодичности. К подобным процессам относится речной сток и другие гидрометеорологические явления. В гидрологии часто неоправданно предполагается эргодичность речного стока, упрощая его до стационарного процесса с одним устойчивым состоянием равновесия, вокруг которого наблюдаются случайные отклонения. Подобное упрощение игнорирует цикличность гидрологических процессов и приводит к тому, что периоды различной водности ошибочно трактуются как редкие события, что, в

свою очередь, влечет за собой неточности в водохозяйственных расчетах. Для решения этой проблемы предлагается либо отказаться от допущения об эргодичности, либо рассматривать сток как стационарный процесс с несколькими равновесными состояниями. В этой связи представляет интерес гипотеза, предложенная А.В. Добровольским [20].

Предложенная теоретическая база предполагает рассмотрение гидрометеорологических явлений как процессов, характеристики которых меняются относительно медленно. В рамках данной концепции, исследуемый процесс допускает разделение на отдельные временные интервалы, каждый из которых можно представить как реализацию стационарного случайного процесса.

Важнейшей задачей представляется анализ цикличности данных с целью отделения случайных флуктуаций от закономерных изменений. Неслучайные вариации в речном стоке могут быть обусловлены:

- устойчивыми изменениями среднего значения;
- аперiodическими (циклическими) колебаниями;
- сезонными изменениями.

Определение устойчивых изменений критически важно при изучении многолетних колебаний стока, и для этого используются общепринятые критерии значимости и достоверности тренда. Возникновение циклов может объясняться двумя причинами: во-первых, цикличность присуща любым случайным последовательностям, особенно тем, где наблюдается взаимосвязь между значениями, что создает видимость повторяемости; во-вторых, цикличность может быть индикатором нестационарности процесса, вызванной внешними факторами.

Если единственной причиной взаимосвязей является внутренняя корреляция (отражающая инерционность формирования стока), то изменения стока можно трактовать как случайные, основываясь на допущении о стационарности. Признание влияния внешних факторов на цикличность влечет за собой признание нестационарности процесса, что усложняет расчеты из-за недостаточной изученности закономерностей крупномасштабных колебаний.

Несмотря на значительный объем исследований, причины корреляции в многолетних колебаниях стока изучены не до конца. Остается открытым вопрос о том, является ли формирование периодов с разной водностью следствием этой корреляции или проявлением нестационарности многолетних колебаний стока. В настоящее время специалисты в области гидрологии чаще используют модели стационарных случайных процессов, так как они более просты в применении по сравнению с нестационарными моделями.

В связи с этим, в настоящее время считается необходимым начинать статистический анализ с оценки рядов наблюдений минимального стока на предмет стационарности, а также с изучения причин его нестационарности и повышенной автокорреляционной зависимости.

Влияние человеческой деятельности на речной сток может приводить к более выраженным, иногда резким изменениям параметров его многолетних колебаний. Следовательно, важной задачей является оценка антропогенного воздействия на сток, например, путем восстановления естественных характеристик стока или сравнения водосборов с нарушенными и естественными характеристиками.

## 1.6 Методы расчета минимального стока

Когда в распоряжении имеются достаточно длинные последовательности наблюдений гидрологического режима рек, параметры наименьшего речного стока вычисляются с использованием общепринятых методик, основанных на вероятностно-статистическом анализе информации.

Вероятностные закономерности находят свое выражение в виде функций распределения. Расчетные показатели устанавливаются с помощью кривых обеспеченности, описываемых тремя главными параметрами: среднегодовым значением, коэффициентом изменчивости и коэффициентом скошенности. Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых используются аналитические функции распределения. Если данных недостаточно, то расчет

начинается с приведения параметров кривых распределения к многолетнему периоду с применением метода гидрологической аналогии; при отсутствии данных применяются методы переходных коэффициентов, а также нахождение расчетных величин на основе обобщенных зависимостей и карт.

При наличии данных гидрологических замеров, изучение минимального стока включает в себя анализ кривых продолжительности и кривых падения, определение параметров рядов (средний сток, оценка изменчивости характеристик во времени, асимметрии) и автокорреляции с последующим выбором теоретического закона распределения для этих случайных величин.

В отличие от кривых продолжительности, показывающих часть времени, в течение которого расход воды не опускается ниже определенного уровня, кривые обеспеченности отображают вероятность появления заданного значения расхода воды. Обычно они создаются на основе многолетних данных о годовых минимальных расходах (суточных или месячных). Кривые обеспеченности также могут быть построены для минимальных расходов, усредненных за различные временные периоды – 7, 30, 60 дней и т.д. Для изучения сезонной изменчивости минимальные показатели могут быть выделены отдельно для каждого сезона – зимней или летней межени.

Часто, имеющихся у гидрологов рядов наблюдений недостаточно для надежной вероятностной оценки экстремальных явлений, таких как наименьший сток. Поэтому, для экстраполяции за пределы наблюдаемых вероятностей и повышения точности оценки наименьшего стока, применяются различные типы теоретических кривых распределения. Истинное распределение вероятностей наименьшего стока неизвестно и вряд ли когда-либо будет установлено точно, поэтому практической задачей является выбор наиболее подходящего распределения для исследуемых характеристик и определение его параметров. Для оценки значений малых расходов с различной вероятностью применяется широкий спектр теоретических распределений. Выбор типа кривой основывается на обширных исследованиях и многолетнем опыте их применения в рас-

четах. Как правило, вид аналитической функции кривой фиксируется нормативно для унификации инженерных расчетов, так как выбор типа функции – это задача, допускающая множество более или менее удовлетворительных решений. Вопросам выбора функций распределения и их типам посвящены работы Е.Г. Блохинова.

Для имитации наименьшего речного расхода применяются разнообразные виды статистических законов распределения. В зарубежных научных трудах часто используют закон нормального распределения, однако, несмотря на его распространенность, есть серьезные основания сомневаться в его способности корректно отображать свойства минимального расхода воды. Это обусловлено тем, что нормальное распределение не всегда способно с высокой точностью отразить экстремальные показатели в верхней и нижней границах массива данных. В связи с этим, оно не представляется наилучшим инструментом для моделирования минимального стока, для которого характерна асимметрия и значительная изменчивость.

В качестве альтернативного варианта, более предпочтительными считаются логнормальное и гамма-распределения. Логнормальное распределение, представляющее собой нормальное распределение логарифмически преобразованных значений случайной величины, широко востребовано в гидрологических исследованиях. Тем не менее, из-за сильной взаимосвязи его параметров, его использование не всегда оправдано для моделирования различных гидрологических процессов, особенно при выраженной скошенности. Гамма-распределение с двумя параметрами пользуется большим спросом в гидрологии. В случаях, когда необходимо независимо устанавливать меру скошенности от коэффициента вариации, применяют трехпараметрические распределения, основанные на трансформации гамма-распределения.

Следует отметить, что двухпараметрические распределения показывают существенные различия лишь при разной степени асимметрии. При невысоких значениях коэффициентов вариации они становятся схожими с нормальным законом, и отличия между ними становятся менее заметными. Однако, при

одинаковой асимметрии и небольшой изменчивости, расхождения становятся значительными в зонах с редкой повторяемостью.

При сопоставлении трехпараметрических распределений проявляются существенные различия в области малых значений случайной величины, что свидетельствует о значительном влиянии выбора типа распределения на конечные результаты моделирования, в особенности в «хвостах» распределения. Таким образом, выбор подходящего типа и параметров распределения вероятностей минимального речного стока остается важной проблемой, требующей дальнейших исследований. Рекомендации по их выбору устанавливаются соответствующей нормативной документацией.

При создании графиков вероятности появления низких уровней воды обычно применяются данные, отражающие однородный характер водного стока. Согласно мнению А.М. Владимирова, вопрос неоднородности рядов не является критически важным, поскольку методология определения минимального стока и меженного периода предполагает выделение генетически схожих параметров [11]. Несмотря на это, отсортированные последовательности минимального стока всегда несут в себе элемент генетической разнородности. Это объясняется тем, что малые значения расходов с высокой вероятностью превышения (90, 95 и 99%) формируются в период самой низкой межени в основном за счет поступления подземных вод (расход 90% часто используется для оценки объема грунтового питания реки). В формировании относительно больших значений расходов могут участвовать и поверхностные воды. Данная неоднородность в последовательностях минимального стока приводит к сложной форме эмпирических кривых вероятности, отражающей различное происхождение минимальных расходов. Критерием однородности для низкого стока может служить пропорция между подземным и поверхностным питанием реки в рассматриваемый временной промежуток.

Трудности в выборе подходящих кривых распределения часто возникают из-за наличия нулевых показателей в наблюдаемых данных. Это может

быть связано с засушливыми условиями в засушливых регионах, которые приводят к пересыханию водоемов, а также в северных регионах из-за явления промерзания рек. Однако, зачастую «нулевые» значения стока соответствуют незначительным расходам, которые трудно точно зафиксировать. В таких ситуациях аналитическая кривая не всегда идеально совпадает с эмпирической кривой, особенно в интересующей нас нижней части графика. Выбор кривых для таких последовательностей можно осуществить с помощью процедуры подгонки условной вероятности.

Очевидно, что сравнение эмпирических и теоретических кривых водообеспеченности играет существенную роль. В российской практике, при анализе неоднородных данных, используются усеченные и комбинированные кривые распределения.

Традиционные аналитические подходы, такие как графики обеспеченности и длительности, не дают исчерпывающего представления о продолжительности маловодных периодов. Кроме того, они не позволяют с высокой точностью оценить дефицит водных ресурсов, который может возникнуть в меженный период. Реки, расположенные в одном регионе и демонстрирующие схожие кривые обеспеченности водными ресурсами, могут значительно отличаться по временным характеристикам низких расходов. Например, одна река может характеризоваться длительным периодом маловодья относительно определенного уровня расхода, в то время как другая – серией кратковременных периодов, в течение которых расходы опускаются ниже этого же уровня. Для решения указанных проблем возможно применение "порогового" метода, предложенного В.М. Евстигнеевым [22]. Этот метод предусматривает количественную оценку минимального стока, основывающуюся на определении "порогового" значения расхода, ниже которого сток считается меженным и, следовательно, характеризуется нехваткой воды. Временной интервал, в течение которого расход воды опускается ниже этого уровня, определяется как период дефицита. Предлагается анализировать статистические параметры распреде-

ления водных дефицитов и продолжительности их периодов. Выбор порогового значения определяется задачами водопользования и обусловлен гидрологическим режимом реки. К примеру, для анализа гидрологических засух на реках с постоянным течением в качестве порогового значения можно использовать квантили водообеспеченности в диапазоне 70-90%; для рек, которые пересыхают и наполняются только после интенсивных осадков, расходы с вероятностью превышения 20% могут рассматриваться как подходящие пороговые значения. Ключевыми расчетными параметрами являются длительность дефицитного периода, величина дефицита (суммарный дефицит) и интенсивность дефицита (отношение величины дефицита к его продолжительности). В случае, когда исследование проводится для рек с продолжительной непрерывной меженью, указанные параметры представляют собой годовые значения. Совокупность таких годовых значений формирует ряд экстремальных величин, к которому применимы стандартные методы статистического анализа. На основе полученных данных возможно построение кривой распределения вероятностей.

Подводя итог, необходимо подчеркнуть, что применяемые сегодня способы определения минимального речного стока не всегда обеспечивают достаточную точность. Это обусловлено нехваткой надежных и полных данных, а также внутренней неоднородностью временных рядов, характеризующих минимальный сток. Еще одним слабым местом является отсутствие единого подхода к выбору вероятностных распределений для описания как величин низкого стока, так и продолжительности периодов маловодья. Зачастую современные стохастические модели не принимают во внимание цикличность гидрологических процессов. Принимая во внимание значимость минимального стока как важнейшего параметра при проектировании различных гидротехнических сооружений, особенно остро встает задача его прогнозирования в условиях изменяющегося климата. Для этого необходимо:

- углубленное исследование статистических свойств временных рядов минимального стока с целью установления их генетической и статистической однородности;
- определение зависимостей между изменениями минимального стока и влияющими на него климатическими факторами;
- создание новых методов для моделирования вероятностной структуры рядов минимального стока.

## 2 Региональные исследования закономерностей колебаний минимального стока

### 2.1 Физико-географические характеристики и гидрологические особенности Камчатки

Камчатский речной бассейн, расположенный в сердце полуострова, представляет собой обширную гористую местность с разнообразным ландшафтом. Рельеф этой области сформировался под воздействием тектонических сдвигов и вулканической активности.

