



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

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская)

На тему Вероятностная оценка ежедневных и среднемесячных
расходов воды на примере р. Великой

Исполнитель Садыков Альберт Абдрахимович

Руководитель кандидат технических наук

Хаустов Виталий Александрович

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

Доктор технических наук, профессор
Коваленко Виктор Васильевич

«07» июль 2016 г.

Санкт-Петербург
2016



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

Кафедра гидрофизики и гидропрогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская)

На тему Вероятностная оценка ежедневных и среднемесячных
расходов воды на примере р. Великой

Исполнитель Садыков Альберт Абдрахимович

Руководитель кандидат технических наук

Хаустов Виталий Александрович

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

Доктор технических наук, профессор
Коваленко Виктор Васильевич

«___» _____ 2016 г.

Санкт–Петербург
2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВЕДЕНИЕ	4
1 Физико-географическое положение	5
1.1 Географическое положение	5
1.2 Рельеф бассейна	5
1.3 Климат	8
1.4 Растительность	10
1.5 Подземные воды	11
2 Математический аппарат	12
2.1 Критерии, используемые для проверки однородности гидрологических рядов	12
2.1.1 Критерий Стьюдента для проверки значимости различия средних значений двух выборок	13
2.1.2 Критерий равенства двух дисперсий (Критерий Фишера)	14
2.2 Разностно-интегральная кривая	16
2.3 Статистические параметры и расчет ошибки	18
2.4 Методы расчета оценок параметров распределения	23
2.4.1 Графоаналитический метод на основе кривой Пирсона III типа	23
2.4.2 Графоаналитический метод на основе кривой Крицкого – Менкеля	25
2.5 Критерии согласия	26
2.5.1 Критерий χ^2	27
2.5.2 Критерий Колмогорова	28
2.5.3 Критерий $\rho\omega^2$	29
2.6 Гистограммы. Частота повторяемости	29
3 Расчет параметров распределения	37
3.1 Выводы об однородности	37

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	41
ПРИЛОЖЕНИЕ	42

ВВЕДЕНИЕ

Продолжительность гидрологических явлений в широком понимании изменяется от нескольких секунд до нескольких тысячелетий. Наводнения при прорыве плотин, дождевые паводки, снежные обвалы и лавины служат примерами очень кратковременных явлений. Напротив, многовековой лед может участвовать в формировании речного стока по истечении 10 000 лет и более со времени его образования.

Время пребывания воды в различных фазах гидрометеорологического цикла неодинаково. Анализ ежедневной температуры воздуха, хода осадков, изменений снеготпасов, гидрографа речного стока и данных в целом за период наблюдений позволяет оценить явления, к которым относится реакция бассейна на внешние воздействия, и явления большой продолжительности, например повторяемость паводков или продолжительность периодов водности.

Предметом исследования в работе являются ежедневные и среднемесячные расходы воды, суммы осадков, температура воздуха.

Цель данной работы – оценить изменчивость временную и пространственную указанных гидро- и метеорологических характеристик и выявить закономерности в их законах распределения.

Для решения поставленной цели ставятся следующие задачи:

1. Сформировать базу ежедневных и месячных данных по стоку (расходы воды) и метеорологическим характеристикам (осадки и температура) для многолетнего интервала времени;
2. Оценить однородность рядов указанных характеристик;
3. Рассчитать их статистические параметры и построить гистограммы распределения их изменений.

1 Физико-географическое положение

1.1 Географическое положение

Псковская область расположена на севере-западе европейской части России. На севере она граничит с Ленинградской областью, на востоке – с Новгородской и Калининской областями, на юге – со Смоленской областью и Беларуссией, на западе – с Латвией и Эстонией. На севере-западе естественной границей является Чудско-Псковское озеро.

Длина река составляет 430 км, площадь ее водосборного бассейна – 25200 км², среднегодовой расход воды в устье – 134 м³/с. Исток реки находится на Бежаницкой возвышенности, впадает в Псковско-Чудское озеро.

Основные притоки – Идрица, Синяя, Утроя, Кухва, Вяда, Кудеб, Исса (левые); Алоль, Кудка, Сороть, Черёха, Пскова (правые) [1].

1.2 Рельеф бассейна

Современный рельеф бассейна сформировался в результате ледниковой и водно-ледниковой аккумуляции, связанной с деятельностью последнего – Валдайского оледенения. В пределах бассейна расположены крупные изолированные возвышенности, приуроченные к выступам поверхности дочетвертичных пород с амплитудой высот 30-50 м. На востоке бассейна находится Лужская возвышенность, на юге – Судомская возвышенность, в юго-восточной части бассейна р. Великой – Бежаницкая и Вязовская возвышенности, на севере расположена возвышенность Пандивере. В западной части водораздел пролегает через Латгальскую возвышенность и возвышенности Хаанья и Сакала. Все перечисленные возвышенности

представляют собой комплексы холмистых образований с высотами от 130-150 до 250-320 м над уровнем моря.

