

---

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ**

**«РОСАТОМ»**

---

**САМОРЕГУЛИРУЕМАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ**

**АССОЦИАЦИЯ**

**ОБЪЕДИНЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИЙ, ВЫПОЛНЯЮЩИХ ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ ПРИ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ, СТРОИТЕЛЬСТВЕ,  
РЕКОНСТРУКЦИИ, КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

**«СОЮЗАТОМГЕО»**

---

**Утвержден**

решением Совета

СРО «СОЮЗАТОМГЕО»

Протокол № 05/02-2018 от 09.02.2018 года

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**

**ОБЪЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ**

**Определение расчетных характеристик минимального стока  
рек – источников технического водоснабжения АС с учетом  
климатических изменений. Общие требования**

**СТО СРО-Г 60542954 00018-2018**

**Москва 2018**

## **Предисловие**

- 1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Центр технических компетенций атомной отрасли» (ООО «ЦТКАО»)
- 2 УТВЕРЖДЁН Протоколом Совета СРО «СОЮЗАТОМГЕО» № 05/02-2018 от 09.02.2018 г.
- 3 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространён в качестве официального издания без разрешения Госкорпорации «Росатом» и СРО «СОЮЗАТОМГЕО»

## Содержание

1 Область применения.....	1
2 Нормативные ссылки .....	1
3 Термины и определения .....	2
4 Сокращения.....	5
5 Общие положения .....	6
6 Определение расчётных гидрологических характеристик на основе обработки нестационарных гидрологических рядов .....	6
7 Определение характеристик минимального стока рек с учётом вероятностных изменений климата .....	11
Приложение А (справочное) Результаты анализа данных климатических изменений минимального стока.....	14
Приложение Б (рекомендуемое) Оценка параметров логарифмического распределения Пирсона III типа.....	20
Приложение В (справочное) Оценка климатических изменений и колебания минимального стока рек бассейна р. Волги.....	24
Библиография .....	33

## Введение

Для оценки достаточности водных ресурсов рек - источников технического водоснабжения атомных станций важное значение имеет получение достоверных гидрологических характеристик маловодного периода года (межени).

Требования настоящего стандарта разработаны на основе результатов обработки данных наблюдений за минимальным стоком зимней и летней межени на незарегулированных средних и малых реках Волжского бассейна с привлечением метеорологической информации о среднемесячных наземных температурах воздуха, полученных Институтом водных проблем РАН (научный руководитель – д.т.н. М.В. Болгов) и Государственным гидрологическим институтом (научный руководитель – д.г.н., проф. В.Ю. Георгиевский).

Анализ изменения минимального стока межени на реках Волжского бассейна показал, что с начала восьмидесятых годов двадцатого века в регионе сформировался новый, условно-стационарный режим многолетних колебаний меженного стока, отражающий современные изменения климата.

В настоящем стандарте содержатся требования и рекомендации по практическому применению стохастических моделей и методов расчетов в случае нестационарного характера многолетних колебаний меженного стока при учёте климатических изменений гидрологического режима.

Установлено, что характер колебаний меженного стока позволяет аппроксимировать нестационарный временной ряд последовательностью условно-стационарных состояний (участков), смена которых определяется происходящими климатическими изменениями.

В качестве математического вероятностного аппарата использовалась Байесовская методология решения статистических задач с применением стандартных статистических приёмов обработки информации для условно-стационарных периодов.

Необходимой исходной информацией для расчетов являлись данные многолетних наблюдений за стоком и сценарные оценки изменения климата в виде прогнозируемых приращений температуры воздуха за расчётный период.

Выявлено, что на исследуемой территории бассейна р. Волги температура воздуха за зимний период является основным стокообразующим фактором, влияющим на изменения величины минимального стока зимней и летней межени.

Результаты проведенных расчетов показали, что в период с 1960 по 2010 года для температуры воздуха за зимний период характерен статистически значимый положительный линейный тренд практически на всей территории бассейна р. Волги. Вследствие отмеченных климатических изменений увеличивается сумма положительных температур и число дней с положительными температурами воздуха, непосредственно влияющих на минимальный сток зимней межени.

В основу предлагаемой в настоящем стандарте методики прогноза положена корреляционная связь изменений меженного стока и приращений температуры воздуха по отношению к средней температуре за условно-стационарный период 1960 – 1978 годов. Прогноз меженного стока предлагается получать в соответствии с будущими изменениями зимней температуры воздуха по отношению к стоку этого опорного климатического периода.

Стандарт разработан с учетом требований международных

норм и правил, нормативных правовых актов Российской Федерации, федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, национальных стандартов, сводов правил, стандартов СРО «СОЮЗАТОМГЕО» и других документов по стандартизации в части определения расчетных гидрологических характеристик стока рек, которые характеризуются слабой изученностью (недостаточной продолжительностью или отсутствием репрезентативности рядов режимных гидрометрических наблюдений), включая:

- статью 15 части 1 Федерального закона № 384-ФЗ [1] в части учета общих требований к достоверности результатов инженерных изысканий, достаточных для подготовки проектной документации;

- СТО СРО-Г 60542954 00010-2015 [2] в части учета требований к научному сопровождению инженерных изысканий при оценке достаточности водных ресурсов для технического водоснабжения атомных станций;

- пункт 4.12 СП 33-101-2003 в части моделирования рядов сезонных (месячных) значений стока на основе использования стохастических моделей различной степени сложности с учетом зависимости внутригодового распределения стока от водности года при проектировании водохозяйственных объектов.

Применение рекомендуемой в стандарте методики позволяет в нестационарном случае устанавливать параметры кривых обеспеченности минимального (меженного) стока рек на прогнозируемый период до 2030 года.

Стандарт следует использовать при проведении инженерно-гидрометеорологических изысканий для получения достоверных результатов, достаточных для подготовки проектной документации на всех стадиях проектирования.

## **1 Область применения**

1.1 Настоящий стандарт «Объекты использования атомной энергии. Определение расчётных характеристик минимального стока рек – источников технического водоснабжения АС с учётом климатических изменений» (далее - Стандарт) устанавливает общие требования к определению расчётных характеристик минимального (меженного) стока рек на основе аппроксимации нестационарных временных рядов последовательностью условно-стационарных состояний, смена которых определяется современными изменениями климата.

1.2 Стандарт распространяется на определение расчётных характеристик минимального стока средних и малых рек с естественным режимом и выраженным зимним или летним меженным периодом при инженерно-гидрометеорологических изысканиях в РФ и за рубежом.

1.3 Стандарт не распространяется на определение расчётных гидрологических характеристик рек с паводочным режимом Черноморского побережья Кавказа, Приморского края РФ и других, включая зарубежных, территорий.

## **2 Нормативные ссылки**

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы по стандартизации:

ГОСТ Р 50779.10-2000 «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения»;

СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по опубликованным в текущем году выпускам ежемесячно издаваемого информационного указателя «Национальные стандарты». Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт (документ) на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Сведения о действии сводов правил могут быть проверены в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

### **3 Термины и определения**

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

#### **3.1 ансамблевые проекции показателей климата:**

Одновременный учет в расчетах нескольких показателей климата: температуры воздуха (средняя годовая, января и июля), преобладающее направление ветров, годовое количество осадков и других климатических показателей.

**3.2 апостериорное распределение:** Условное распределение вероятностей какой-либо случайной величины при некотором условии, рассматриваемое в противоположность ее безусловному или априорному распределению.

**3.3 априорное распределение:** Распределение вероятностей неопределённой величины, отражающее (в байесовской идеологии) имеющиеся предположения до поступления экспериментальных данных.

**3.4 Байесовский подход к статистическому оцениванию:** Подход к оцениванию неизвестного параметра, предполагающий, наряду с информацией, извлекаемой из выборки, использование дополнительной априорной информации об оцениваемом параметре.

**3.5 Байесовское прогнозирование:** Метод вероятностного прогнозирования, основанный на применении формулы Байеса.

**3.6 вероятностный прогноз:** Прогноз, в котором указывается вероятность осуществления прогнозируемого явления или состояния.

**3.7 доверительный интервал:** Интервал, который покрывает неизвестный параметр с заданной надёжностью.

**3.8 достоверные результаты прогноза:** Результаты такого прогноза, который с установленной вероятностью позволяет перенести результаты прогноза (исследования), полученные на основе выборочной совокупности, на генеральную совокупность или другие исследования (прогноз).

### 3.9

**достоверные результаты (характеристики):** Результаты (характеристики), эмпирически подтверждённые специальными экспериментами (расчётами) или другой общественно-производственной практикой, не требующие дополнительной проверки.

[СТО СРО-Г 60542954 00010 -2016, пункт 3.9, [2]]

**3.10 источник технического водоснабжения:** Природный или искусственный поверхностный водоём (море, озеро, водохранилище),

водоток (ручей, река) или подземные воды, обеспечивающие забор необходимого для технического или хозяйственно-пищевого водоснабжения количества воды в течение длительного времени.

