



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ НЕДОСТАТОЧНОСТИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РЕКИ АНГРАПЫ

А.А. Кустикова, студентка

e-mail: lotos_aleks@mail.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

В статье отражены некоторые результаты гидрологического исследования реки Анграпы, имеющей рыбохозяйственное значение. Для ряда наблюдений средних годовых расходов воды реки Анграпы по гидрологическому посту д. Берестово проверены гипотезы о достаточной продолжительности и однородности ряда. Доказана применимость ряда данных наблюдений за гидрологическим режимом реки Преголи по гидропосту г. Гвардейск в качестве аналога, составлено уравнение линейной регрессии, выполнено восстановление гидрологического ряда в исследуемом створе по ряду-аналогу. Для восстановленного ряда среднегодовых расходов воды реки Анграпы проверены гипотезы о его достаточной продолжительности и однородности, построены эмпирическая и аналитическая кривые обеспеченности средних расходов по трехпараметрическому закону распределения Крицкого-Менкеля. Вычислен средний многолетний расход по восстановленному гидрологическому ряду, найдены значения средних расходов заданной обеспеченности.

Ключевые слова: река Анграпа, аналитическая кривая, обеспеченность, среднегодовые расходы воды, гидрология, изыскания

ВВЕДЕНИЕ

Речная сеть Калининградской области представлена 4620 реками, густота речной сети достигает $0,85 \text{ км/км}^2$ [1]. Одной из основных водных артерий Калининградской области является река Анграпа. Она является трансграничным водотоком, берущим начало из оз. Мамры в Республике Польша, устье находится вблизи г. Черняховск Калининградской области. При слиянии водотока с рекой Инструч образуется река Преголя. Водные ресурсы реки Анграпы используются в гидроэнергетики (использование механической энергии водного потока), в судоходстве вблизи г. Венгожево, для рыбного хозяйства, в целях рекреации (сплав по реке на байдарках, пляжный отдых). Также водоток используется в качестве водоприемника избыточной воды, отводимой с осушаемых территорий, промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Несмотря на интенсивное использование водных ресурсов и на высокое освоение земельного фонда в границах водосбора реки Анграпы, гидрологический режим водотока изучается недостаточно хорошо, имеющиеся исследования теряют актуальность и основываются на устаревших данных.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования в данной статье выступает река Анграпа. Длина водотока составляет 169 км, в том числе 97 км на территории Калининградской области [2]. Средний уклон реки Анграпы составляет $0,63 \text{ м/км}$.

Водосбор реки площадью 3960 км^2 асимметричен, в том числе 1440 км^2 приходится на водосборный бассейн основного правого притока – реки Писсы.

Река Анграпа относится к рыбохозяйственным водотокам высшей категории.

Гидрологическое состояние реки подвержено постоянным пространственным и временным изменениям, основное влияние на гидрологический режим реки оказывает, главным образом, связь с другими водными объектами, атмосферой, литосферой. В среднем для реки Анграпы доля весеннего стока (II-IV) составляет 38,3 % годового стока, доля летне-осеннего стока (V-XI) составляет 42,5 %, доля зимнего стока (XII-I) – 19,2 %.

Бассейн реки Анграпы относится к Балтийскому бассейновому округу, водохозяйственный участок реки Преголи [2]. Гидрологическая изученность на территории данного ВХУ достаточно хорошая. В конце XIX века были организованы систематические наблюдения за гидрологическим режимом реки Анграпы, сведения о гидрологических постах представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Гидрологические посты на территории водосборного бассейна реки Анграпы

Код поста	Название (местоположение) поста	Расстояние от, км		Площадь водосбора, км ²	Период действия	
		истока	устья		открытие	закрытие
<i>Река Анграпа</i>						
	С. Юхово	73	96	1980	01.11.1900	01.11.1911
	Г. Озерск	90	79	2020	1896	01.11.1907
74427	Г. Озерск	93	76	2060	14.09.1954	31.12.1977
74428	Д. Берестово	139	30	2460	04.03.1894	Действ.
74429	Г. Черняховск	168	1	3960	01.01.1871 (01.03.1931)	01.11.1944

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является нахождение статистических параметров распределения и построение аналитической кривой средних годовых расходов реки Анграпы.