Река Камчатка берет свое начало на восточном склоне Срединного хребта и несет свои воды в Камчатский залив, часть Тихого океана, вблизи поселка Усть-Камчатск, примерно в двух километрах ниже по течению.

Общая длина реки Камчатка составляет 758 километров, а площадь водосборного бассейна охватывает 55 900 квадратных километров. Средняя высота бассейна достигает 560 метров, общее падение реки – 1200 метров, а средний уклон составляет 1.58 промилле.

В пределах бассейна реки Камчатка насчитывается 7707 рек, суммарная протяженность которых составляет 30 352 километра. Средняя плотность речной сети здесь довольно высока – 0.54 км/км<sup>2</sup>. Большая часть этих водотоков имеет небольшую длину, не превышающую 10 километров.

Многие малые реки и ручьи вытекают из болот. Болотистые территории занимают значительную часть бассейна реки Камчатка, около 4000 квадратных километров, что составляет примерно 7% от общей площади.

Озера покрывают площадь в 1038 квадратных километров, что соответствует примерно 2% от площади бассейна. Основная концентрация озер наблюдается в долине реки Камчатка и на прибрежной низменности.

Вблизи устья реки правый берег образован морскими отложениями, представляющими собой древние морские косы. В настоящее время они формируют береговую линию, вдоль которой вытянулись лагуны. Левый берег, напротив, сложен речными наносами.

Река Камчатка может быть условно разделена на пять различных участков, каждый из которых характеризуется уникальным строением речной долины и особенностями течения.

Первый участок, протяженностью 54 километра, начинается от истока реки и тянется до впадения реки Правая Камчатка. В верховьях этот участок представляет собой быстрый горный поток, скорость течения которого варьируется от 1.8 до 2.0 метров в секунду.

Второй участок, длиной 112 километров, простирается от устья реки Правая Камчатка до поселка Верхне-Камчатск. Русло реки здесь умеренно извилистое и сильно разветвлено, особенно в районе поселка Пушино, где оно разделяется на множество мелких рукавов. До впадения реки Малая Клюквенная река сохраняет характерные черты горного потока.

Третий участок, протяженностью 293 километра, охватывает территорию от поселка Верхне-Камчатск до устья реки Козыревка. В верхней части этого участка пойма реки двусторонняя, ее ширина колеблется от 500 до 600 метров. Ниже впадения реки Николка ширина поймы увеличивается до 1.0 – 1.4 километра.

Четвертый участок, длиной 235 километров, тянется от устья реки Козыревка до устья реки Ильчинец. Пойма реки здесь в основном развивается вдоль левого берега. Ширина поймы, как правило, составляет 5 – 6 километров, но ниже впадения реки Белая она увеличивается до 8 – 10 километров.

Пятый участок реки, протяженностью 36 километров, расположен между истоком реки Ильчинец и верховьями притока Пекалка. Этот участок характеризуется тем, что река пересекает Кумрочский и Токинецкий хребты. Между этими горными массивами находится межгорная низина, отличающаяся равнинным рельефом и заболоченной местностью.

Река Камчатка в основном питается за счет подземных источников, на которые приходится от половины до семидесяти процентов годового объема воды, а также благодаря таянию снегов. Большая часть годового стока, также составляющая 50 – 70%, приходится на период весеннего половодья. Максимальный уровень воды обычно наблюдается в конце июня или начале июля. Подъем воды над самым низким уровнем (межень) в среднем колеблется от 3.0 до 3.5 метров, но в отдельные годы может достигать и 4.5 метров. Спад весенне-летнего половодья завершается в конце августа – середине сентября. Длительность этого периода составляет от 120 до 140 дней, иногда увеличиваясь до 160 – 170 дней. После половодья наступает период осенней межени, который можно наблюдать в сентябре и октябре. Зимняя межень начинается в конце октября и продолжается до конца апреля или начала мая. Отличительная особенность зимней межени – относительно высокая водность.

Водосборный бассейн реки Камчатка характеризуется повышенным содержанием взвешенных частиц в воде. Средние многолетние значения мутности в главном русле реки составляют 50 г/м<sup>3</sup> в верховьях, 130 – 170 г/м<sup>3</sup> в среднем течении и 85 – 90 г/м<sup>3</sup> в низовьях.

Первые признаки образования льда, такие как забереги и шуга, появляются в конце октября – первой половине ноября. К середине ноября обычно формируется сплошной ледяной покров, за исключением участка от устья реки Правая Камчатка до места впадения реки Левая Вахвина, где ледообразование характеризуется нестабильностью. Отдельные участки открытой воды, расположенные в центре русла, как правило, можно увидеть в конце ноября – начале декабря. Более устойчивые полыньи образуются вдоль берегов в местах выхода на поверхность подземных вод. В этих местах полыньи существуют на протяжении всей зимы, увеличиваясь в размерах к весне и способствуя вскрытию реки. Продолжительность ледостава в среднем течении реки составляет в среднем 150 дней, а в нижнем течении – 170 дней. Вскрытие реки обычно происходит в конце апреля или начале мая.

В долине реки Камчатка в самое теплое время года (июнь-август) в районе поселка Ключи температура воздуха практически всегда немного ниже, чем в районе поселка Мильково. Температура воздуха в районе поселка Козыревск, расположенного между этими двумя населенными пунктами, как правило, занимает промежуточное значение.

Анализ многолетних колебаний средней температуры воздуха в период с июня по август в окрестностях поселка Усть-Камчатск за период с 1985 по 2024 год не выявил явной тенденции изменения температуры ( $R^2=0.0004$ ).

## 2.2 Физико-географические характеристики бассейна р. Быстрой

Водная артерия простирается на 275 километров, а площадь ее водосборного бассейна охватывает 10 800 квадратных километров. Исток реки берет начало у северо-западных отрогов Ганальского хребта. Она является одной из важнейших водных магистралей полуострова и самой крупной рекой, впадающей в Охотское море на Камчатской территории.

Климатические условия в районе речного бассейна характеризуются умеренной континентальностью. Среднегодовое количество осадков в долине реки варьируется от 700 до 800 мм, с наибольшей интенсивностью в летние и осенние месяцы. Снежный покров достигает 60 – 80 см. Запасы воды в снеге могут достигать значений от 130 до 220 мм.

В верховьях и средней части бассейна преобладают кристаллические горные породы, тогда как в низовьях распространены торфяные почвы.

Как уже отмечалось, река начинает свой путь в северо-западной части Ганальских Востряков. Первые 5 – 7 километров она течет на север, затем меняет направление на юг и выходит на Центральнокамчатскую равнину. Долина реки ограничена горами Срединного хребта справа и Ганальским хребтом слева. Ниже места впадения реки Мумоч основное русло пересекает южную оконечность Срединного хребта и выходит на Западно-Камчатскую равнину.

По типу питания река Быстрая и ее притоки, расположенные в гористой и предгорной местности, относятся к рекам с весенне-летним половодьем и паводками в теплую пору года. Водоснабжение рек осуществляется за счет различных источников. Подъем уровня воды начинается в первой половине мая, достигая максимальных значений во второй половине июня. Дождевые паводки часто совпадают с периодами подъема и спада половодья. Наибольший подъем уровня воды над минимальным уровнем составляет 1.5 – 2 метра. Половодье заканчивается к середине августа. В течение теплого периода на реках наблюдаются дождевые паводки. Пиковый расход воды во время паводков обычно в 2 – 4 раза меньше максимального расхода воды во время половодья. Устойчивая летне-осенняя межень наблюдается в годы с низким уровнем воды. В годы с высоким уровнем воды межень прерывистая, ее общая продолжительность составляет в среднем 20 – 30 дней. Зимняя межень продолжается 140 – 150 дней.

Первые признаки замерзания реки появляются в конце октября – начале ноября. Полное установление ледяного покрова происходит во второй половине ноября – начале декабря. Толщина льда к концу зимы достигает 50 – 60 см. Вскрытие реки происходит в середине апреля. Продолжительность ледохода весной в верхнем течении реки Быстрая составляет 5 – 7 дней, а в нижнем – 1 – 3 дня. Полное очищение русла от ледяных масс происходит в конце апреля – начале мая. Средний многолетний расход воды в нижнем течении составляет 123 кубических метра в секунду. Средняя годовая мутность воды не превышает 50 г/м<sup>3</sup>. Распределение стока взвешенных частиц в течение года на притоках Быстрой крайне неравномерно. На весенне-летний период приходится 80-98%, на осенний – 1 – 13%, а на зимний – 1 – 9%. Наибольшая мутность воды и расход взвешенных частиц наблюдаются во время половодья: на небольших реках – в мае, а на более крупных – в июне.

На всем протяжении реки Быстрая прослеживается закономерная эволюция типов русловых деформаций и морфологических особенностей русла. В истоках, на начальных километрах, река характеризуется горным рельефом,

изобилующим порогами и водопадами, и прямолинейным направлением. Далее река проникает в южную часть Центральнокамчатской низменности, где долина расширяется до 5 – 6 км, и доминируют переходные и равнинные формы русловых процессов. На этом участке извилистые отрезки русла чередуются с разветвленными.

Вблизи села Малки ширина долины резко уменьшается. На участке, где река прокладывает себе путь через Срединный хребет, русло обретает горный вид с незначительными аллювиальными наносами. Здесь река течет в узкой V-образной долине с обрывистыми берегами. Русло сложено из валунов и крупной гальки, а на участках с порогами – из скальных пород. Ниже по течению, у подножия Срединного хребта, русло становится горным с хорошо развитыми аллювиальными формами, формируя излучины и распадаясь на рукава.

В пределах Западнокамчатской равнины река течет по обширной, хорошо сформированной долине. Русло переходит к переходному типу, и основным типом становятся пойменно-русловые разделения. Ширина долины достигает 6 км, а ширина полосы руслоформирования – 3 км. Общая ширина русла доходит до 300 м. Галечно-песчаное русло на перекатах уступает место участкам илистого дна на плесах.

### 2.3 Физико-географические характеристики бассейна р. Авачи

Авача, чье начало берет в виде реки Средняя Авача, является водным потоком, расположенным в азиатской части России, а именно на юго-востоке Камчатского полуострова.

Ее длина достигает 122 километров, а площадь водосбора занимает 5090 квадратных километров. Река вытекает из Авачинского озера и далее течет по узкой горной котловине. Приближаясь к устью, река выходит на равнину и впадает в Авачинскую бухту.

Климат водосборного бассейна характеризуется умеренным муссонным типом. Годовой уровень осадков колеблется от 700 до 1000 мм.

Рельеф бассейна в основном гористый, в среднем течении – преобладает холмистый ландшафт. Ниже города Елизово Авача протекает по прибрежной низменности, у подножия вулканической группы Авача.

Началом реки принято считать место выхода Средней Авачи из Авачинского озера. Направление течения преимущественно южное, но в низовьях оно меняется на юго-восточное. Практически на всем протяжении Авача течет в узкой горной долине. Главные притоки реки – Правая Авача, Левая Авача, Корякская и Пиначевская.

В верховьях реки русло изобилует перекатами. В средней части долины реки расширяется, а берега, покрытые растительностью, достигают высоты около 2 метров. Русло реки песчано-галечное и часто разветвляется на рукава. Глубина на плесах колеблется от 0.9 до 1.3 метра, а на перекатах – до 0.15 метра. Скорость потока составляет 1.3 – 1.7 м/с. В нижнем течении ширина русла достигает около 200 метров. В районе устья река распадается на несколько рукавов, формируя дельту.

Питание реки обеспечивается в основном за счет таяния снега и ледников, дождевой воды, а также значительной доли грунтовых вод. Главным этапом водного режима является весенне-летнее половодье, на которое приходится от 50 до 70% годового стока. Пик уровня воды обычно приходится на середину и конец июня. Продолжительность половодья составляет 120 – 130 дней. Межень приходится на период с сентября по ноябрь и формируется за счет подземного питания и таяния высокогорных снежников и ледников. На период межени приходится около 20% годового стока. Замерзание реки начинается в конце декабря, а вскрытие происходит в марте. Зимой характерны ледяные заторы. Продолжительность ледостава составляет около 120 дней; в верховьях ледостав обычно отсутствует. В зимний период проходит до 20% годового стока. Средний многолетний расход воды в нижнем течении составляет 136 м<sup>3</sup>/с. Годовой объем стока в устье Авачи составляет примерно 4.5 км<sup>3</sup>.