### 3.11

**малая река:** река, бассейн которой располагается в одной географической зоне и гидрологический режим ее свойственен для рек этой зоны.

[ГОСТ19179-73, пункт 26, [3]]

**3.12 межень:** Маловодная фаза водного режима рек, которая характеризуется малой водностью и продолжительным стоянием низкого уровня воды в одни и те же сезоны гидрологического года.

**3.13 нестационарный случайный процесс:** Случайный процесс, вероятностные характеристики которого меняются со временем.

**3.14 опорный климатический период:** Период наблюдений за гидрометеорологическими характеристиками с 1979 по 2010 годы, принятый в расчетной модели в качестве опорного.

### 3.15

**паводок:** Фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года, характеризуется интенсивным, обычно кратковременным увеличением расходов и уровней воды, и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей.

[ГОСТ19179-73, пункт 73, [3]]

**3.16 период средних климатических условий:** Период с 1961 по 1990 годы, принятый Всемирной метеорологической организацией в качестве периода среднего климата.

### 3.17

**половодье:** Фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и

длительным подъемом уровня воды, вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и ледников.

[ГОСТ19179-73, пункт 72, [3]]

**3.18 реки с паводочным режимом:** реки, в гидрологическом режиме которых отсутствует выраженная фаза половодья, а многоводный период совпадает с периодом прохождения паводков.

### 3.19

**распределение (вероятностей):** Функция, определяющая вероятность того, что случайная величина примет какое-либо заданное значение или будет принадлежать заданному множеству значений.

[ГОСТ Р 50779.10-2000, пункт 1.3]

### 3.20

**средняя река:** Река, бассейн которой располагается в одной географической зоне и гидрологический режим её свойственен для рек этой зоны.

[ГОСТ19179-73, пункт 26, [3]]

**3.21 сумма распределений:** Способ построения закона распределения двух и более независимых случайных величин, который может быть представлен, как сумма плотностей вероятностей/

**3.22 условно-стационарный период:** Часть последовательности данных наблюдений за процессом, которую можно рассматривать в качестве реализации стационарного процесса.

## 4 Сокращения

В настоящем стандарте приняты следующие сокращения:

АС	-	атомные станции;
ЛРП	-	логарифмическое распределение вероятностей Пирсона III типа;
СТВ	-	система технического водоснабжения.

## **5 Общие положения**

5.1 Определение расчетных характеристик минимального стока рек при наличии нестационарных гидрологических рядов следует проводить на основе использования следующих методических подходов к аппроксимации законов распределения вероятностей:

- 1) путём построения закона распределения на основе суммы двух плотностей;
- 2) с помощью Байесовского подхода к статистическому оцениванию.

5.2 Определение характеристик минимального стока рек с учётом вероятностных изменений климата следует проводить с использованием сценарных расчётов температуры воздуха в зимний и летний меженные периоды.

## **6 Определение расчётных гидрологических характеристик по нестационарным гидрологическим рядам**

### **6.1 Построение закона распределения на основе суммы двух плотностей**

6.1.1 В нестационарном случае, при наличии в одной выборке случайных величин, имеющих разные механизмы формирования (различное происхождение), для расчетов следует использовать вероятностную модель, основанную на построении закона распределения исследуемой характеристики в виде суммы двух законов распределения, где каждое слагаемое имеет определенный вес, зависящий от продолжительности условно-стационарного периода.

6.1.2 При расчетах следует анализировать временной ряд значений минимальной водности, состоящий из двух условно-однородных участков, для каждого из которых эмпирическая кривая обеспеченности удовлетворительно аппроксимируется одним из стандартных законов распределения, а расчётная кривая обеспеченности для всего ряда строится как сумма двух законов распределения с весами, пропорциональными длинам выборок.

6.1.2.1 Для плотности распределения  $f(x)$  и кривой обеспеченности  $P(x)$  следует использовать следующие выражения:

$$f(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) \quad (6.1)$$

$$P(x) = 1 - \int_0^x f(x) dx = 1 - \int_0^x [\lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x)] dx \quad (6.2)$$

где  $f_1(x)$  – закон распределения (плотность) для первого условно-однородного периода;

$f_2(x)$  – то же для второго условно-однородного периода;

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – весовые коэффициенты, определяемые в следующем виде:

$$\lambda_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2}, \quad \lambda_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2}, \quad (6.3)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – продолжительность (длина ряда) первого и второго условно однородного периода соответственно.

6.1.2.2 В других случаях допускается задать  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и из других соображений, но для сохранения вероятностного смысла формулы (6.3) необходимо выполнение условия:

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1. \quad (6.4)$$

6.1.3 Для аппроксимации  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$  следует использовать логарифмическую модификацию распределения вероятностей Пирсона III типа, приведенную в приложении Б. При этом оценка параметров распределения (6.1) должна сводиться к отдельному оцениванию параметров для каждой компоненты стандартными методами, приведенными в своде правил СП 33-101.

Расчётная кривая обеспеченности должна строиться путём численного интегрирования (6.2) при всех известных параметрах отдельных компонент и заданных весовых коэффициентов.

Примеры аппроксимации кривых обеспеченности минимального стока в нестационарном случае на основе смеси распределений для рек Волжского бассейна приведены на рисунке А.1 (приложение А), а результаты обработки данного ряда - в таблице А.1 (приложение А).

## **6.2 Байесовский подход к статистической оценке характеристик минимального стока рек в нестационарном случае**

6.2.1 Определение расчетных гидрологических характеристик в нестационарных условиях при реализации Байесовского подхода должно основываться на построении прогнозной (расчетной) плотности распределения их вероятностей на основе формулы полной вероятности:

$$\pi(x) = \int_{\theta} P(x, \theta) \cdot p(\theta/x) d\theta, \quad (6.5)$$

где – вероятностная модель стока в стационарных условиях,

$p(\theta/x)$  – распределение параметра  $\theta$ , учитывающее нестационарный характер процесса.

6.2.2 При расчетах гидрологических характеристик следует принимать, что система может находиться только в двух состояниях прогнозируемого процесса колебаний стока, с соответствующими вероятностями  $n_1/N$  и  $n_2/N$  в одном из них. (Здесь  $N = n_1 + n_2$  – общая продолжительность неоднородной выборки). В таком случае следует учитывать, что:

а) апостериорная плотность математического ожидания (параметра  $\theta$ ) прогнозируемого процесса является смесью двух выборочных распределений:

$$p(\theta/x) = \frac{n_1}{N} \cdot \eta_1(\theta, n_1) + \frac{n_2}{N} \eta_2(\theta/x), \quad (6.6)$$

где  $\eta_1(\theta, n_1)$  – выборочное распределение среднего (математического

ожидания) для первого условно-стационарного участка длиной  $n_1$ ,

,

$\eta_2(\theta, n_2)$  – выборочное распределение  $\theta$  для новых климатических

условий (участка ряда длиной  $n_2$ ).

б) апостериорная плотность (6.6) является в общем случае двухмодальной, поскольку выборочное распределение математического ожидания для каждой компоненты является гауссовским.

6.2.3 Выборочные свойства параметров кривой распределения вероятности характеристик минимального стока следует оценивать в соответствии с рекомендациями свода правил СП 33-10.

6.2.4 Для получения байесовской оценки следует определить прогнозную (расчетную) плотность по формуле полной вероятности (6.5). В этом случае смесь распределений (6.6) является апостериорным распределением параметра  $\theta$ , а модельным распределением будет двух-параметрическое гамма-распределение с параметром  $\gamma$ , равным среднему значению для обеих выборок (стационарных частей):

$$\pi(y) = \int_{\theta} P(y, \gamma, \theta) \cdot \tilde{p}(\theta/x) d\theta, \quad (6.7)$$

6.2.4.1 При формировании модели расчета следует принимать, что прогнозная плотность распределения  $\pi(y)$  не является гамма-распределением и вычисляется путем численного интегрирования уравнения (6.7). Если асимметрия распределения  $C_s/C_v$  изучаемой характеристики стока существенно отличается от двух, то рекомендуется использовать трехпараметрическое распределение, а именно логарифмическую модификацию распределения Пирсона III типа (приложение Б).

6.2.4.2 При составлении программы расчета следует процедуру повторить еще раз, записав уравнение (6.6) для трех компонент, если

система перейдет в третье состояние, отличающееся от двух предыдущих.

## **7 Определение характеристик минимального стока рек с учётом вероятностных изменений климата**

### **7.1 Прогноз минимального стока с использованием сценарных расчётов температуры воздуха**

7.1.1 Для определения расчетных характеристик минимального (меженного) стока рек с учетом современных изменений климата следует использовать сценарные расчеты приземной температуры воздуха.