Работа включает:

1. Проверку достаточной продолжительности и однородности исходного гидрологического ряда реки Анграпы.
2. Восстановление гидрологического ряда по ряду-аналогу.
3. Проверку достаточной продолжительности и однородности восстановленного гидрологического ряда реки Анграпы.
4. Построение эмпирической и аналитической кривых обеспеченности средних годовых расходов реки Анграпы с учетом данных последних лет.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение кривой обеспеченности производится по данным среднегодовых расходов реки Анграпы по гидропосту д. Берестово за период наблюдений 71 год [3] в соответствии с требованиями СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» (СП-2003) [4].

Определение гидрологических характеристик производится по ряду данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности и однородности.

Продолжительность периода наблюдений считается достаточной, если относительная квадратическая погрешность расчетного значения среднего годового расхода не превышает 10 % [4].

Количественная оценка статистической однородности ряда гидрологических наблюдений производится с применением критерий однородности выборочных дисперсий (критерий Фишера) и выборочных средних (критерий Стьюдента) [4]. Критерий Фишера относится к категории стандартных и рекомендуется в большинстве нормативных документах в качестве теста на однородность.

Среднеарифметическое значение средних годовых расходов воды реки Анграпы в створе г/п д. Берестово $Q_s = 14,53 \text{ м}^3/\text{с}$. Вспомогательные средние находят по формулам (1), (2) из [4]:

$$Q_{s1} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=2}^n Q_i = 14,553, \quad (1)$$

$$Q_{s2} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} Q_i = 14,526 \quad (2)$$

Несмещенную оценку коэффициента автокорреляции между смежными членами ряда r определяют по формуле (3) из [4]:

$$r = -0,01 + 0,98 \cdot r_0 - 0,06 \cdot r_0 + (1,66 + 6,46 \cdot r_0 + 5,69 \cdot r_0) / n, \quad (3)$$

где смещенную оценку r_0 определяют по формуле (4) из [4]:

$$r_0 = \frac{\sum_{i=2}^n (Q_i - Q_{s1}) \cdot (Q_{i-1} - Q_{s2})}{\sqrt{\sum_{i=2}^n (Q_i - Q_{s1})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - Q_{s2})^2}} = 0,378 \quad (4)$$

Тогда $r = 0,421$.

Среднее квадратическое отклонение находят по встроенной функции математического пакета Mathcad 15 $\sigma = \text{Stdev}(Q) = 4,41$.

Коэффициент вариации определяют по формуле (5) из [4]:

$$C_v = \sigma / Q_s = 0,304 \quad (5)$$

Так как коэффициент автокорреляции между смежными членами ряда $r < 0,5$, то случайные средние квадратические погрешности выборочных средних определяют по формуле (6) из [4]:

$$\Delta Q_s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{(1+r)}{(1-r)}} = 0,82 \quad (6)$$

Таким образом, относительная средняя квадратическая погрешность расчетного значения среднегодовых расходов находится по формуле (7):

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q_s}{Q_s} \cdot 100 = 5,64 \% \quad (7)$$

Полученное значение относительной погрешности не превышает 10 % и удовлетворяет требованию СП-2003 [4], поэтому ряд гидрологических наблюдений за средними годовыми расходами воды в реки Анграпы является достаточным.

Оценка однородности ряда средних годовых расходов воды определяется по критерию однородности выборочных дисперсий (критерий Фишера). Для этого ряд наблюдений разбивается на два одинаковых интервала. Затем находят значения выборочных средних расходов двух частей по формулам (8),(9) из [5]:

$$Qg1 = \frac{1}{n1} \cdot \sum_{i=1}^{n1} Q_i = 13,997, \quad (8)$$

$$Qg2 = \frac{1}{n2} \cdot \sum_{i=n1+1}^n Q_i = 15,048 \quad (9)$$

где $n1 = 35$ и $n2 = 36$ – длины первого и второго интервала соответственно.

Исправленные выборочные дисперсии каждой части ряда находятся по формулам (10), (11) из [5]:

$$D1 = \frac{1}{n1-1} \cdot \sum_{i=1}^{n1} (Q_i - Qg1)^2 = 11,047, \quad (10)$$

$$D2 = \frac{1}{n2-1} \cdot \sum_{i=n1+1}^n (Q_i - Qg2)^2 = 27,61 \quad (11)$$

Параметр критерия Фишера определяется как отношение двух дисперсий по формуле (12):

$$Ff = D2/D1 = 2,499 \quad (12)$$

Критическое значение находится по встроенной функции Mathcad $Fc = qF(0,95, n1-1, n2-1) = 1,762$.