Средняя многолетняя мутность воды составляет 53 г/м<sup>3</sup>. Объем наносов составляет около 240 тысяч тонн в год. Вода в Аваче относится к гидрокарбонатному классу, ее минерализация составляет 40 – 50 мг/л.

В бассейне реки находится 194 небольших озера общей площадью 6.18 км<sup>2</sup>, а также горячие и холодные минеральные источники.

Значительная хозяйственная деятельность в пойменно-русловых комплексах бассейна реки способствует возникновению опасных гидрологических и русловых процессов. В 2022 году на участке среднего течения, от поселка Северные Коряки до города Елизово, произошло размывание берегов и затопление прибрежных территорий.

#### 2.4 Вероятностные закономерности минимального стока на примере некоторых рек Камчатки

В настоящее время, создание подходов для численной оценки величины экологического стока приобретает все большее значение. Это обусловлено усилением экологических требований, направленных на снижение негативного влияния человеческой деятельности на естественный гидрологический режим речных систем.

Как отмечалось ранее, одной из актуальных задач современной гидрологии является разработка методик для вычисления параметров меженного стока. В этой связи, изучение закономерностей формирования минимального стока было структурировано в два последовательных этапа. Начальный этап включает в себя исследование многолетних изменений минимального стока. Для этой цели используется комплексный подход, позволяющий восполнить дефицит первичной информации.

Значительная часть научных работ, посвященных современным климатическим изменениям на Камчатке и их воздействию на речной сток, свидетельствует о том, что данное воздействие стало ощутимым с середины 1980-х годов. Более того, для ряда рек Камчатского края период с 1985 по 2024 год

был признан показательным. Для иллюстрации этого факта, на рисунках 2.1 – 2.3 представлены графики изменения минимального стока во времени, а также разностно-интегральные кривые, демонстрирующие указанные тенденции для ряда рек Камчатского региона.

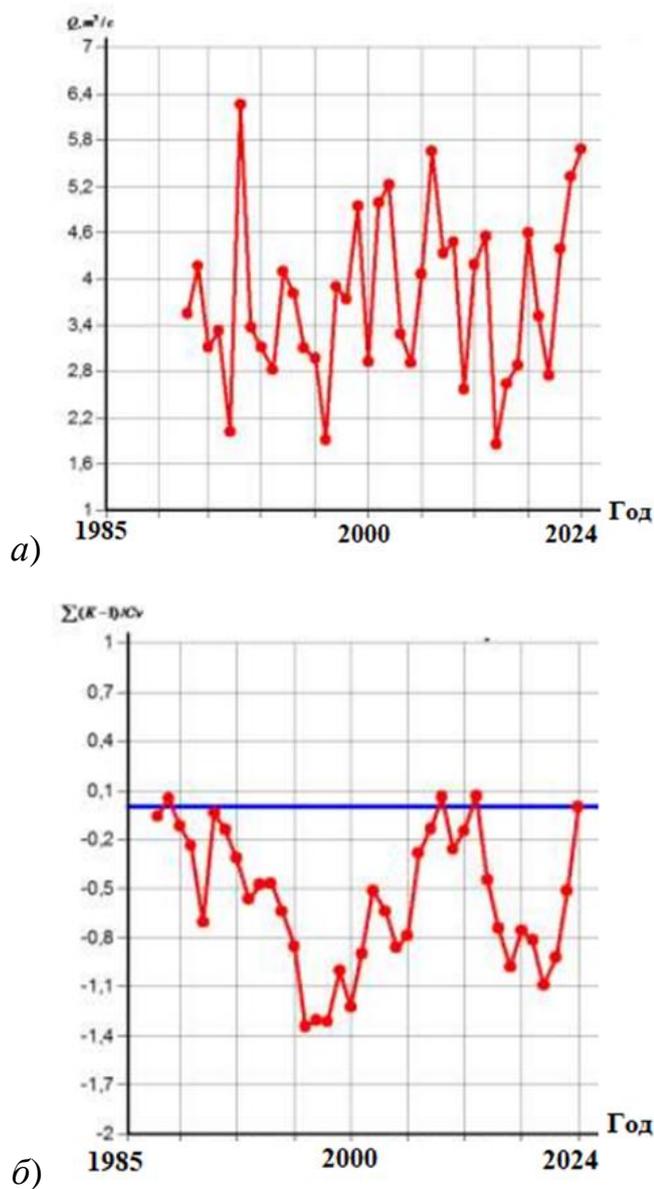


Рисунок 2.1 – Минимальный сток р. Камчатка: а) хронологический график, б) разностно-интегральная кривая

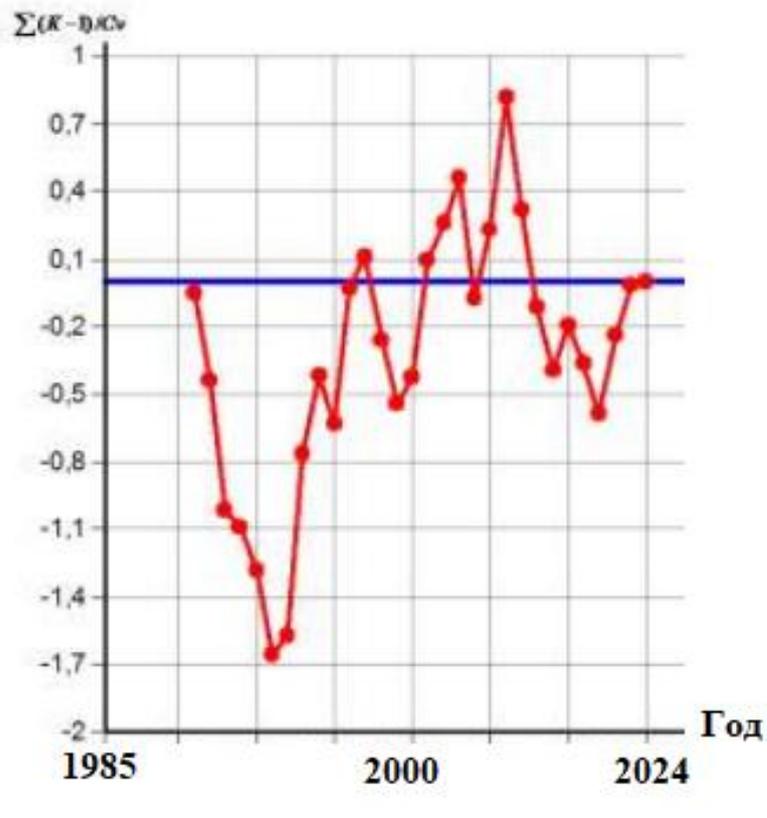
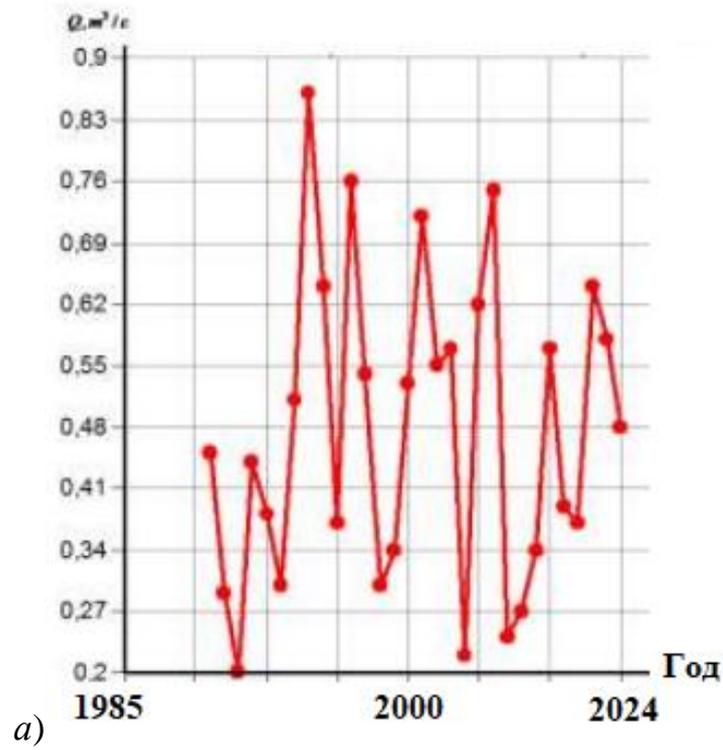


Рисунок 2.2 – Минимальный сток р. Быстрая: а) хронологический график, б) разностно-интегральная кривая

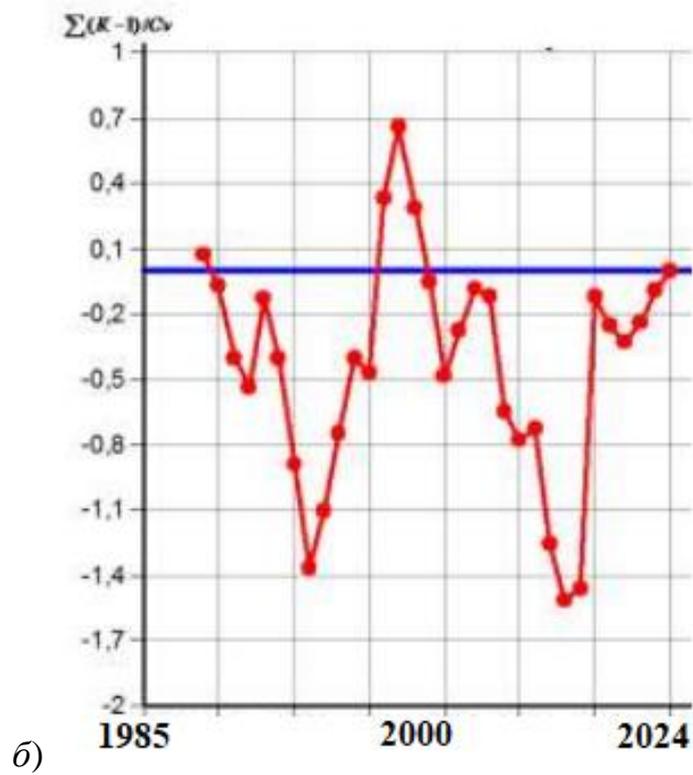
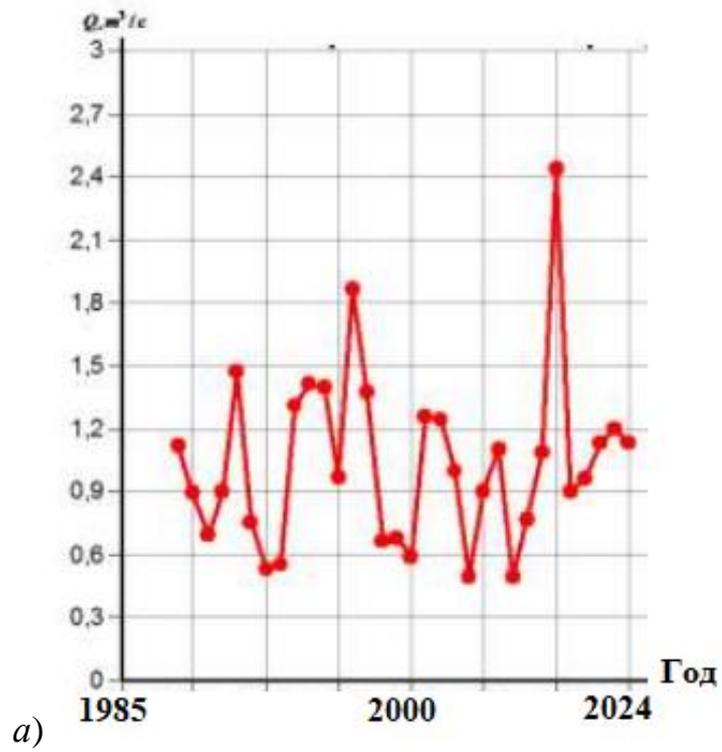


Рисунок 2.3 – Минимальный сток р. Авача: а) хронологический график, б) разностно-интегральная кривая

В данном разделе рассматривается массив данных, включающий наблюдения за минимальным речным стоком до 2024 года. Исходя из допущения о неизменности внешних условий, когда многолетние изменения стока рассматриваются как вероятностный процесс с постоянными характеристиками, подобные колебания минимального стока, как взаимосвязанные по времени, можно моделировать, используя функции, соответствующие определенному закону распределения вероятностей.