7.1.2 В стандартных климатических прогнозных сценариях следует рассчитывать аномалии характеристик по отношению к норме, определенной по данным наблюдений в период средних климатических условий. Для перехода от аномалий к абсолютным величинам температур, рассчитанные аномалии должны накладываться на норму для установления превышения температуры воздуха прогнозируемого периода над средней температурой воздуха за период 1979- 2010 годов.

7.1.3 . Значения искомым приращений температуры воздуха следует представлять в узлах регулярной сетки в виде карты для расчетного бассейна. Полученные результаты по модельным расчетам значения аномалий температуры для прогнозного периода (2011-2030 гг.), которые относятся к периоду средних климатических условий (1960-1990 гг.) приведены в разделе А.2 (приложение А).

### **7.2 Прогнозные оценки характеристик климата на основе использования ансамблевых проекций показателей климата**

7.2.1 При учете прогнозных оценок характеристик климата следует:

– использовать ансамблевые проекции показателей климата, полученные осреднением результатов расчётов по большому числу моделей;

– учитывать, что расчетные величины, установленные по отдельным моделям, подвержены сильному влиянию случайных ошибок, которые устраняются при осреднении результатов расчетов по нескольким моделям.

7.2.2 Для уменьшения неопределённости проекции показателей, все модели циркуляции атмосферы должны тестироваться на способность воспроизводить выбранную климатическую характеристику, после должна составляться ансамблевая проекция на основе тех моделей, которые продемонстрировали хорошее воспроизведение выбранной характеристики.

7.2.3 Полученные по модельным расчетам значения аномалий температуры для прогнозного расчетного периода до 2030 гг. следует относить к ссылочному периоду среднего климата (1961-1990 гг.).

7.2.4 За критерий применимости принятой модели расчета (методики) следует принимать превышение средней температуры воздуха прогнозируемого периода над средней температурой воздуха за опорный климатический период.

7.2.5 Для разработки оригинальной модели расчетов по заданному водотоку следует использовать результаты модельных расчетов для рек бассейна р. Волги, которые приведены в разделе А.2 (приложение А).

### **7.3 . Методика прогноза минимального стока в условиях неопределенности климатических изменений**

7.3.1 Для преодоления высокой неопределенности прогнозов долгосрочных изменений климата следует проводить осреднение различных вариантов модельных расчетов.

7.3.2 Для оценок на региональном уровне должны отбираться несколько сценариев, принимаемых в качестве наиболее вероятных.

7.3.3 Примеры результатов применения методики прогноза минимального (меженного) стока в условиях неопределенности климатических изменений, которые приведены в разделе В.2 (приложение В), в качестве справочного материала.

## Приложение А (справочное)

### Результаты анализа данных климатических изменений минимального стока

#### А.1 Аппроксимации кривых обеспеченностей минимального стока в нестационарном случае

Пример аппроксимации кривых обеспеченности минимального стока в нестационарном случае на основе смеси распределений для р. Чусовая, пгт Староуткинск приведены на рисунке А.1 (ось ординат –  $Q$ , расход воды в  $\text{м}^3/\text{с}$ , ось абсцисс –  $P$ , обеспеченность в %), а результаты обработки данного ряда в таблице А.1 ( $N$  – число лет наблюдений;  $Q_{\text{ср}}$  - средний минимальный расход воды за 30 суток. в  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $C_v$  – коэффициент вариации,  $C_s$  – коэффициент асимметрии).

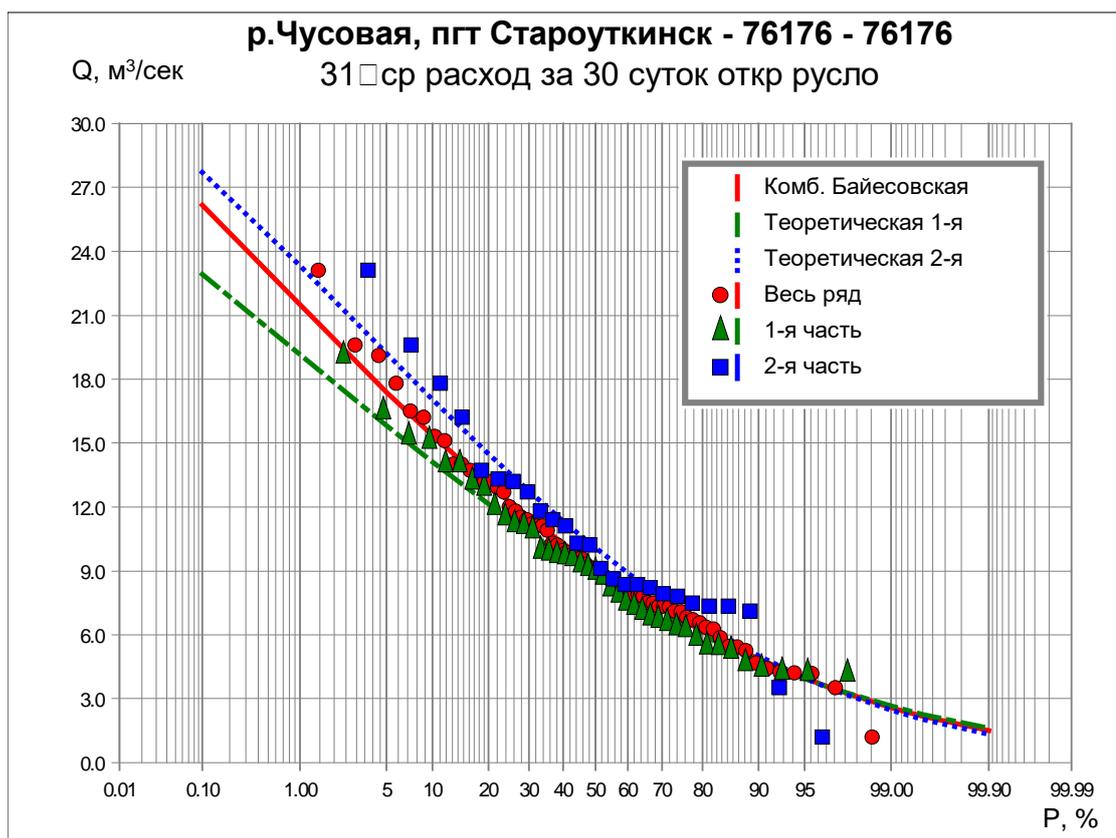


Рисунок А.1 – Кривые обеспеченности минимального стока (р.Чусовая – пгт Староуткинск)

Таблица А.1– Статистические характеристики 30-суточного минимального стока р. Чусовая, пгт Староуткинск за зимний период

Весь период наблюдений				до 1978				после 1978			
N	Q <sub>ср.</sub> , М <sup>3</sup> /с	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	N	Q <sub>ср.</sub> , М <sup>3</sup> /с	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	N	Q <sub>ср.</sub> , М <sup>3</sup> /с	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>
67	9,74	0,43	0,75	41	9,17	0,4	0,61	26	10,6	0,44	0,61

## А.2 Результаты модельных расчетов значений аномалий температуры воздуха для прогнозного периода (2011-2030 гг.)

Значения искомым приращений температуры воздуха представлены в узлах регулярной сетки в виде карты для бассейна р. Волги (рисунок А.2).

По полученным значениям, которые характеризуют приращения температуры будущего климата на период 2011 – 2030 гг. по отношению к опорному климатическому периоду(1979–2010 гг.), определяются изменения стока на прогнозный климатический период.