Так как полученное значение параметра критерия Фишера превышает критическое, то гипотеза о равенстве выборочных дисперсий отвергается, и данные выборки противоречат гипотезе однородности.

В соответствии с СП-2003 [4] при недостаточности данных гидрометрических наблюдений основные элементы расчетного гидрографа необходимо приводить к многолетнему периоду с привлечением данных наблюдений пунктов-аналогов.

При выборе пункта-аналога основным критерием является наличие синхронности в колебаниях речного стока расчетного створа и створов-аналогов, которые количественно выражают через коэффициент парной или множественной корреляции между стоком в этих пунктах [4].

При расчете параметров распределения и значений стока за отдельные годы с использованием аналитических методов, основанных на регрессионном анализе, должны соблюдаться следующие условия:

- 1) число совместных лет наблюдений n в приводимом пункте и пункте-аналоге должно быть не менее 6 лет при наличии одного аналога;
- 2) коэффициент парной корреляции R между значениями стока исследуемой реки и значениями стока в пункте-аналоге должен равняться или быть больше критического значения $R_{кр}$, принимаемого 0,7;
- 3) отношение коэффициента парной корреляции к средней квадратической погрешности его исчисления и отношение коэффициента уравнения регрессии к средней квадратической погрешности его исчисления должны быть не менее критических значений $A_{кр}$ и $B_{кр}$ соответственно, равных 2,0.

В качестве реки-аналога принимается река Преголя, имеющая тесную гидрологическую связь с рекой Анграпой. Гидрологический ряд наблюдений за средними годовыми рас-

ходами воды в реки Преголи по гидропосту г. Гвардейск имеет продолжительность 125 лет (1891-2014 гг.) [6].

Исследуемый ряд средних годовых расходов воды реки Анграпы гидропост д. Берестово и базовый ряд средних годовых расходов реки Преголи гидропост г. Гвардейск имеют 22 года совместных наблюдений (1918-1939 гг.).

Коэффициент парной корреляции между рядами исследуемым и базовым (22 года) находится по встроенной функции Mathcad (13):

$$r_{ia} = \text{corr}(Q_i, Q_a) = 0,88 \quad (13)$$

где Q_i – средние расходы воды реки Анграпы в исследуемом створе;
 Q_a – средние расходы воды реки Преголи в пункте-аналоге.

Коэффициенты уравнения линейной регрессии находятся по встроенной функции (14) Mathcad [5]:

$$kr1 = \text{regress}(Q_a, Q_i, 1) = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \\ 2,797 \\ 0,135 \end{pmatrix}, \quad kr = kr1_5 = 0,135, \quad b = kr1_4 = 2,797 \quad (14)$$

Чтобы убедиться в выполнении последнего условия, находится погрешность вычисления коэффициента парной корреляции по формуле (15) из [5]:

$$\sigma_r = \frac{1 - r_{ia}^2}{\sqrt{n_i - 1}} = 0,049 \quad (15)$$

Тогда отношение коэффициента парной корреляции к погрешности его вычисления равно $r_{ia} / \sigma_r = 0,88 / 0,049 = 17,819$.

Погрешность вычисления коэффициента регрессии kr находится по формуле (16) [5]:

$$\sigma_k = \frac{\sigma_i}{\sigma_a} \cdot \sqrt{\frac{1 - r_{ia}^2}{n_i - 1}} = 0,016 \quad (16)$$

где $\sigma_i = 2,944$ – среднее квадратическое отклонение части исследуемого ряда;
 $\sigma_a = 19,216$ – среднее квадратическое отклонение части базового ряда.

Тогда отношение коэффициента регрессии к погрешности его вычисления равно $kr / \sigma_k = 0,135 / 0,016 = 8,475$.

Таким образом, все необходимые условия применимости гидрологического ряда средних расходов воды реки Преголя в качестве пункта-аналога выполняются.

Уравнение линейной регрессии (рис. 1) будет иметь вид $Q_{iv}(Q_o) = kr \cdot Q_o + b$ [5].