Эта неопределенность обусловлена рядом факторов: наряду с ограниченным объемом имеющихся данных, значительную роль играют сложные физико-географические условия, что приводит к использованию математических моделей, которые не позволяют получить явные аналитические решения для систем уравнений, описывающих динамику рассматриваемого процесса.

В связи с вышеизложенным, необходимо решить две основные задачи. Первая – выбор подходящего параметрического класса моделей, позволяющего эффективно использовать статистические методы для оценки параметров распределения. Вторая задача связана с повышением точности оценки этих параметров. Основная идея предложенного подхода заключается в применении принципа эргодичности, заменяя увеличение продолжительности наблюдений на одном участке совместным анализом данных по множеству относительно однородных участков.

Для реализации поставленной цели был проведен анализ данных наблюдений за минимальным 30-дневным стоком рек Камчатского края. Водный режим рек Камчатки отражает ключевую особенность регионального климата – умеренную континентальность. Благодаря преобладанию снегового питания, наблюдается весеннее половодье, а также летне-осенняя и зимняя межень. Периоды, когда преобладает подземное питание, чаще всего отмечаются в декабре-феврале и в августе-сентябре.

В разделе использованы данные наблюдений за период с 1985 по 2024 год для минимального 30-дневного стока на 9 гидрологических постах. Площади водосборных бассейнов выбранных рек находятся в диапазоне от 5090

до 55090 км<sup>2</sup>, что позволяет отнести их к категории средних и крупных рек.

В основе анализа лежит концепция, согласно которой годовые колебания стока подчиняются определенным распределениям вероятностей, эти распределения остаются постоянными в течение рассматриваемого временного интервала, и изменения стока в анализируемых бассейнах статистически независимы.

Каждый водосборный бассейн, входящий в рассматриваемую группу, демонстрирует уникальные характеристики водного стока, отличающиеся от других бассейнов по двум основным причинам. Прежде всего, метеорологические условия не меняются синхронно во всех частях каждого бассейна. Это приводит к вариациям в гидрологических показателях, которые выглядят как случайный элемент  $\mathcal{E}_{случ}$ . Во-вторых, различия в географическом положении и климатических условиях создают географическую составляющую изменчивости  $\mathcal{E}_{геогр}$ .

Самое простое и надежное допущение состоит в том, что все функции распределения принадлежат к одному и тому же типу.

Число определяемых параметров зависит от выбранного типа кривой.

Цель расчета – используя данные по группе объектов, получить сведения об отдельном объекте. Распределение вероятностей выборочных оценок можно рассматривать как сумму временных изменений и пространственной изменчивости факторов.

Следуя методологии С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, предположим, что параметры  $A_i$ , описывающие отдельные бассейны, подчиняются определенному закону распределения вероятностей [36, с. 53]. Общее рассеяние  $\mathcal{E}_{полн}$  оценок каждого из параметров объединенных гидрологических рядов можно интерпретировать как результат совместного действия двух вышеупомянутых факторов. Поскольку оба типа рассеяния не зависят друг от друга

$$\mathcal{E}_{полн}^2 = \mathcal{E}_{случ}^2 + \mathcal{E}_{геогр}^2 \quad (2.1)$$

Полная дисперсия вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_{полн}^2 = \frac{\sum (A_i - \bar{A})^2}{k-1} \quad (2.2)$$

где  $i$  – индекс объекта,

$k$  – число совместно рассматриваемых объектов,

$A_i$  – оценка рассматриваемого параметра по  $i$ -му бассейну,

$A$  – средняя из оценок по всем бассейнам.

Случайная составляющая рассеяния оценок параметров вычисляется по теоретическим формулам или путем статистических испытаний. Зная ее, можно оценить географическую составляющую как разность следуемой величины.

$$\varepsilon_{геогр}^2 = \varepsilon_{полн}^2 - \varepsilon_{случ}^2 \quad (2.3)$$

Если оценка  $\varepsilon_{геогр}^2$ , получаемая по формуле (2.3), имеет отрицательный знак, то ее принимают равной нулю.

Дисперсия результата совместного расчета равна

$$\varepsilon_{ср.}^2 = \frac{\varepsilon_{сл.}^2}{k} + \varepsilon_{геогр.}^2 \quad (2.4)$$

Первая часть алгоритма анализирует степень изменения характеристик, присущих каждому отдельному элементу выборки. Вторая часть выявляет различия между этими элементами.

Когда анализируемые объекты не однородны, объединение этих двух составляющих приводит к рассеиванию результирующей кривой.

Соотношение между внутренней изменчивостью объектов и их географическим распределением влияет на формирование оптимальной аналитической группы. Увеличение числа совместно изучаемых объектов влечет за собой уменьшение случайной погрешности среднего значения для всей группы. Однако, расширение географии выборки должно увеличивать географическую составляющую. Идеальным считается такой состав группы, при котором географическая составляющая не выходит за пределы случайной ошибки

$$\varepsilon_{\text{геогр.}} \leq \varepsilon_{\text{случ.}} \quad (2.5)$$

Важно также минимизировать вариативность данных по всей исследуемой выборке. В противном случае, если условие однородности (ранее обозначенное как условие 5) не удовлетворяется, необходимо разбить изучаемую область на более мелкие сегменты. Если условие однородности соблюдено, объединенная группа считается гомогенной. Оценка может производиться на основе таких характеристик, как среднее арифметическое, стандартное отклонение, коэффициент скошенности и заданный квантиль.

Предлагается следующая схема анализа, основанная на изложенных принципах:

1. Выбираются водосборные бассейны в пределах конкретного региона, располагающие достаточными по длительности рядами наблюдений.
2. Устанавливается тип распределения и перечень параметров, подлежащих оцениванию.
3. Вычисляются значения параметров на основе имеющихся данных наблюдений для каждого рассматриваемого объекта.
4. Выявляются «пространственные» компоненты дисперсий, отражающие различия между объединяемыми объектами.

Результатом анализа являются средние значения параметров, а также по-

казатели их рассеяния: случайного (временного) и систематического (географического). На основе полученного набора параметров можно построить кривую обеспеченности, которая отражает характерные для данной группы бассейнов соотношения.

Эмпирическое распределение минимального стока имеет сложную структуру. Однако, из-за ограниченной продолжительности периодов наблюдений, в гидрологических расчетах обычно используют только две его характеристики: среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Многочисленные данные указывают на применимость трехпараметрической гамма-функции Крицкого-Менкеля, что сводит задачу к определению третьего параметра, который сложно точно оценить индивидуально.

Порядок проведения группового анализа следующий:

1. Для каждого водосборного бассейна определяются параметры распределения величин минимального стока.
2. Для каждой пары водосборов рассчитываются коэффициенты межсайтовой корреляции  $R_{i,j}(x)$ .
3. По выборке величин  $A_i$ , оценивается среднее значение параметра

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^k A_i}{k} \quad (2.6)$$

и полная дисперсия  $\varepsilon^2_{полн.}$  по формуле (2.2).

4. Определяются значения коэффициентов корреляции  $R_{i,j}(A)$  между оценками параметра  $A$  по теоретическим зависимостям.

5. Определяется стандартное отклонение  $\varepsilon_{наз.}(A)$  оценок параметра по выборкам объема  $n$ , характеризующее рассеяние оценок между независимыми выборками. Затем оно корректируется на величину, учитывающее влияние корреляции между объединяемыми объектами:

$$\varepsilon_{случ}(A) = \varepsilon_{геог}(A) \sqrt{1 - R_{cp}(A)} \quad (2.7)$$

где  $R_{cp}(A) = \frac{2}{k(k-1)} \sum_{j>k} R_{i,j}(A)$  среднее значение коэффициента корреляции между оценками параметра  $A$  по всем  $k$  водосборам.

б. Вычисленное значение флуктуационной компоненты применяется для определения географической компоненты согласно уравнению (2.3).

Если соблюдается условие (2.5), а именно географическая компонента дисперсии меньше флуктуационной, то территория признается гомогенной.

В таблице 2.1 представлены параметры, полученные на основе данных мониторинга минимального 30-дневного стока, отдельно для зимнего и летнего периода межени.

Объекты были разделены на три группы на основании коэффициента вариации  $C_v$  (таблица 2.1). Большая часть объектов оказалась в средней группе по  $C_v$ ; для каждой группы были рассчитаны средние значения параметров  $C_v$ ,  $C_v/C_s$  и общая дисперсия оценки  $\varepsilon^2$  полн.  $\varepsilon^2_{полн.}$

Таблица 2.1 – Оценка параметров распределения минимального стока рек Камчатка, Бастрая, Авача (числитель – зима, знаменатель – лето)

| Река     | $F, \text{ км}^2$ | $Q \text{ м}^3/\text{с}$ | $C_v$     | $C_v/C_s$ |
|----------|-------------------|--------------------------|-----------|-----------|
| Камчатка | 853               | 0.85/1.10                | 0.57/0.42 | 3.5/4.0   |
| Быстрая  | 689               | 0.59/0.63                | 0.50/0.50 | 2.0/2.7   |
| Авача    | 513               | 0.66/0.60                | 0.46/0.44 | 3.2/5.4   |

Таблица 2.2 – Средние значения оценок параметров для выделенных групп рек (числитель – зима, знаменатель – лето)

| Река     | $C_v$      | $\bar{C}_v$ | $C_v/C_s$ | $\varepsilon^2_{полн.}$ | Число створов |
|----------|------------|-------------|-----------|-------------------------|---------------|
| Камчатка | 0.3-0.5    | 0.40/0.41   | 2.70/2.76 | 1.16/1.05               | 28/23         |
| Быстрая  | $\geq 0.5$ | 0.68/0.75   | 2.60/1.96 | 0.71/0.68               | 15/14         |
| Авача    | $\leq 0.3$ | 0.26/0.24   | 2.15/1.92 | 1.72/1.22               | 12/12         |

Расчет полной дисперсии оценок параметров и ее составляющих показал, что рассеяние оценок в группе полностью определяется случайными ошибками (таблица 2.3). Поскольку  $\mathcal{E}^2_{полн.} = \mathcal{E}^2_{случ.}$ , то  $\mathcal{E}^2_{геогр.} = 0$

Таблица 2.3– Дисперсия оценок и ее составляющие (числитель – зима, знаменатель – лето)

| Река     | $C_v$      | $\mathcal{E}^2_{полн.}$ | $\mathcal{E}^2_{случ.}$ |
|----------|------------|-------------------------|-------------------------|
| Камчатка | 0.3-0.5    | 1.16/1.05               | 1.46/1.46               |
| Быстрая  | $\geq 0.5$ | 0.71/0.68               | 1.27/1.46               |
| Авача    | $\leq 0.3$ | 1.72/1.22               | 1.82/1.76               |

В результате проведенного исследования были обнаружены определенные компоненты, отличающиеся значительными показателями соотношения коэффициентов асимметрии и изменчивости ( $C_s/C_v$ ). Для этих компонентов были изучены графики вероятностного распределения, которые выявили присутствие аномальных значений в верхних частях кривых. Такая форма кривой вызвана неизбежной генетической неоднородностью. Эта неоднородность объясняется влиянием поверхностных вод на формирование сравнительно высоких минимальных значений, в то время как низкие значения формируются во время продолжительного периода низкой водности.

Проверка соответствия критериям объединения, согласно которым географический компонент дисперсии случайной величины не должен превышать минимальную дисперсию усредненного значения параметра, выполнялась с использованием графика зависимости дисперсии параметра от численности объектов в объединенной группе. Анализ показал, что выделенные группы образуют стабильные объединения и подтверждают обоснованность проведенного районирования. Информация, представленная в таблице 3, указывает на существование относительно однородных условий формирования стока в каждой группе.