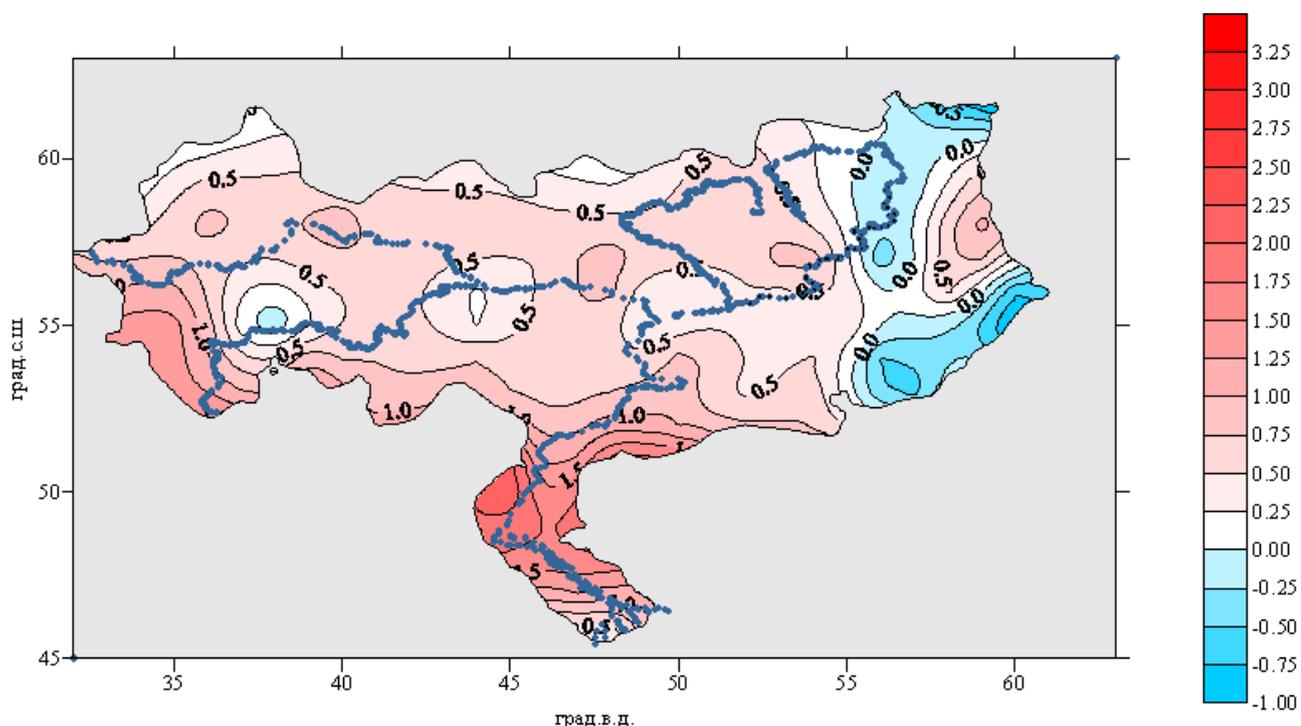


Рисунок А.2 – Приращения прогнозной температуры на 2011 – 2030 гг. по отношению к опорному климатическому периоду 1979–2010 гг.

### А.3 Оценка климатических изменений минимального стока

А.3.1 В результате исследований установлено, что на исследуемой территории в современный период из всех стокообразующих факторов только температура воздуха за зимний период характеризуется существенными изменениями, которые могут быть причиной увеличения минимального (меженного) стока.

Вследствие роста зимней температуры увеличивается сумма положительных температур и число дней с положительными температурами воздуха, непосредственно влияющие на минимальный сток зимней межени. Для температуры воздуха за зимний период получен статистически значимый при 5% уровне положительный линейный тренд в период с 1960 по 2010 гг. практически на всей территории бассейна Волги (рисунок А.3).

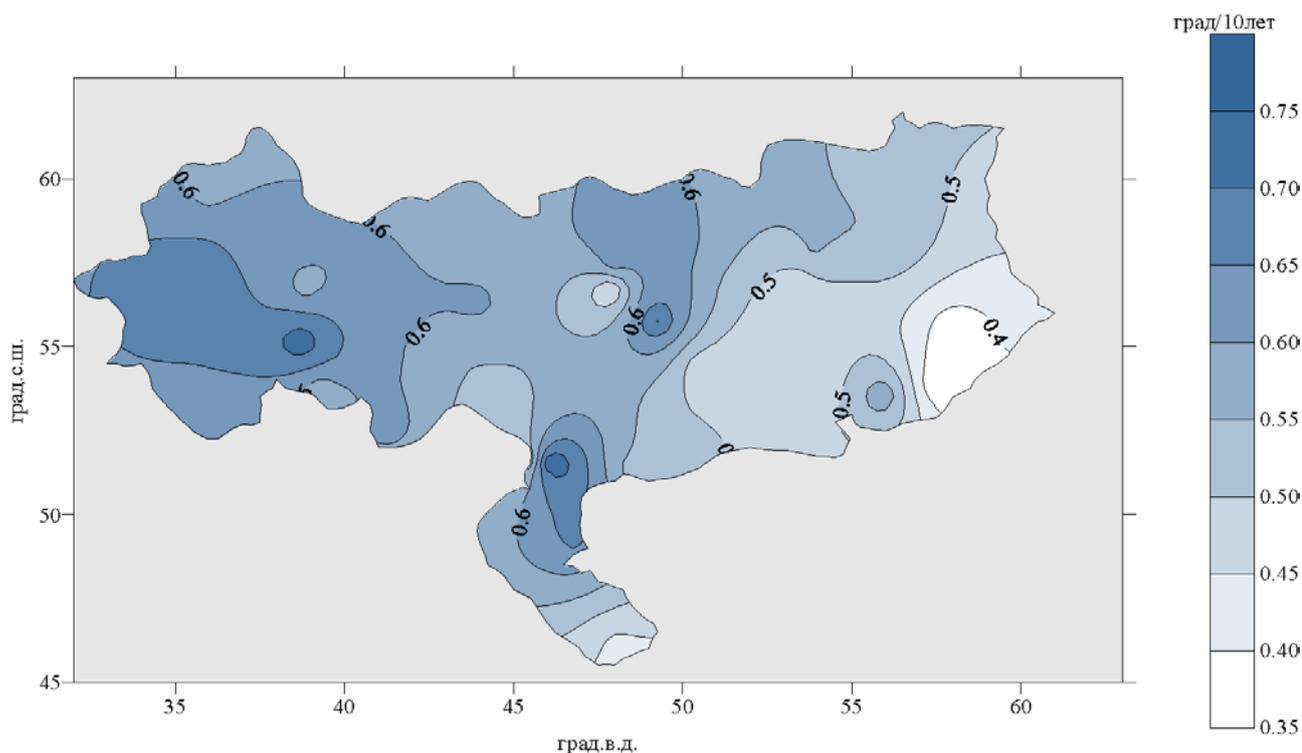
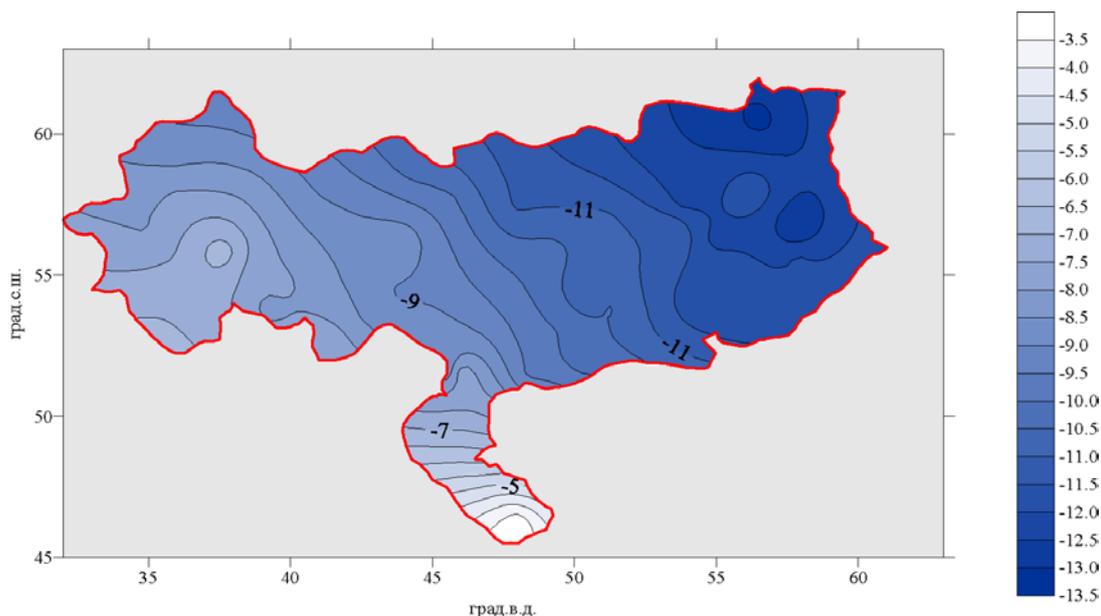


Рисунок А.3 – Коэффициенты линейного тренда зимней температуры воздуха,  $^{\circ}\text{C}/10$ ,лет за период с 1960 по 2010 гг. (декабрь – март)

А.3.2 Для оценки произошедших изменений климата в бассейне Волги получены карты приземных температур воздуха за зимние месяцы (с декабря по март), осредненных за период с 1960 по 1978 годы, а также карта их приращений за период с 1978 по 2010 годы, приведенная на рисунке А.4.

А.3.2.1 В основу методики прогноза положена корреляционная связь изменений меженного стока и приращений температуры воздуха по отношению к средней температуре за условно-стационарный период 1960 – 1978 гг. В связи с этим прогноз меженного стока предлагается получать в соответствии с будущими изменениями зимней температуры воздуха по отношению к стоку этого опорного климатического периода.