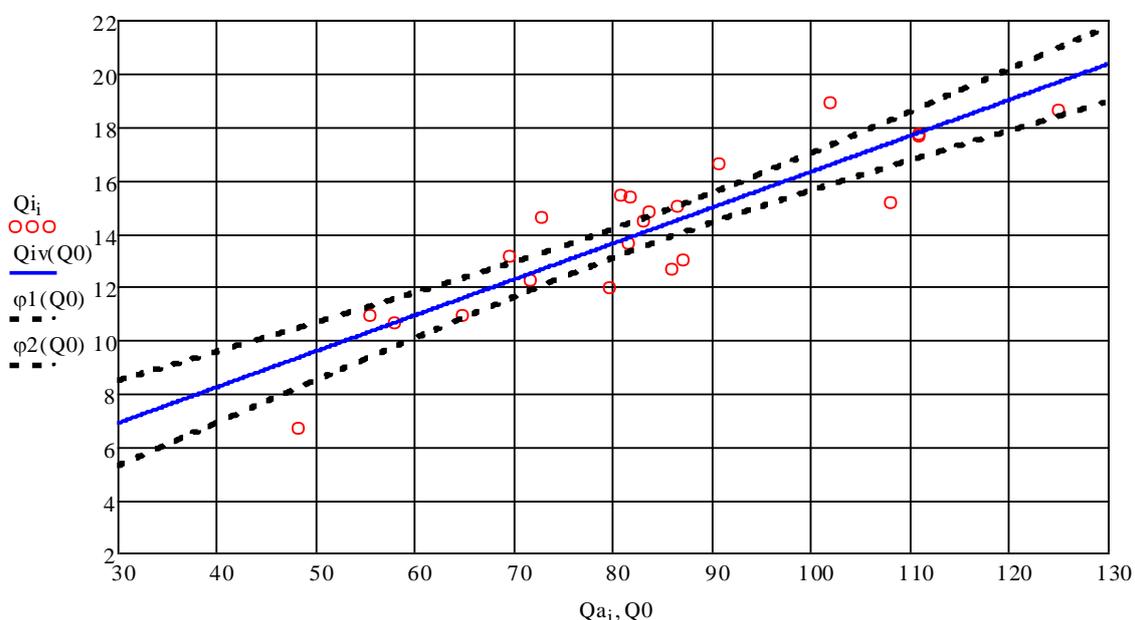
Коэффициент Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95 находится по встроенной функции Mathcad [16] $t_{\alpha} = qt(0.95, n_i - 3)$. Далее находятся доверительные интервалы уравнения линейной регрессии (рис. 1) по формулам (17)-(20) из [5]:

$$D = \sqrt{\frac{1}{n_i - 2} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} (Q_{i_i} - Q_{iv}(Q_{a_i}))^2} = 1,435, \quad (17)$$

$$SS = \sum_{i=1}^{n_i} (Q_{a_i} - Q_{as})^2 = 7755, \quad (18)$$

$$\varphi_2(x) = Q_{iv}(x) + t_y \cdot D \cdot \sqrt{\frac{1}{n_i} + \frac{(x - Q_{as})^2}{SS}}, \quad (19)$$

$$\varphi_1(x) = Q_{iv}(x) - t_y \cdot D \cdot \sqrt{\frac{1}{n_i} + \frac{(x - Q_{as})^2}{SS}} \quad (20)$$



Q_{a_i} – расходы ряда-аналога, m^3/c ; Q_{i_i} – расходы восстанавливаемого ряда, m^3/c ; точки – данные совместных наблюдений за 22 года

Рисунок 1 – Графики уравнения линейной регрессии (Q_{iv}) и границ его доверительных интервалов (φ_1 , φ_2)

С помощью оператора Mathcad « rnorm » выполняется генерация случайной составляющей Ψ , распределенной по нормальному закону. По формулам (21), (22) из [5] рассчитывается восстановленный гидрологический ряд, показанный на рис. 2.