Исходя из полученных результатов, можно принять, что  $C_s/C_v=2,5$  для I и III районов летом и зимой, и  $C_s/C_v=2,0$  для II района (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Результаты районирования на основе объединенного анализа параметра  $C_S/C_V$  (числитель – зима, знаменатель – лето)

| Река     | Номер | Число створов | $C_V$     | $C_V/C_S$ | $\varepsilon^2_{cp.}$ |
|----------|-------|---------------|-----------|-----------|-----------------------|
| Камчатка | II    | 28/23         | 0,4/0,41  | 2,0/2,0   | 0,05/0,06             |
| Быстрая  | III   | 15/14         | 0,68/0,71 | 2,5/2,5   | 0,08/0,10             |
| Авача    | I     | 12/12         | 0,26/0,24 | 2,5/2,5   | 0,15/0,15             |

Для анализа частотного распределения минимального водного стока была применена методика районирования Крицкого-Менкеля, результатом чего стала усредненная гистограмма (см. рисунок 2.4). На представленном графике также отражены результаты аппроксимации с использованием разнообразных теоретических законов распределения: нормального (1), распределения Гумбеля (2), распределения Крицкого-Менкеля (3) и логнормального распределения Пирсона (4). Согласно критерию Пирсона, наилучшее соответствие эмпирическим данным демонстрирует двухпараметрическое распределение Гумбеля. В пользу применения распределения Гумбеля говорит и тот факт, что многолетние данные о минимальном стоке удовлетворяют требованиям для его использования: выборка расходов должна иметь экспоненциальный характер распределения и незначительную автокорреляцию.

Перспективы дальнейших исследований в данной сфере связаны с установлением диапазона колебаний характеристик минимального стока, в котором достигается наибольшая сходимость между эмпирическими и теоретическими кривыми распределения.

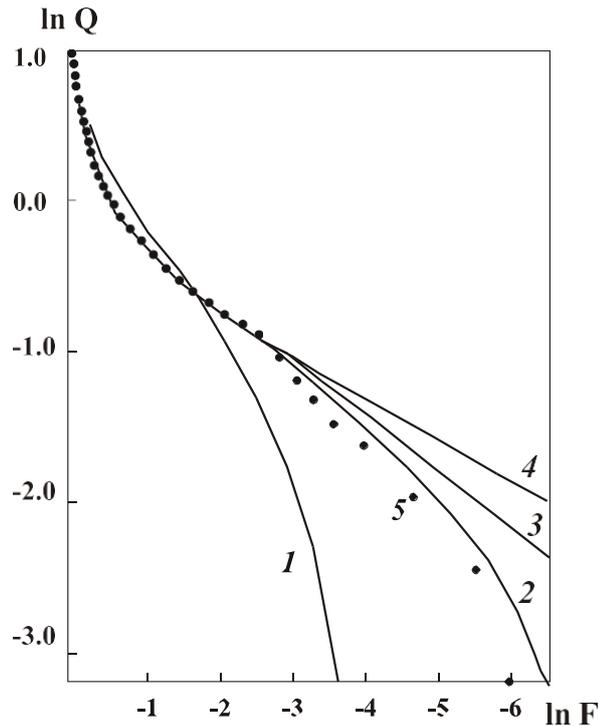


Рисунок 2.4 – Результаты подбора стохастических моделей для распределения величин минимального стока

Для выявления паттернов в изменчивости речного стока простого анализа одномерных распределений вероятностей недостаточно. Для более глубокого изучения необходимы условные распределения вероятностей, чьи характеристики определяются предыдущими значениями изучаемого параметра.

Выбор стохастической модели для описания рядов минимального стока требует определения автокорреляционной функции и типа корреляции. Коэффициент корреляции между соседними значениями стока сам по себе не дает полной картины о внутренних связях. Тем не менее, корреляционный анализ может быть полезен для предварительной оценки степени взаимозависимости между смежными элементами в последовательности минимального стока.

Рассмотрим автокорреляционные зависимости (АКЗ), рассчитанные для многолетних данных о минимальном стоке. При изучении корреляции годового стока особое внимание уделяется величине  $r(1)$ , рассматриваемой как параметр в простой модели Марковской цепи, применяемой для описания веро-

ятностных колебаний. Несмотря на инерционность минимального стока, которая должна приводить к высокой автокорреляции и медленно убывающей АКЗ, этого не наблюдается. Это объясняется тем, что стабильное поступление подземных вод обеспечивается глубокими водоносными горизонтами.

Анализ АКЗ для рек Камчатки показал, что первый коэффициент корреляции  $r(1)$  чаще всего положителен и колеблется в широком диапазоне от 0.7 до минус 0.25, со средним значением 0.17 зимой и 0.44 летом. Значения  $r(1)$  приведены в таблице 2.5.

Реки были разделены на три группы на основе площади водосбора. Такое деление не выявило очевидной связи между средним значением  $r(1)$  в группе и средними значениями площади водосбора  $F$ . Площадь водосбора, отражает общую мощность водосодержащих пород, доступных для реки, и её дренажную способность. Очевидно, что  $F$  прямо пропорциональна модулю минимального стока. На основании полученных результатов нельзя сделать однозначный вывод о влиянии  $F$  на корреляцию внутри ряда и  $r(1)$ . Возможно, отсутствие четкой связи связано с небольшими значениями  $F$ .

Таблица 2.5 – Коэффициенты автокорреляции минимального стока смежных лет

| Река                                 | $F$ , км <sup>2</sup> | $r(1)$ зима | $r(1)$ лето |
|--------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| I группа ( $F, \text{км}^2 < 1000$ ) |                       | 0.04        | 0.17        |
| Камчатка                             | 853                   | 0.5         | 0.07        |
| Быстрая                              | 689                   | -0.11       | -0.02       |
| Авача                                | 513                   |             |             |

Отдельно для зимы и лета для каждой реки была определена  $\eta$  – доля устойчивого стока реки. Из таблицы 2.6 видно, что при увеличении среднего в группе  $r(1)$  доля устойчивого стока увеличивается.

Таблица 2.6 – Средние значения характеристик для групп рек (зима/лето)

| Диапазон<br>$r(1)$ | Число<br>створов | $r(1)$    | $F$ , км <sup>2</sup> | $q$ л/скм <sup>2</sup> | $\eta$    |
|--------------------|------------------|-----------|-----------------------|------------------------|-----------|
| <0,30              | 28/23            | 0,07/0,09 | 853                   | 3,59/3,30              | 0,28/0,25 |
| 0,3-0,4            | 15/14            | 0,35/0,36 | 689                   | 3,55/3,83              | 0,3/0,29  |
| >0,4               | 12/12            | 0,54/0,56 | 513                   | 3,69/3,83              | 0,41/0,34 |

Это акцентирует внимание на том, что в пределах гомогенной области объем поступления подземных вод играет ключевую роль в формировании минимального речного стока.

Так как на реках Камчатки значения  $r(1)$  летом оказываются выше, чем зимой, для дальнейшего исследования были отобраны летние значения  $r(1)$  в период самой низкой воды. Для речных бассейнов характерны низкие показатели автокорреляции, причем эти реки представляют собой изолированные водосборы. Неравномерность распределения  $r(1)$  на территории Камчатки может быть связана как с неточностями в оценке корреляции, так и с различиями в факторах, определяющих формирование стока.

В 1963 году была предпринята попытка деления Камчатки на районы, основываясь на условиях формирования минимального стока. В результате было выделено четыре гидрологических района.

Позже А.В. Владимиров провел районирование Камчатки, используя аналогичный подход. Изучение карт позволяет обнаружить закономерности в том, как распределяется величина  $r(1)$  по территории Камчатки, и установить взаимосвязь между этой величиной и особенностями условий питания рек в разных местах [11].

Исходя из этого, можно сделать вывод, что различия в значениях  $r(1)$  между районами в целом соответствуют различиям в физико-географических характеристиках. Тем не менее, пространственная неоднородность  $r(1)$  на рассматриваемой территории указывает на то, что районирование по этому показателю не имеет достаточных оснований, и совместный анализ для определения средних значений  $r(1)$  по районам не является целесообразным. Более

того, показатель  $r(1)$  не полностью отражает все нюансы корреляционной связи, и при усреднении  $r(1)$  без учета характера затухания высока вероятность утери важной информации о временных рядах с уникальными автокорреляционными функциями.

Очевидно, что одинаковое значение первого коэффициента автокорреляции еще не гарантирует идентичность внутренней структуры временного ряда.

Как было установлено в предыдущих исследованиях, цепь Маркова первого порядка представляет собой приближение в случае слабой корреляции внутри ряда.

Выводы:

1. Анализируя колебания минимального стока в рассматриваемых пунктах, можно выдвинуть предположение об их статистической однородности.

2. При условии ограниченного объема данных, результаты показывают, что для моделирования минимального стока на Камчатке подходит трехпараметрическое распределение Крицкого-Менкеля.

3. Для описания кривой распределения минимального стока рекомендуется использовать распределение Гумбеля.

4. Изменчивость первого коэффициента автокорреляции в пространстве препятствует проведению совместного анализа этой характеристики для расчета средних значений по району.

## 2.5 Региональный подход к оценке распределения вероятностей продолжительностей маловодных периодов

Оценка длительности маловодных фаз и объема дефицита речного стока в период межени затруднена при использовании простых одномерных кривых распределения. Для изучения явлений маловодья применяются не только данные о стоке с разной вероятностью превышения, но и информация об объемах потребления воды в различных отраслях хозяйства. Анализ периодов низкого

уровня воды основан на «пороговом» подходе, определяющем заданное значение расхода воды, ниже которого сток считается меженным и, следовательно, недостаточным.

Из массивов среднемесячных расходов формируются многолетние последовательности дефицитов воды или продолжительности периодов с низким уровнем воды. Эти последовательности подвергаются статистическому анализу для определения их характеристик и подбора наиболее подходящей теоретической кривой распределения вероятностей.

В данном разделе представлены результаты анализа статистической структуры последовательностей, характеризующих продолжительность периодов дефицита стока, полученных на основе данных наблюдений за относительно стабильный период. Также произведен выбор аналитической функции, наиболее точно описывающей "хвостовую" часть соответствующих эмпирических распределений.

Для проведения исследования использовались данные о среднемесячных расходах рек Камчатского края. Для упрощения обработки и анализа территория была разделена на три зоны в соответствии с принципами гидрологического районирования. Средняя продолжительность периода наблюдений составила 30 лет.

Для каждого измерительного пункта были сформированы многолетние ряды минимального среднемесячного стока за летне-осенний период и проведена статистическая обработка этих рядов. Установление четких дат начала и окончания летне-осенней межени затрудняет обобщение из-за неравномерности сезонного стока. Дополнительно была проведена оценка стационарности рядов минимального стока с использованием t-критерия Стьюдента.

В качестве теоретической функции распределения для моделирования многолетних колебаний минимального стока было выбрано распределение экстремальных значений Гумбеля.

На основе выбранного распределения были вычислены значения кван-

тилей с различной вероятностью превышения, которые в дальнейшем применялись в качестве пороговых значений.

Принимая значения 50%, 75% и 85% обеспеченности среднемесячного минимального стока в качестве пороговых уровней, из рядов среднемесячных расходов воды за многолетний период были получены ряды дефицитов воды, характеризующие продолжительность периодов с низким уровнем воды. Для каждого пункта были построены гистограммы, отражающие продолжительность периодов дефицита.

Для каждой гистограммы была предпринята попытка подобрать теоретическую функцию плотности вероятности.

Было установлено, что наилучшим образом соответствует имеющимся данным распределение Вейбулла (рис. 2.5 – 2.7).