а)



б)

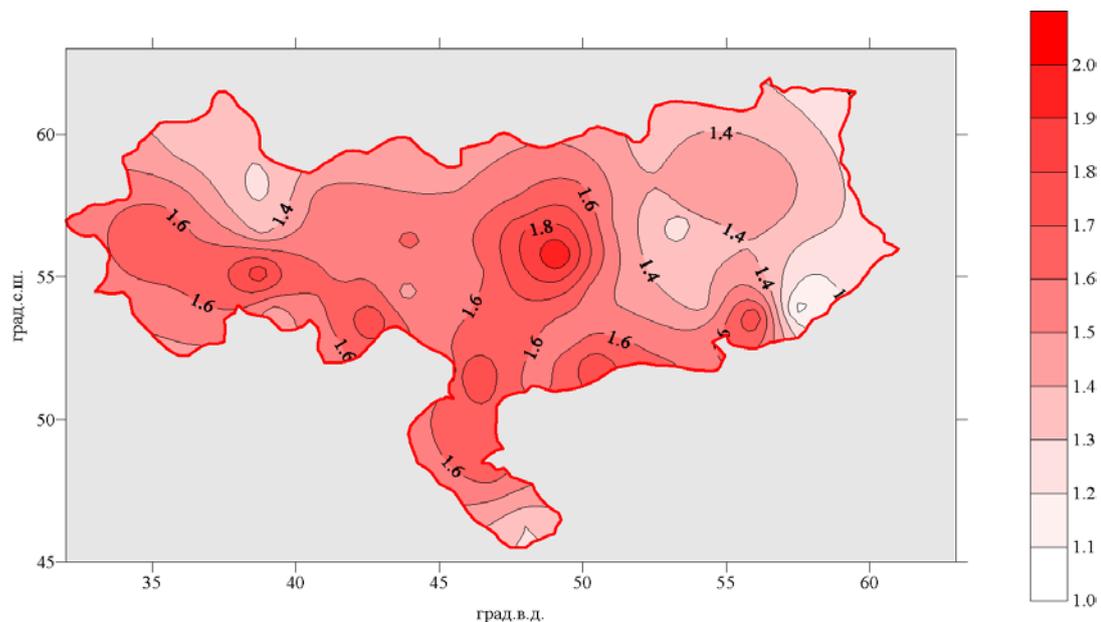


Рисунок А.4 – Средняя температура воздуха зимних месяцев (с декабря по март) за период с 1960 по 1978 годы (а) и приращения к ней за период с 1979 по 2010 годы (б).

А.3.2.2 Для выполнения прогнозов межennaleго стока были использованы сценарные расчеты температуры воздуха. В стандартных климатических сценариях прогноза рассчитываются аномалии характеристик по отношению к нормам, определенным по данным наблюдений за период 1961–1990 годы, принятый Всемирной Метеорологической Организацией в качестве периода средних климатических условий. Для перехода от аномалий

к абсолютным величинам температур, рассчитанные аномалии накладываются на нормы, вычисленные по данным наблюдений.

Результаты данных расчетов приведены на рисунке А.5.

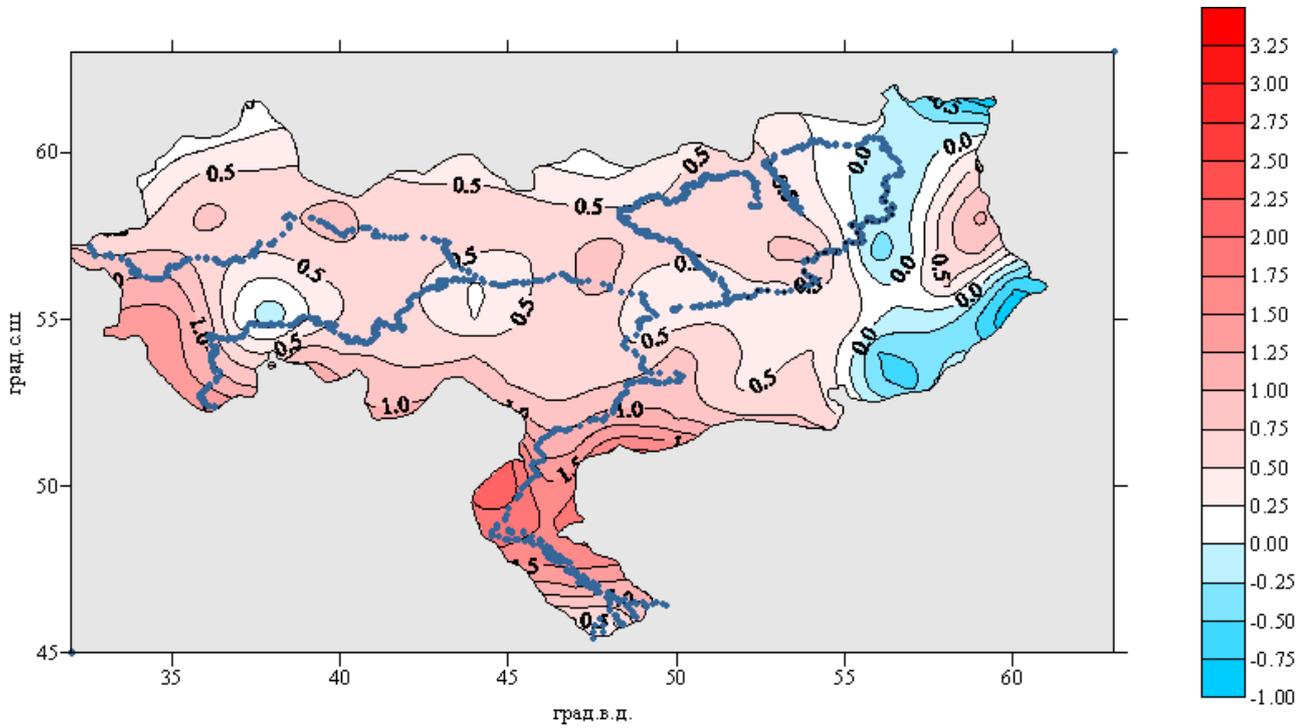


Рисунок А.5 – Приращения прогнозной температуры на 2011 – 2030 гг. по отношению к опорному климатическому периоду 1979–2010 гг.

## Приложение Б (рекомендуемое)

### Оценка параметров логарифмического распределения Пирсона III типа

#### Б.1 Основные свойства ЛРП

Случайная величина  $x$  имеет логарифмическое распределение вероятностей Пирсона III типа, если  $y = \log_a x$  распределено по закону Пирсона III типа (совпадающему с гамма-распределением при  $C_s = 2C_v$ ). В общем случае ЛРП получается из распределения Пирсона III типа заменой переменной на ее логарифм по основанию  $a$ :

$$f(x; \alpha, b, m) = \frac{\lambda |\alpha|}{\Gamma(b)_x} [\alpha(\log_a x - m)]^{b-1} \exp[-\alpha(\log_a x - m)], \quad (\text{Б.1})$$

где  $\alpha, b, m$  – параметры масштаба, формы и сдвига (положения), соответственно,

$b > 0, \alpha \neq 0, \Gamma(b)$  – гамма-функция,

константа  $\lambda$  зависит от основания логарифма  $a$ , так что  $\lambda = \log_a e = (\ln a)^{-1}$  (предполагается  $a > 1$  и, соответственно,  $\lambda > 0$ ), и таким образом для десятичного логарифма  $\lambda = \log_{10} e = 0,434$ , для натурального  $\lambda = \ln e = 1$ .

При  $m = 0$  ЛРП совпадает с логарифмическим гамма-распределением.

Плотность вероятностей ЛРП для случая натурального логарифма задается функцией вида:

$$f(x; \alpha, b, m) = \frac{|\alpha|}{\Gamma(b)_x} [\alpha(\ln x - m)]^{b-1} \exp[-\alpha(\ln x - m)]. \quad (\text{Б.2})$$

Соотношения между параметрами ЛРП и моментами логарифмов исходного ряда имеют вид:

$$\alpha = \frac{2}{C_{s_{\ln}} \sigma_{\ln}}, b = \frac{4}{C_{s_{\ln}}^2}, m = M_{\ln} - \frac{2\sigma_{\ln}}{C_{s_{\ln}}}, \quad (\text{Б.3})$$

где  $M_{\ln}$ ,  $\sigma_{\ln}$  и  $C_{s_{\ln}}$  – математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение и асимметрия ряда натуральных логарифмов исходных величин, соответственно.

Из (6.3) следует, что, если асимметрия логарифмов исходного ряда близка к нулю, то имеет место лог-нормальное распределение, и в таком случае параметры (6.3) перестают существовать. Область определения функции (Б.2) ограничена, в зависимости от коэффициентов вариации и асимметрии ЛРП, следующим образом:

$$\text{при } C_{s_x} < C_{vx}^3 + 3C_{vx} \quad \alpha < 0, 0 < x \leq e^m, \quad (\text{Б.4})$$

$$\text{при } C_{s_x} \geq C_{vx}^3 + 3C_{vx} \quad \alpha > 0, e^m \leq x < \infty, \quad (\text{Б.5})$$

где  $C_{s_x}$  и  $C_{vx}$  – коэффициенты вариации и асимметрии ЛРП (т.е. исходного ряда).