$$Q_{v_i} = Q_{iv}(Q_i) + \Psi_i \cdot \sigma_i \cdot \sqrt{1 - r_{ia}^2}, \quad (21)$$

$$Q_{v_{n-ni+j}} = Q_{i_j} \quad (22)$$

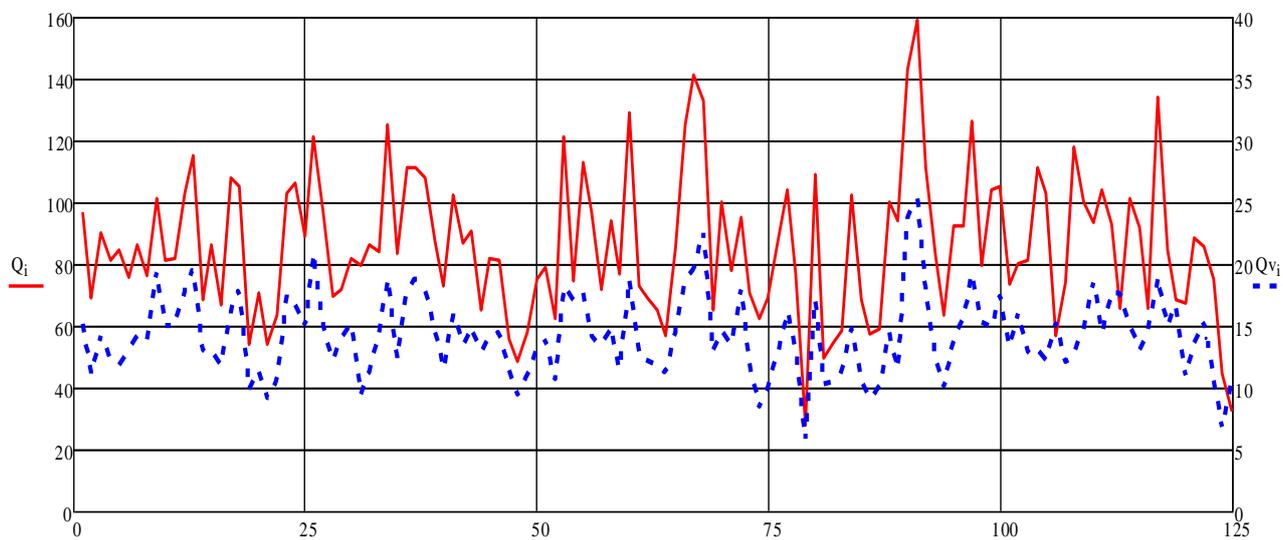
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проверка достаточной продолжительности и однородности восстановленного гидрологического ряда выполняется аналогично исходному ряду средних расходов реки Анграпы, по формуле (7) находится относительная средняя квадратическая погрешность расчетного

значения среднегодовых расходов, для восстановленного ряда погрешность составляет 2,966 %.

Параметр критерия Фишера для восстановленного ряда равен 1,526 и меньше критического значения (1,737). Таким образом, восстановленный ряд среднегодовых расходов реки Анграпы является достаточным и однородным.

В результате гидрологического исследования был восстановлен ряд среднегодовых расходов реки Анграпы по ряду-аналогу реки Преголи (рис. 2).



Q_i – расходы воды в пункте-аналоге ($\text{м}^3/\text{с}$); Q_v – расходы воды восстановленного ряда реки Анграпы ($\text{м}^3/\text{с}$); i – номер года

Рисунок 2 – Гидрологические ряды

Средний многолетний расход по восстановленному гидрологическому ряду $Q_{vs} = 14,213 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для расчета средних годовых расходов заданной обеспеченности можно использовать аналитическую кривую трехпараметрического гамма-распределения Крицкого-Менкеля, полученную по формулам из [5] (рис. 3).