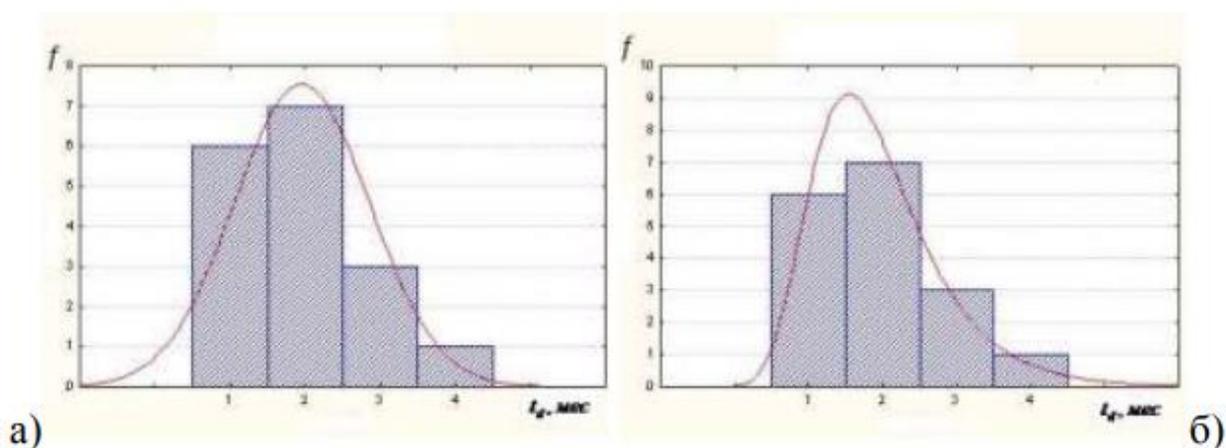


Рисунок 2.5 – Продолжительность дефицитных периодов р. Камчатки (пороговое значение 85%): а) подобрана нормальная функция распределения, б) подобрана функция распределения экстремумов

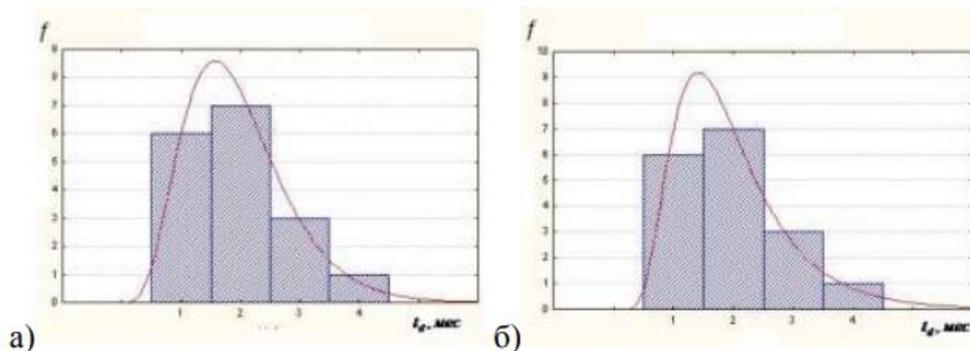


Рисунок 2.6 – Продолжительность дефицитных периодов р. Камчатки (пороговое значение 85%): а) кривая гамма-распределения; б) кривая логнормальной функции распределения

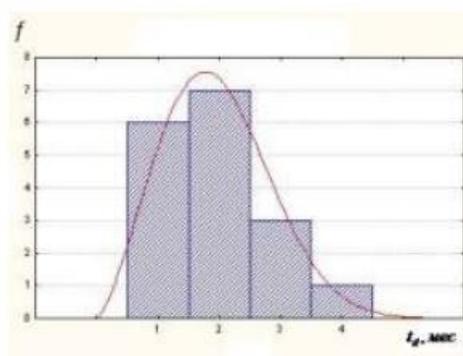


Рисунок 2.7 – Продолжительность дефицитных периодов р. Камчатка (пороговое значение 85%): кривая распределения Вейбулла

Распределение Вейбулла используется в вероятностном анализе, а также при анализе надежности и рисков гидролого-водохозяйственных систем и их компонент.

Случайная величина  $x$  подчиняется распределению Вейбулла, если функция плотности вероятности представлена в виде:

$$f(x) = \frac{a}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^a\right], a > 0, b > 0. \quad (2.8)$$

Тогда интегральную функцию распределения можно записать как

$$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^a\right] \quad (2.9)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры. Если  $a=1$ , то выражение (2.8) становится экспоненциальным, то есть экспоненциальное распределение есть частный случай распределения Вейбулла. Кроме того, это распределение может быть обобщено и иметь вид распределения экстремальных величин 3-го типа путем замены  $y = x - c$ , где  $c$  – параметр.

На последующей стадии изучения были определены разные степени гарантированного водоснабжения. Затем были сравнены графики, демонстрирующие продолжительность периодов с недостатком воды. Были выделены три характерных значения: 50%, 75% и 85% гарантированной обеспеченности. В процессе анализа установлено, что форма эмпирического распределения времени нехватки ресурсов меняется при увеличении уровня гарантированного водоснабжения (см. рис. 8-10). Данная тенденция облегчает выбор теоретической модели распределения.

В заключение проведенного исследования сделан вывод, что для статистического описания серий дефицитов водных ресурсов, остающихся ниже 85% уровня гарантированной обеспеченности, в большинстве ситуаций лучше всего использовать распределение Вейбулла.

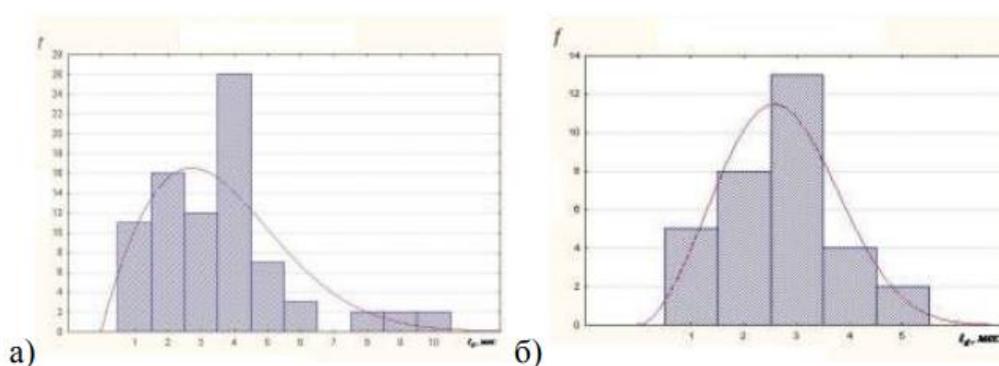


Рисунок 2.8 – Продолжительность дефицитного периода  $p$ . Быстрая: пороговое значение а) 50%, б) 85%

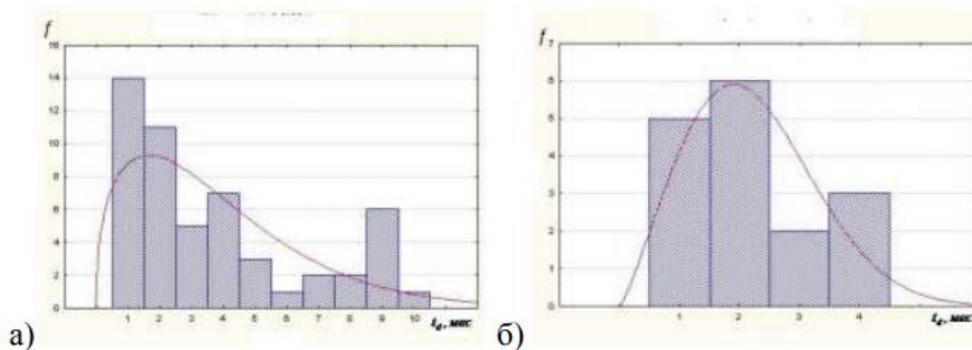


Рисунок 2.9 – Продолжительность дефицитного периода р. Быстрая: пороговое значение а) 50% и б) 85%

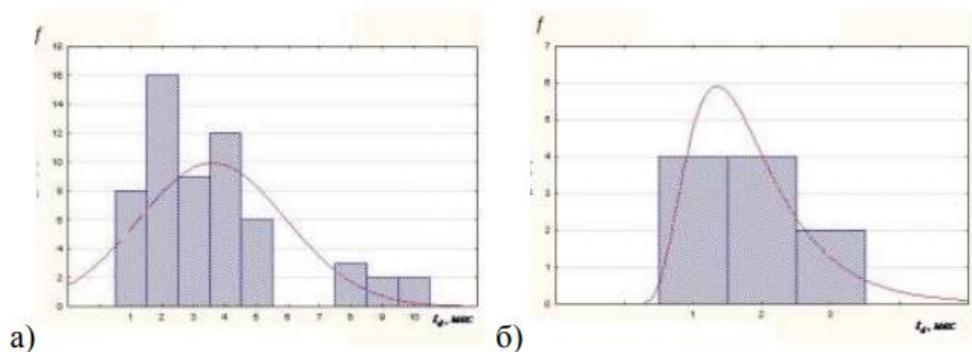


Рисунок 2.10 – Продолжительность дефицитного периода р. Быстрая: пороговое значение а) 50% и б) 85%

### Выводы

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие заключения:

1. Использование порогового подхода эффективно для определения продолжительности периодов с ограниченным водным ресурсом. Для анализа распределения продолжительности нехватки воды наиболее подходящим, как правило, является распределение Вейбулла.

2. С учетом статистических параметров временных рядов, характеризующих продолжительность дефицита речного стока, территория Камчатского края может быть признана статистически однородной.

3. На примере рек Камчатки показано, что для определения общих параметров распределения вероятностей минимального стока в рамках квазистационарного периода целесообразно использовать комбинированный анализ, основанный на распределениях Крицкого-Менкеля и Гумбеля.

Анализ продолжительности периодов низкого стока позволяет более детально исследовать явления маловодья. Полученные временные ряды, отражающие длительность таких периодов, хорошо описываются распределением Вейбулла.

## 2.6 Расчет вероятных изменений характеристик гидрологического режима водных объектов в бассейне р. Камчатки

Анализ динамики минимального речного стока в бассейне реки Камчатки выявляет существенные изменения в принципах формирования водного режима, начавшиеся с середины 80-х годов. Отмечается подъем минимального уровня стока во всех реках Камчатского региона. Это диктует потребность в создании новых вероятностных моделей, способных адекватно описывать выявленный нестационарный процесс.

В современной гидрологической науке существует ряд рекомендаций относительно вероятностного моделирования распределений минимального стока. Применение существующих методик затруднено рядом ограничений, связанных как с нехваткой информации и неоднородностью данных, так и со сложностью применения математических расчетов. Для нестационарных условий задачи могут быть решены с помощью методов аппроксимации законов распределения гидрологических параметров.

Изучение графиков минимального стока показывает, что для описания его динамики возможно применение не только модели линейного тренда, но и модели резкого перехода от одного устойчивого состояния к другому. Трендам подвержены системы, слабо реагирующие на внешние воздействия. Скачкооб-

разные изменения характерны для неустойчивых систем, способных компенсировать внешние воздействия до достижения ими критической точки. Устойчивый ряд может быть частным случаем как устойчивой, так и неустойчивой системы. В первом случае это отражение случайных внешних воздействий, во втором – период стабильности. Несмотря на статистически значимые тренды для этих рядов, данная модель имеет недостатки: выбор начального момента и продолжительности периода существенно влияет на параметры тренда и даже на его знак. Модель линейного тренда не позволяет определить границы периодов с одинаковыми статистическими показателями.

Имеющиеся данные о минимальном стоке показывают наличие различных состояний равновесия. Если исходить из предположения, что климат претерпел изменения в сторону потепления, и возврат к прежнему состоянию не предполагается, то достаточно аппроксимировать эмпирическую кривую распределения стока за последний устойчивый период и использовать эту модель для оценки расчетных прогнозных характеристик на ближайшие 20-30 лет.

Вместе с тем, нельзя исключать вероятность возврата климатической системы в одно из предыдущих состояний. Принимая во внимание необходимость оценки вероятности всех возможных событий, нужно учитывать нестационарный характер временных рядов при оценке расчетных параметров.

Поскольку моменты смены фазы водности разделяют ряды на однородные участки, каждый из них можно рассматривать как стационарный процесс. Вместо анализа одной длинной выборки можно анализировать два условно стационарных участка, соответствующих разным состояниям гидролого-климатической системы.

Существующие правовые нормы определяют способы вычисления гидрологических параметров. Один из эффективных приемов – это создание закона распределения исследуемого признака как сочетания двух распределений вероятностей. Данная модель носит название «смешанного распределения». Классический пример – анализ годовых пиковых расходов воды, когда максимальные значения в отдельные годы обусловлены таянием снежного покрова, а в

другие – интенсивными осадками. В подобной ситуации совокупность максимальных значений содержит неоднородные элементы, требующие индивидуальной обработки для каждой однородной части. Зачастую бывает затруднительно разграничить максимальные расходы паводков по причине их возникновения. Важно, чтобы компоненты смеси заметно отличались по характеру, поскольку ограниченный объем данных создает трудности для стабильности параметров.

Представленная последовательность значений минимального стока разделяется на два условно-стабильных отрезка относительно определенного момента изменения водного режима (1985 или 2000 год). Каждый из этих отрезков характеризуется собственной функцией распределения вероятностей и статистическими характеристиками. Вместо единого длинного ряда анализируются два условно-стационарных фрагмента. Для каждого отрезка эмпирическая кривая обеспеченности моделируется одним из общепринятых законов распределения.