## Б.2 Оценка параметров ЛРП методом моментов

Начальные моменты ЛРП  $k$ -го порядка определяются по формуле (Б.6):

$$\beta_k = \int_D x^k f(x) dx, \quad (\text{Б.6})$$

где  $f(x)$  – плотность распределения, задаваемая выражением (Б.2) для натурального логарифма.

Если  $\alpha < 0$ , момент  $\beta_k$  всегда определен, если  $\alpha > 0$ , то момент  $\beta_k$  определен до порядка  $k < \alpha$  и задается формулой (Б.7):

$$\beta_k = e^{mk} \left(1 - \frac{k}{\alpha}\right)^{-b}. \quad (\text{Б.7})$$

Центральные моменты  $\mu_k$  находятся из соотношения

$$\mu_k = \sum_{i=0}^k C_k^i (-1)^i \beta_{k-i} \beta_1^i. \quad (\text{Б.8})$$

Коэффициенты вариации и асимметрии определяются по формулам

$$C_s = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}}, \quad C_v = \frac{\mu_2^{1/2}}{\mu_1} \quad (\text{Б.9})$$

Определив из (Б.7) логарифмы первых трех моментов, получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} \ln \beta_1 &= m - b \ln(1 - 1/\alpha), \\ \ln \beta_2 &= 2m - b \ln(1 - 2/\alpha), \\ \ln \beta_3 &= 3m - b \ln(1 - 3/\alpha), \end{aligned} \quad (\text{Б.10})$$

где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – начальные моменты, определенные по натурным рядам наблюдений.

После несложных преобразований из (Б.10) получим систему уравнений для определения параметров  $b$ ,  $m$  и  $\alpha$ , которая решается численно:

$$b = \frac{\ln \beta_2 - 2 \ln \beta_1}{2 \ln \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) - \ln \left(1 - \frac{2}{\alpha}\right)}, \quad (\text{Б.11})$$

$$m = \ln \beta_1 + b \ln \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), \quad (\text{Б.12})$$

$$\Phi(\alpha) = \frac{2 \ln(1 - 1/\alpha) - \ln(1 - 2/\alpha)}{3 \ln(1 - 1/\alpha) - \ln(1 - 3/\alpha)} - \frac{\ln \mu_2 - 2 \ln \mu_1}{\ln \mu_3 - 3 \ln \mu_1} = 0. \quad (\text{Б.13})$$

## Приложение В (справочное)

### Оценка климатических изменений и колебания минимального стока рек бассейна реки Волги

#### В.1 Оценка климатических изменений минимального стока зимней межени

В бассейне р. Волги по результатам исследований выделены 2 района с различными датами смены фазы водности (рисунок В.1-В.2).

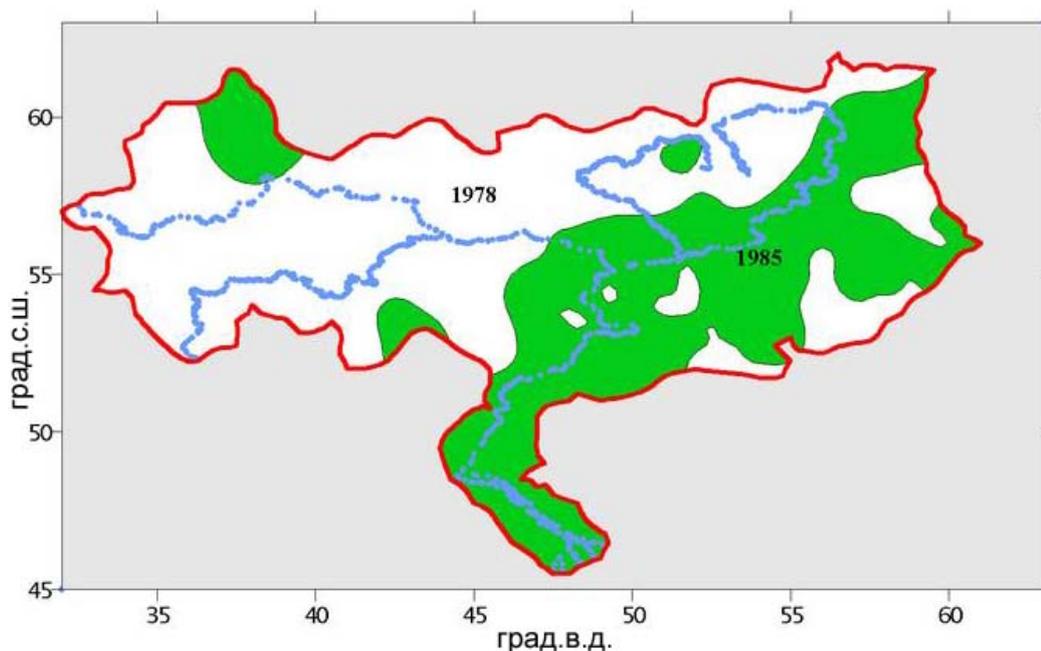


Рисунок В.1 – Схема распределения по территории бассейна р. Волги даты нарушения стационарности в рядах минимального стока за зимний период.

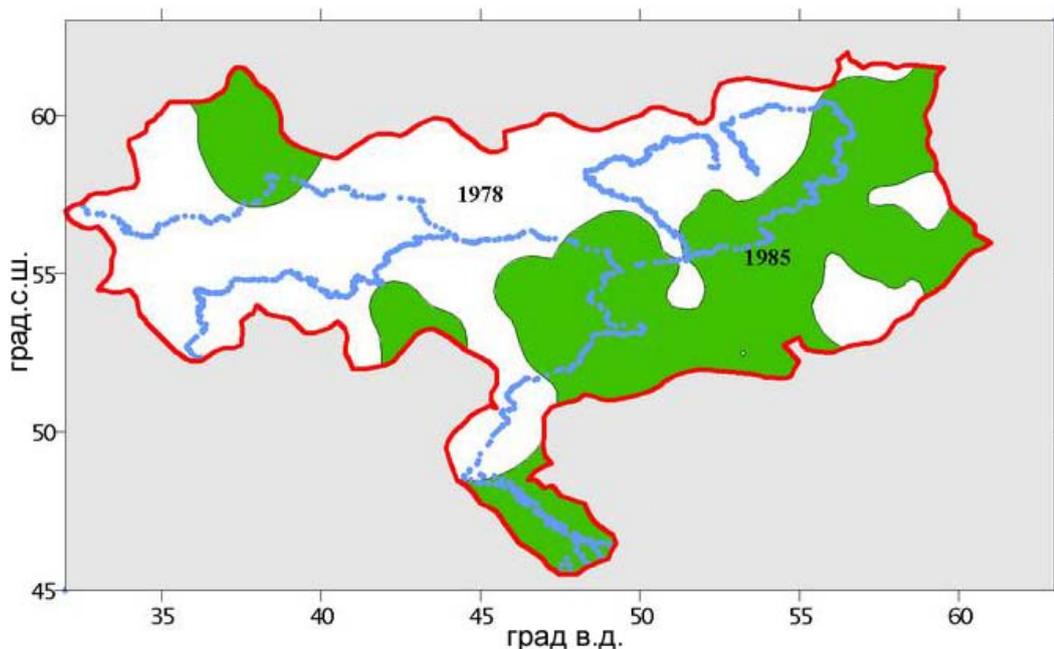


Рисунок В.2 – Схема распределения по территории бассейна р. Волги даты нарушения стационарности в рядах минимального стока за период открытого русла.

Дальнейшая обработка заключается в получении статистических характеристик полных рядов и их условно-однородных частей: средний многолетний расход, коэффициенты вариации и асимметрии. Для рассматриваемых рек была выполнена оценка изменения характеристик минимального стока по отношению к таким же характеристикам за предшествующий период, выраженная в виде коэффициента  $K$  – безразмерной величины, представляющей собой отношение среднего многолетнего 30 суточного расхода за период после даты разбиения (1978 г. или 1985 г.) к среднему многолетнему 30 суточному расходу за предыдущий период.

Полученные значения коэффициента  $K$  представлены на рисунке В.3 – В.4, а осредненные по гидрографическим районам величины изменения характеристик минимального стока относительно предыдущего периода - в таблице В.1.