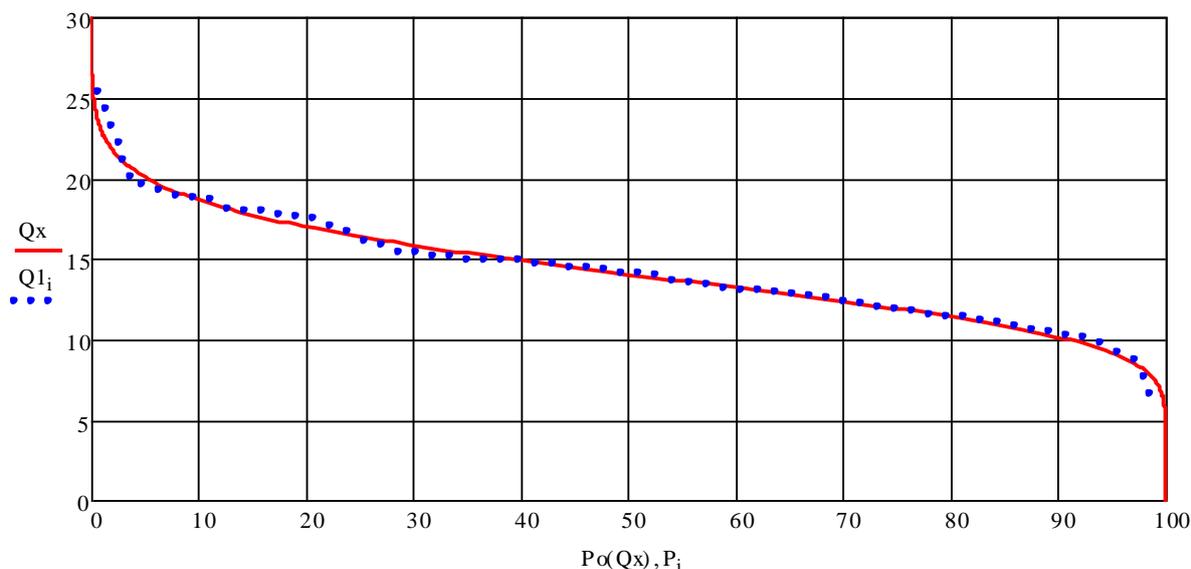


Рисунок 3 – Теоретическая (линия) и эмпирическая (точки) кривые обеспеченности средних годовых расходов реки Анграпы ($\text{м}^3/\text{с}$)

В ходе исследования были определены среднегодовые расходы водотока в многоводные, средней водности и маловодные годы (табл. 2).

Таблица 2 – Среднегодовые расходы реки Анграпы заданной обеспеченности, м³/с

Пост	Обеспеченность года, %			
	5	10	50	95
д. Берестово	20,037	18,606	13,998	9,122

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье отражены результаты инженерных расчетов по определению основных гидрологических характеристик реки Анграпы, которые могут быть использованы в дальнейшем для обоснования проектирования новых, реконструкции и технического перевооружения зданий и сооружений для всех видов строительства, а также разработки природоохранных мероприятий и инженерной защиты территорий. К тому же результаты исследования можно использовать для рек-аналогов, наблюдений за которыми не ведутся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Вода России» - Калининградская область [Электронный ресурс]. – URL: <http://water-rf.ru/> (дата обращения: 10.12.2019).
2. Государственный водный реестр. Река Анграпа [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.textual.ru/gvr/index.php?card=149588> (дата обращения: 15.12.2019).
3. International Hydrological Programme [Электронный ресурс]. – URL: <http://webworld.unesco.org/water/> (дата обращения: 04.03.2016).
4. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – Введ. 2004-01-01. – Москва, 2004. – 73 с.
5. Наумов, В. А. Методы обработки гидрологической информации. Лабораторный практикум для студентов высших учебных заведений, обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки «Природообустройство и водопользование» / В.А. Наумов. – Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. – 111с.
6. Наумов В. А. Результаты статистического анализа региональных гидрологических и климатических рядов / В.А. Наумов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2016. – № 3 [Электронный ресурс]. – URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2016/08/2016-N3-Naumov.pdf> (дата обращения: 04.04.2020).

DETERMINATION OF THE MAIN HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS IN CASE OF INSUFFICIENT OBSERVATION DATA ON THE EXAMPLE OF THE ANGRAPA RIVER

A.A. Kustikova, student
e-mail: lotos_aleks@mail.ru
Kaliningrad State Technical University

The article reflects some results of the hydrological study of the Angrapa river, which has a fishing significance. For a number of observations of the average annual water consumption of the Angrapa river at the hydrological post d Berestovo tested hypotheses about sufficient duration and uniformity of the series. The applicability of a number of observational data for the hydrological regime of the Pregol river at the Gvardeysk hydropost as an analog is proved, the linear regression equation is compiled, and the restoration of the hydrological series in the studied range is performed using the analogous series. For the restored series of average annual water flows of the Angrapa river, hypotheses about its sufficient duration and homogeneity were tested, and empirical and analytical curves for the security of average expenditures were constructed according to the three-parameter Kritsky-Menkel distribution law. The average long-term expenditure for the restored hy-

drological series is calculated, and the values of the average expenditure for the specified security are found

Key words: *Angrapa river, analytical curve, security, average annual water consumption, hydrology, surveys*