Для каждой части подбирается индивидуальный закон распределения. Итоговая кривая обеспеченности для всего временного ряда формируется как сумма двух законов распределения. В этом случае для функции плотности распределения  $f(x)$  и интегральной кривой обеспеченности  $P(x)$  применяются соответствующие математические выражения

$$f(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) \quad (2.10)$$

$$P(x) = 1 - \int_0^x f(x) dx = 1 - \int_0^x [\lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x)] dx \quad (2.11)$$

где  $f_1(x)$  – закон распределения (плотность) для первого условно однородного периода;  $f_2(x)$  – то же для второго условно однородного периода; для аппроксимации  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  используется логарифмическая модификация распределения Пирсона III типа;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – весовые коэффициенты, определяемые в следующем виде

$$\lambda_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.12)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – продолжительность первого и второго однородного периода. Можно задать  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  из других соображений, но для сохранения вероятностного смысла формулы (5.1) необходимо выполнение условия

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1. \quad (2.13)$$

Применяя соотношения (2.12) для задания весов в уравнении (2.10), мы сокращаем число параметров, которые необходимо определить. Оценка параметров распределения упрощается до независимой оценки параметров для каждой компоненты. Получаемая кривая обеспеченности строится путем численного интегрирования (2.11), принимая во внимание все известные параметры отдельных компонентов и установленные весовые множители. Определение весовых множителей, пропорциональное объему доступных данных (2.12), является необходимым, поскольку результат напрямую зависит от имеющейся информации. При прогнозировании речного стока целесообразно учитывать представления о длительности однородных временных периодов.

Примеры аппроксимации кривых обеспеченности минимального стока в условиях нестационарности с использованием смеси распределений для ряда рек в бассейне Камчатки демонстрируются на рисунках 2.11 – 2.21. На этих графиках отображены эмпирические кривые обеспеченности и теоретические, соответствующие анализируемым характеристикам.

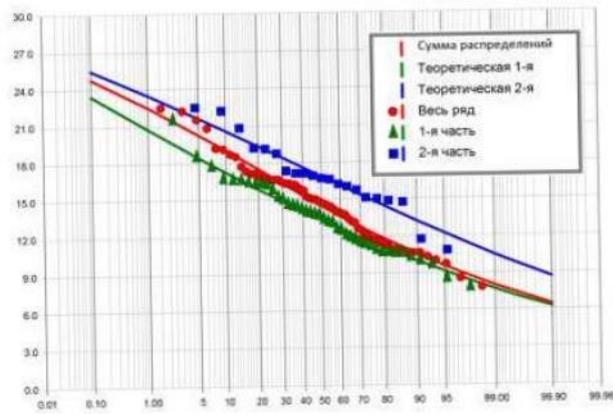


Рисунок 2.11 – Кривые обеспеченности минимального стока за зимний период (р. Кавыча)

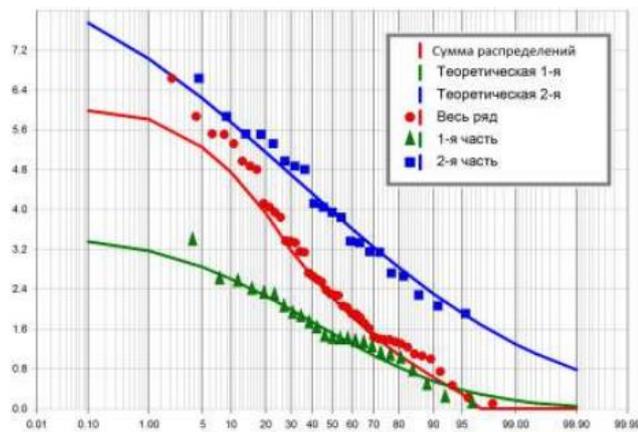


Рисунок 2.12 – Кривые обеспеченности минимального стока за летне-осенний период (р. Андриановка)

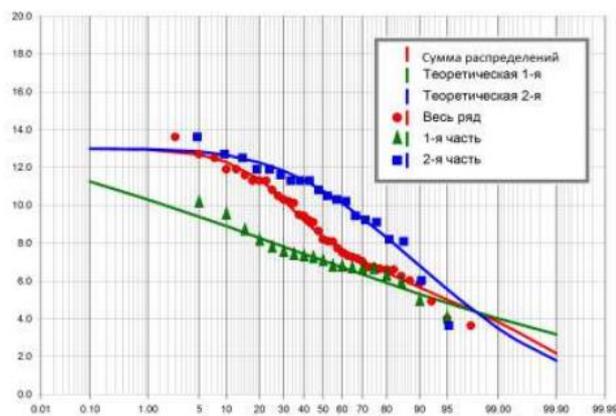


Рисунок 2.13 – Кривые обеспеченности минимального стока за летне-осенний период (р. Вахвина Левая)

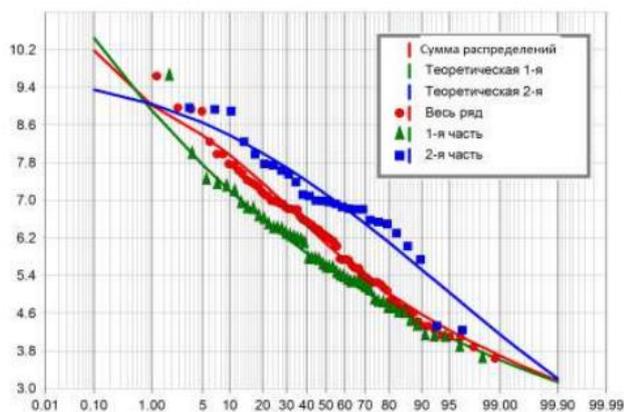


Рисунок 2.14 – Кривые обеспеченности минимального стока за зимний период (р. Кирганик)

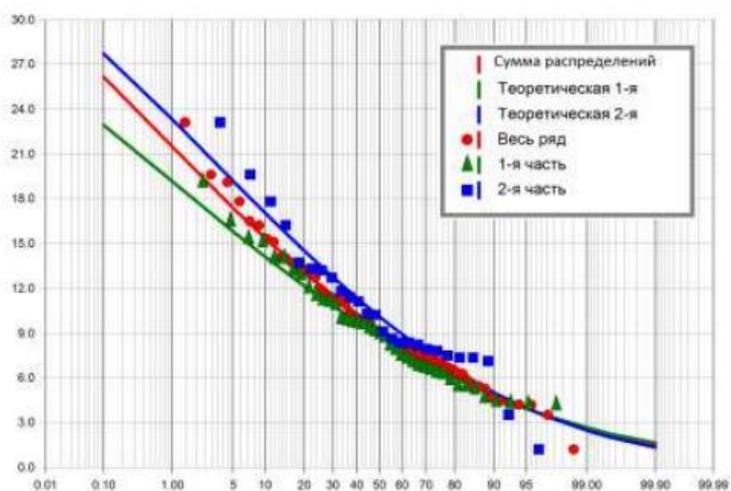


Рисунок 2.15 – Кривые обеспеченности минимального стока за летне-осенний период (р. Большая Кимитина)

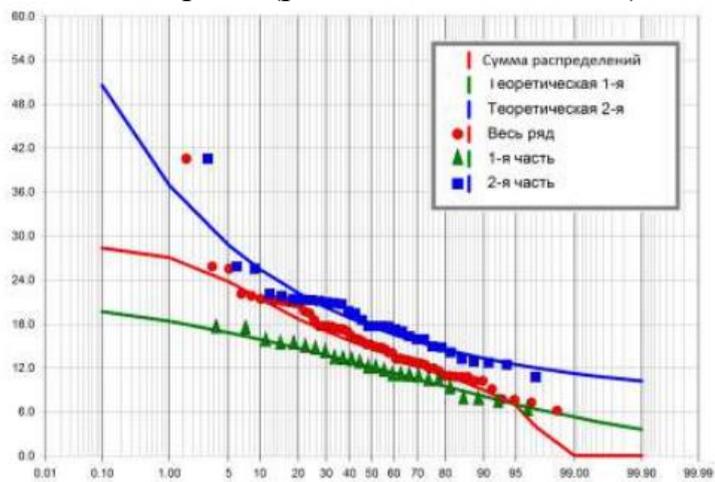


Рисунок 2.16 – Кривые обеспеченности минимального стока за зимний период (р. Китильгина)

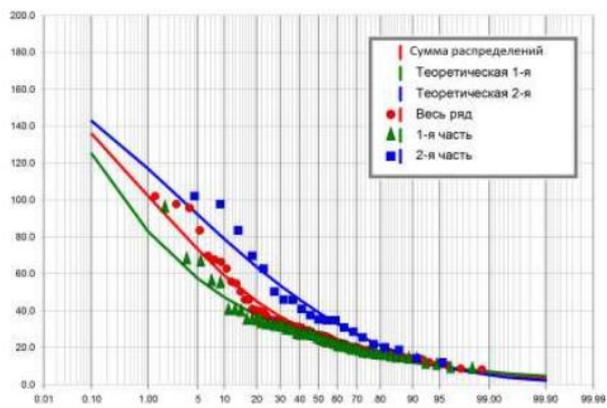


Рисунок 2.17 – Кривые обеспеченности минимального стока за летне-осенний период (р. Щапина)

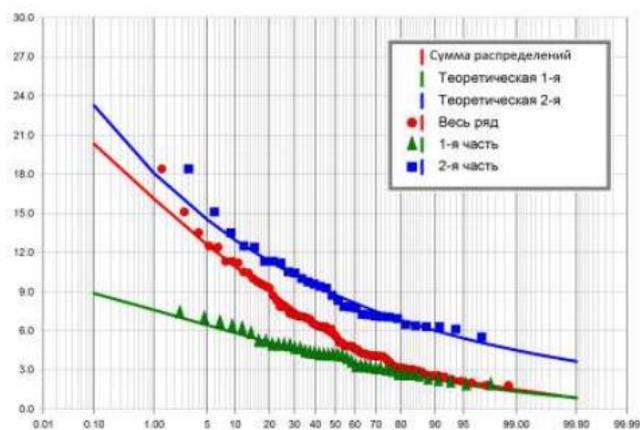


Рисунок 2.18 – Кривые обеспеченности минимального стока за зимний период (р. Толбачик)

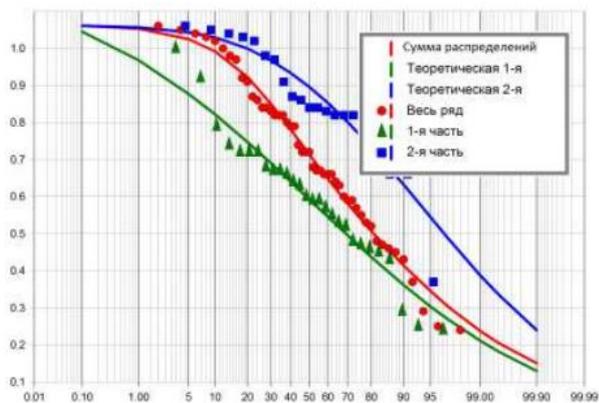


Рисунок 2.19 – Кривые обеспеченности минимального стока за зимний период (р. Козыревка)

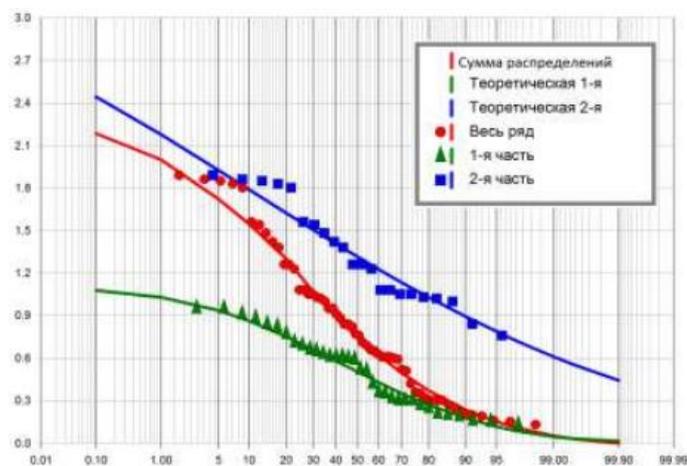


Рисунок 2.20 – Кривые обеспеченности минимального стока за летне-осенний период (р. Еловка)

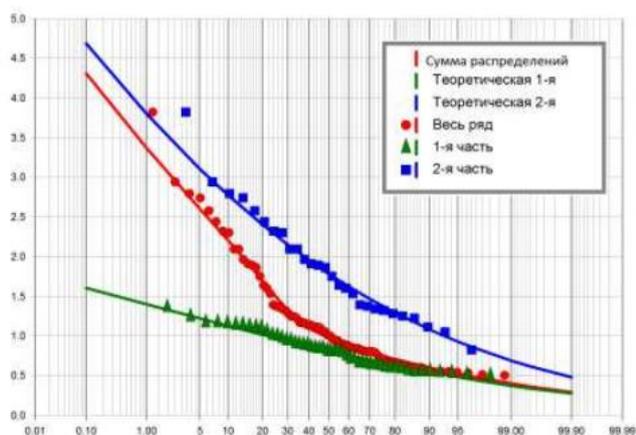


Рисунок 2.21 – Кривые обеспеченности минимального стока за летне-осенний период (р. Большая Хапица)

### Выводы

1. Анализ изменений минимального речного стока выявил, что под влиянием изменяющегося климата его вариации можно рассматривать как серию относительно устойчивых этапов.