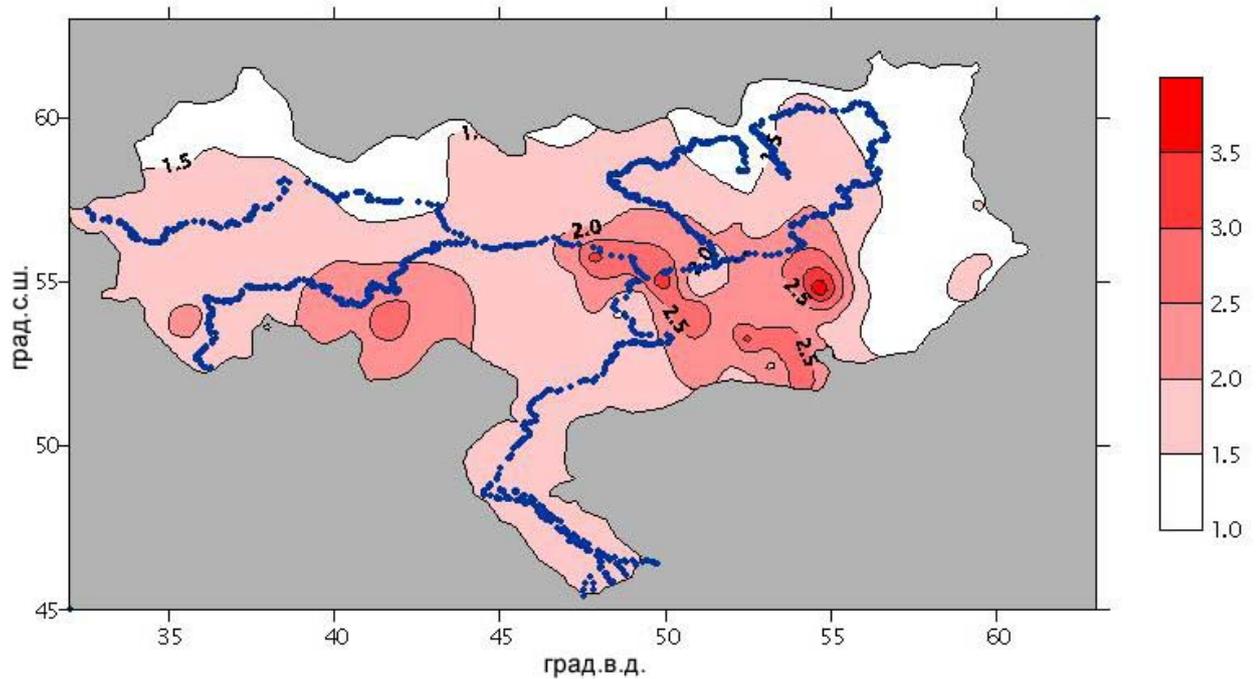


Рисунок В.3 – Карта увеличения среднего минимального 30 суточного расхода относительно предыдущего периода на территории бассейна р. Волги за зимний период.

Таблица В.1 – Средние по районам величины изменения минимальных характеристик стока

Район	Зимний период		Период открытого русла	
	К	$\Delta q$	К	$\Delta q$
Верхняя Волга (75 район)	1.36	1.02	1.27	0.91
Бассейн р.Камы (76 район)	1.63	0.56	1.39	0.58
Нижняя Волга (77 район)	2.16	0.49	1.61	0.37

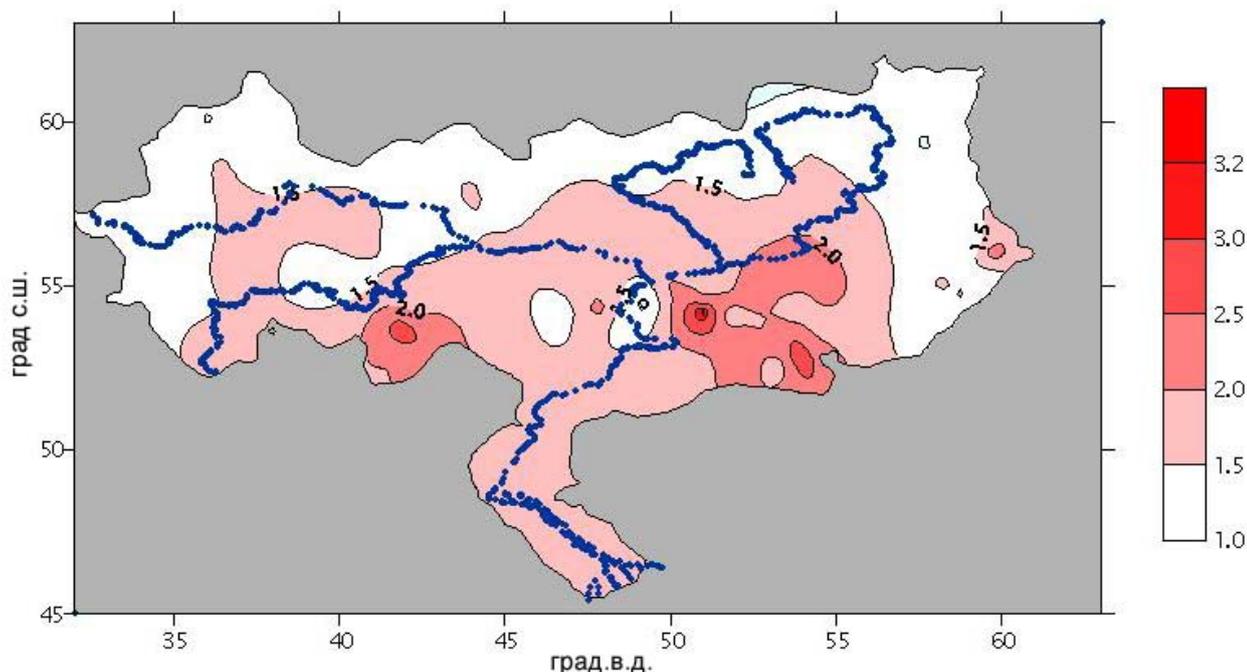


Рисунок В.4 – Карта увеличения среднего минимального 30 суточного расхода относительно предыдущего периода на территории бассейна р. Волги за период открытого русла.

## В.2 Результаты применения методика прогноза меженного стока в условиях неопределенности климатических изменений

В.2.1 В модельных расчетах были использованы 18 сценариев долгосрочных климатических изменений, а в качестве расчетного значения температуры воздуха на будущее была принята осредненная по всем 18 сценариям зимняя температура воздуха.

В качестве прогнозной модели применена логарифмическая модификация распределения Пирсона III типа, подробно описанная в приложении Б:

$$f(x; \alpha, b, m) = \frac{\lambda |\alpha|}{\Gamma(b)x} [\alpha(\log_a x - m)]^{b-1} \exp[-\alpha(\log_a x - m)], \quad (\text{В.1})$$

где параметры  $\alpha$ ,  $b$ ,  $m$  – выражаются через первые три момента распределения  $x_0$ ,  $C_v$ ,  $C_s$ , а расчетная кривая обеспеченности при наличии двух состояний определяется в соответствии с рекомендациями раздела 6.

В случае прогноза стока в результате климатических изменений рассматриваются три состояния прогнозируемого гидрологического процесса, и, соответственно, процесс с вероятностями  $n_1/N$  и  $n_2/N$  и  $n_3/N$  может находиться в одном из них. При этом  $N = n_1 + n_2 + n_3$  является суммой всех шансов, а распределение оценки среднего (параметра  $\theta$ ) прогнозируемого процесса будет являться комбинацией трех выборочных распределений:

$$p(\theta/x) = \frac{n_1}{N} \cdot \eta_1(\theta, x) + \frac{n_2}{N} \eta_2(\theta, x) + \frac{n_3}{N} p(\theta/x), \quad (\text{В.2})$$

где  $\eta_i(\theta, x)$  – выборочное распределение среднего значения для  $i$ -го условно-стационарного периода с весом,

$n_i$ ,  $p(\theta/x)$  – апостериорное распределение оценки параметра  $\theta$  для прогнозируемых климатических условий.

Получение прогнозной оценки состоит в вычислении прогнозного распределения на основе формулы полной вероятности. В этом случае комбинация распределений (В.2) будет являться апостериорной плотностью, а модельное распределение – логарифмическим распределением Пирсона III типа с параметрами  $C_v$  и  $C_s/C_v$ , принимаемыми осредненными для всех периодов:

$$\pi(y) = \int_{\theta} P(y, \alpha, b, m, \theta) \cdot p(\theta/x) d\theta \quad (\text{В.3})$$

Прогнозное распределение  $\pi(y)$  получается путем численного интегрирования уравнения (В.3).

В.2.2 Прогноз увеличения водности был рассмотрен на конкретном примере. В ряду наблюдений было выделено два условно-однородных периода – до и после 1978 года. В таблице В.2 приведены параметры ЛРП для этих условно-однородных периодов. В таблице В.3 приведены параметры распределения для трех условно-однородных периодов – до даты смены фазы водности, период от этой даты до 2010 года и прогностический период 2010-2030 годы. Четвертый период – Байесовская прогнозная оценка, при расчете плотности которой учитывались все периоды.