2. Для имитации непостоянства в колебаниях минимального стока предложена идея смены квазиоднородных отрезков времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненного исследования динамики минимального речного стока, сделаны следующие выводы:

На реках Камчатки получены согласованные в пространственном отношении параметры распределения минимального стока в рамках периода стационарности. В качестве теоретической модели распределения рекомендуется применять распределение Гумбеля.

Наиболее подходящим способом описания рядов длительности периодов с низким уровнем воды, определенных с помощью "порогового" метода, является использование распределения Вейбулла. В период условной стационарности Камчатский край показал однородность в отношении статистических характеристик продолжительности периодов нехватки водных ресурсов.

Обнаружены изменения в статистических параметрах минимального стока за последние три десятилетия. Подтвержден факт анизотропии полей межженного и минимального стока.

Применение алгоритма анализа матрицы парных корреляций показало изменение границ областей с синхронными колебаниями сезонного и минимального стока.

Анализ статистической структуры рядов выявил нарушение стационарности в рядах минимального стока.

В качестве основы для разработки методики расчета минимального стока была использована модель, представляющая его колебания как смену условно-стационарных этапов.

Для расчета минимального стока в нестационарных условиях, учитывающего все значения, влияющие на надежность функционирования водохозяйственных комплексов, был применен метод «суммы распределений».

В целом, результаты исследования свидетельствуют о необходимости сосредоточения усилий на вероятностных моделях при разработке новых подходов и методов расчета минимального стока.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г.А. Объективные методы выравнивания и нормализации корреляционных связей. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 363 с.
2. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л. Безопасность водопользования в условиях маловодий // Водное хозяйство России, 2011. – № 6. – С. 6-17.
3. Амусья А.З., Ратнер Н.С., Соколов Б.Л. Минимальный сток рек: состояние и перспективы исследований // Труды ГГИ, 1991. – Вып. 355. – С. 3-28.
4. Андреев В.Г. Методические указания по расчетам внутригодового распределения стока при строительном проектировании – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 77 с.
5. Апполов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 419 с.
6. Блохинов Е.Г. Распределение вероятностей величин речного стока. – М.: Наука, 1974. – 169 с.
7. Боголюбов С.Н., Богомазова З.П. Вертикальная зональность подземных вод как основной фактор формирования стока // Метеорология и гидрология, 1955. – № 6. – С. 28-49.
8. Болгов М.В., Коробкина Е.А. Исследование закономерностей многолетних колебаний годового стока рек Сибири и Дальнего Востока // География и природные ресурсы, 2011. – № 2. – С. 5-11.
9. Болгов М.В., Мишон В.М., Сенцова Н.И. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. – М.: Наука, 2005. – 318 с.
10. Болгов М.В., Филиппова И.А. Пороговые стохастические модели минимального стока//Метеорология и гидрология, 2006. – №3. – С.88-94.
11. Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 295 с.
12. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. проф. И. А.

Шикломанова. – СПб: Изд-во ГГИ, 2008. – 587 с.

13. Волчек А.А., Грядунова О.И. Минимальный сток рек Беларуси – Брест: БрГУ, 2010. – 169 с.

14. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем – М.: 2012. – С.53-85.

15. Георгиади А.Г., Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева, Е.А. Кашутина, Е.А. Барабанова. Климатические и антропогенные факторы в многолетних изменениях речного стока реки Волги // Водное хозяйство России, 2013. – №4 – С.4-19.

16. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Климатические изменения температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России по данным инструментальных наблюдений // Гидрологические последствия изменения климата: Труды Британско-Российской конф. – Барнаул: Изд-во «Пять плюс», 2009. – С. 169-174.

17. Гуревич Е.В. Влияние температуры воздуха на зимний сток рек (на примере бассейна р. Алдан) // Метерология и гидрология, 2009. – № 9. – С.92-99.

18. Дерибизова С.В. Пространственная изменчивость весеннего стока в бассейне р. Волхов // Труды ГГИ, 1979 – № 259. – С. 54-57.

19. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Сафронова Т.И. Изменения режима и величины подземного стока рек Европейской территории России под влиянием нестационарного климата // Ресурсы подземных вод: современные проблемы изучения и использования: материалы междунар. научн. конф. к 100-летию со дня рождения Б.И. Куделина. – М.: МАКС Пресс, 2010. – С. 83-93.

20. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. – М.: ГЕОС, 2011. – 660 с.

21. Дрозд В.В. Анализ однородности гидрологических рядов. – Минск: 1985. – 40 с.

22. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 304 с.
23. Ефимович П.А. Вопросы водохозяйственных расчетов в гидрологии. – Л.: ОНТИ НКТП, 1936. – 320 с.
24. Жданова И.С., Раткович Д.Я. Автокорреляционные функции рядов годового стока и годового слоя осадков // Проблемы регулирования и использования водных ресурсов. – М.: Наука, 1973. – С.104-118.
25. Жук В.А., Скорняков В.А. Оценка синхронности многолетних колебаний годового стока на основе анализа корреляционной матрицы // Расчеты речного стока – М: Изд-во МГУ, 1989. – С. 7-21.
26. Зекцер И.С. Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. – М.: Научный мир, 2012. – 372 с.
27. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. – Л.: Гидрометиздат, 1968. – 378 с.
28. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные изменения водного режима рек бассейна Дона // Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление: сборник трудов первой открытой конференции Научно-образовательного центра. – М.: 2011. – С. 98-113.
29. Ковалевский В.С. Основы прогнозов естественного режима подземных вод. – М.: Строиздат, 1974. – 205 с.
30. Колпачева М.П. Об определении сезонного стока заданной обеспеченности при расчете внутригодового распределения стока рек ЦЧО//Сб. работ по гидрологии, 1970. – № 9. – С.62-70.
31. Комлев А.М. Закономерности формирования и методы расчета речного стока. – Пермь: Изд-во Пермского университета, 2002. – 163 с.
32. Коробкина Е.А. Пространственные закономерности годового стока рек Сибири и Дальнего Востока // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы Третьей Всерос. конференции с международным участием. – Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. – С. 399-403.

33. Кочерин Д.И. Низкие и наименьшие расходы воды на территории Европейской части СССР // Труды Московск. ин-та инженеров транспорта, 1929. – Вып.11. – С.67-85.
34. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф., Калинин Г.П., Быков В.Д. Об исследовании многолетних колебаний речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1967. – 125 с.
35. Крицкий С.Н. Гидрологические основы управления речным стоком. – М.: 1981. – 255 с.
36. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. – М.: 1982. – 271 с.
37. Кузнецова Л.П. Перенос влаги в атмосфере над территорией СССР. – М.: Наука, 1978. – 92 с.
38. Кумсиашвили Г.П. Регулирование речного стока. Методические разработки по курсу лекций «Водохозяйственные расчеты» – М.: Изд-во МГУ, 1987. – С.47.
39. Курдов А.Г. Минимальный сток рек. – Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1970. – 252 с.
40. Лобанова А.Г., Рождественский А.В. Пространственные корреляционные функции речного стока рек бассейна Днепра // Сборник работ по гидрологии, 1973. – №11. – С.93-113.
41. Лившиц И.М. Сезонное и месячное распределение стока на территории Полесья // Труды Ин-та мелиорации, водного и болотного хоз-ва АН БССР, 1955. – Т. 6. – С. 78-95.
42. Марков М.Л. Проблемы оценки естественных ресурсов подземных вод по гидрологическим данным в условиях изменения климата // Материалы межд.научн.конф. «Ресурсы подземных вод. Современные проблемы изучения и использования» – М.: 13-14 мая 2010 г. – С. 94-97.
43. Норватов А.М. Минимальный сток малых рек в связи с подземным питанием // Труды ГГИ, 1950. – Вып. 27 – С. 58-95.
44. Ордодворец П.Д. Минимальный сток рек на территории Азиатской части СССР // Тр. ГГИ, 1938. – Вып. 1. – С.102-119.

45. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СНиП 2.01 14-83. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.
46. Панов Б.П. Зимний режим рек СССР. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1960. – 240 с.
47. Пичугина С.В. Оценка вероятности возникновения экстремальных по маловодью ситуаций при эксплуатации водохранилищ сезонного регулирования (на примере Новосибирского гидроузла). Автореф. дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2009. – 20 с.
48. Поляков Б.В. Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на реках малых бассейнов. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 303 с.
49. Попов О.В. Подземное питание рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 290 с.
50. Распопов М.П. Районирование подземных вод равнины Европейской части СССР по условиям их стока в реки // Труды ГГИ, 1950. – Вып. 27. – С. 5-56.
51. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна. – М.: 1997. – 259 с.
52. Резниковский А.Ш., Великанов М.А., Костина С.Г. и др. Гидрологические основы гидроэнергетики / Под ред. А.Ш Резниковского. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 263 с.
53. Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – СПб: Нестор-История, 2010. – 62 с.
54. Сачок Г.И. Пространственно-временная структура гидрометеорологического режима Белоруссии и прилегающих районов. – Минск, 1980. – 221 с.
55. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М: Госстрой России, 2004. – 74 с.

56. Сибирцева Л.А. Минимальный сток и его распределение на территории Европейской части СССР // Исследование рек СССР. – Л.:1937. – Вып. 10. – С. 105-127.

57. Соколовский Д.Л. Применение кривых распределения к установлению вероятных колебаний годового стока рек Европейской части СССР. – Л.: Гостехиздат, 1930. – 77 с.

58. Сомов Н.В. Асинхронность колебаний стока крупных рек СССР // Метеорология и гидрология, 1963. – №5. – С. 14-21.

59. Сотникова Л.Ф. Совместный анализ наблюдений за максимальным стоком гидрологически однородных бассейнов различных районов СССР // Проблемы изучения и комплексного использования водных ресурсов. – М.: Наука, 1978. – С.17-24.

60. Стеженская И.Н. Сезонный сток рек Западно-Сибирской равнины. – Л.:1971. – 67 с.

61. Тихоцкий К.Г. О перемерзании рек Забайкалья // Проблемы регионального зимоведения. – Чита, 1968. – Вып. 2. – С.73-76.

62. Урываев В.А. Обеспеченность расходов в году рек Европейской части СССР//Труды НИУ ГУГМС.Сер.4,1941. – Вып.2. – С. 53-71.

63. Филиппова И.А. Анализ пространственной структуры полей минимального стока в условиях изменяющегося климата // Труды Международной научно-практической конференции (28мая-30 мая 2013, г. Пермь) «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов». – Т. 1 «Управление водными ресурсами. Гидро- и геодинамические процессы». – С. 113-116.

64. Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Нестеренко Д.П., Повалишников Е.С. Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях изменяющегося климата // Водное хозяйство России, 2013. – № 6. – С.32-49.

65. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 168 с.

66. Чеботарев Н.П. Теория и метод определения минимального стока // Труды Всесоюз. Совещ. по изучению стока, регулированию стока и зимнему

режиму. – М., 1954. – С. 34-38.

67. Чемеренко Е.П. Объективный анализ и статистическая структура характеристик снежного покрова // Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – Т. 7. – С.180-189.

68. Шевелев М.Э. Метод расчета обеспеченных минимумов речного стока // Метеорология и гидрология», 1937. – № 8 – С. 31-39.

69. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Бабкин В.И., Балонишникова Ж.А. Проблемы изучения формирования и оценки изменений водных ресурсов и водообеспеченности России // Метеорология и гидрология, 2010. – № 1. – С. 23-32.