Таблица В.2- Параметры ЛРП для условно-однородных периодов

Параметры	1 период	2 период
$\alpha$	-10.7	86
$\beta$	15.8	747
m	1.41	-8.73

Таблица В.3- Результаты расчета прогнозных характеристик межennaleго стока

Показатели	1 период	2 период	3 период	4 период
N лет	42	33	20	
Среднее	3,96	9,05	11,03	7,24
Cv	0,35	0,33	0,33	0,56
Cs	0,52	1,12	1,12	1,0

На рисунке В.5 (кривая 4) приведены результаты расчета прогнозной плотности по уравнению (В.3). Там же для сравнения приведены кривые обеспеченности для двух условно стационарных периодов (кривые 1 и 2) и байесовское решение, полученное по уравнению (В.3) для случая двух периодов (кривая 3).

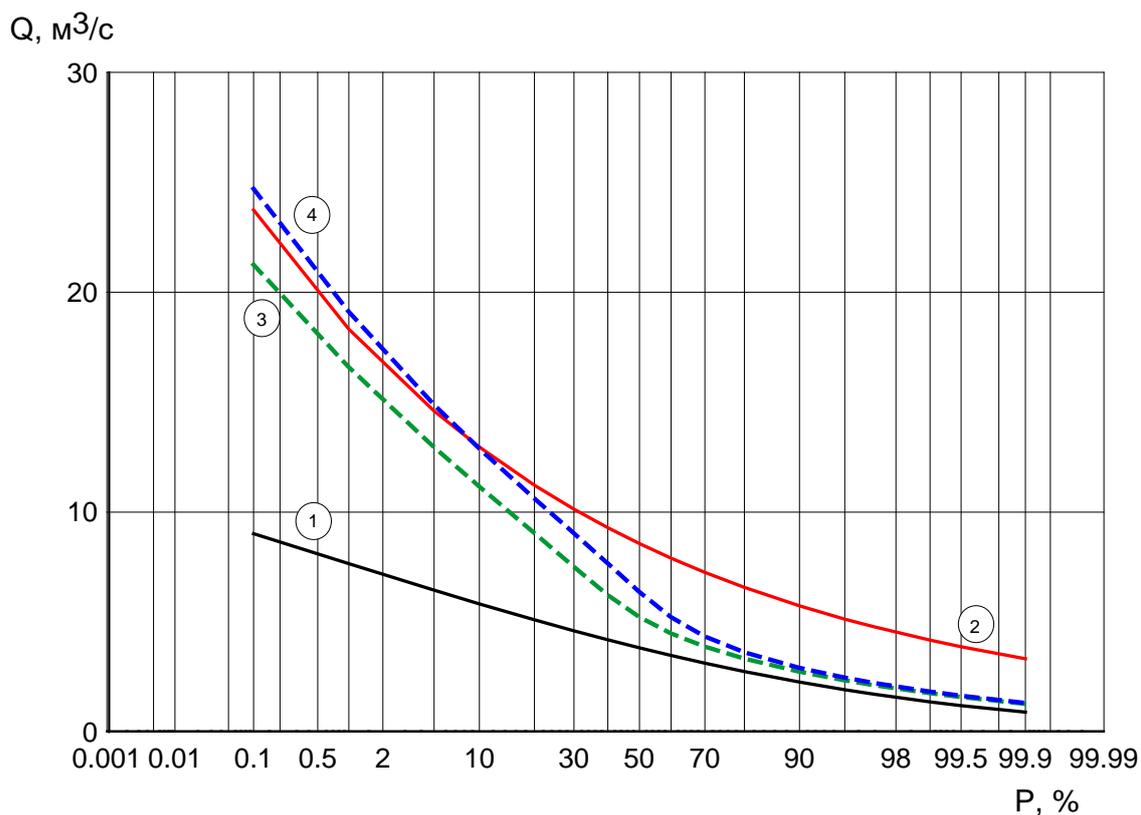


Рисунок В.5 – Вероятностный прогноз минимальной водности в условиях климатических изменений

### В.3 Прогноз характеристик стока зимней межени

Анализ данных гидрометеорологических наблюдений позволил выявить зависимость изменения средних значений меженного стока от соответствующих средних приращений зимних температур воздуха (рисунок В.6).

Примечание - Здесь и далее речь идет о разнице средних значений стока за условно-однородные периоды его колебаний до 1978 года включительно и соответствующих этим периодам средних значений зимней температуры воздуха.

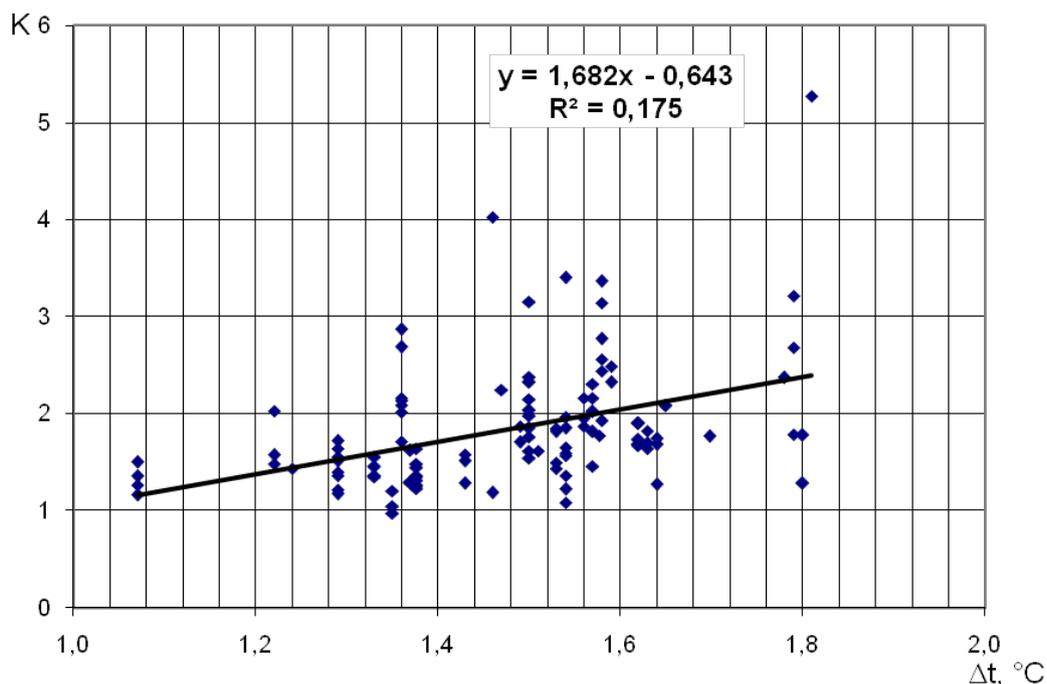


Рисунок В.6 – Зависимость приращения стока (в долях от средней водности за предшествующий период) от изменения температуры.

Если на ближайшие 20 лет прогнозируется увеличение приземной температуры воздуха в бассейне реки Волги в зимний период на величину  $\Delta t$ , то прогнозируемое изменение стока на этот период получается с использованием полученной линейной зависимости следующим образом:

Обозначим произошедшие (к 2010 г.) изменения нормы минимального стока относительно нормы условно однородного периода (до 1979 г.) через  $K_1$ , а отношение нормы минимального зимнего стока  $\bar{q}_3$  в будущем к норме стока за тот же период через  $K_2$ :

$$K_1 = \frac{\bar{q}_2}{\bar{q}_1}, \quad (\text{В.4})$$

$$K_2 = \frac{\bar{q}_3}{\bar{q}_1} \quad (\text{В.5})$$

где  $\bar{q}_1$  – норма минимального стока за период до 1979 г.,  $\bar{q}_2$  – то же, но за период 1979 -2010 гг.

Для прогноза зимнего стока на ближайший климатический период предложено следующее выражение

$$K_2 = K_1 + \alpha \Delta t , \quad (B.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, равный 1.68,

$\Delta t$  – приращение прогнозируемой средней температуры воздуха за зиму по отношению к периоду до 2010 года.

Полученный по уравнению (B.6) коэффициент  $K_2$  умножается на значение стока за первый условно-однородный период ( $\bar{q}_1$ ) и, таким образом, получается прогнозная оценка среднего стока за зимнюю межень в условиях дальнейшего потепления климата в регионе. Дальнейший расчет прогнозного распределения ведётся в соответствии с рекомендациями раздела B.2.

## Библиография

- [1] Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 29.12.2004 № 190-ФЗ
- [2] Стандарт организации СТО СРО-Г 60542954 00010 -2016      Объекты использования атомной энергии. Требования к научному сопровождению инженерных изысканий. оценка достаточности водных ресурсов для технического водоснабжения АС