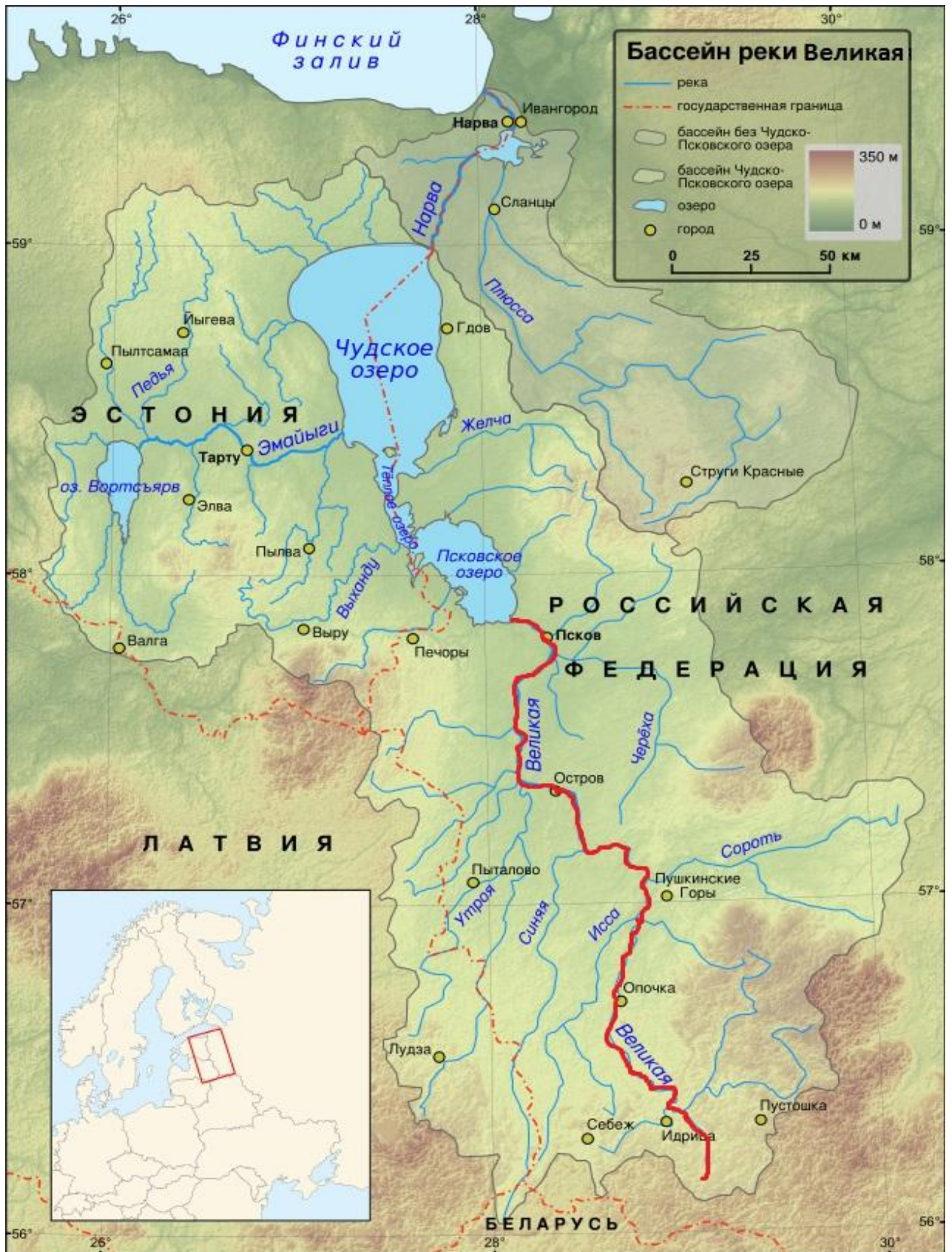


Рисунок 1 – Бассейн реки Великая

Почти весь бассейн р. Великой расположен в подзоне смешанных лесов, залесенность бассейна составляет 36%, озерность равна 2%, причем большинство озер приходится на верховье бассейна. Заболоченность бассейна невелика и составляет в среднем 2%.

Бассейн р. Великой по характеру естественной зарегулированности стока делится на три части: южную, левобережную и правобережную. В южной части бассейна, сложенной сильно закарстованными Псковско-Чудскими доломитами, реки характеризуются повышенным стоком лимитирующего периода (57-60% годового) и лимитирующего сезона (18-22%). Реки левобережной части бассейна по сравнению с правобережными притоками отличаются несколько повышенной водностью лимитирующего периода и сезона. На их долю в левобережной части бассейна приходится соответственно 45-50% и 12-17% годового стока, в правобережной части – 40-45% и 10-12%.

На р. Великой существуют три водохранилища энергетического назначения – Шильской ГЭС, Максютинской ГЭС и Копылковской ГЭС. ГТС Копылковской ГЭС находятся в предаварийном состоянии.

В бассейне р. Великая насчитывается одиннадцать водоемов, образованных напорными гидротехническими сооружениями в руслах малых рек и ручьев.

С запада и северо-запада местность в целом понижается по направлению к трем крупным водным бассейнам, где наблюдаются наименьшие абсолютные высоты: у Онежского озера (Восточно-Сибирская равнина) – до 40 м, у Белого моря (Прибеломорская низменность) – до 10–20 м, у Ладожского озера (Северное Приладожье) – до 5–10 м. Рельеф водораздельных пространств между Онежским озером и Белым морем, Онежским и Ладожским озерами (100-300 м над ур. м.) в целом спокойный, слабо расчлененный с незначительными колебаниями относительных высот [2].

1.3 Климат

Климатические условия Псковской области определяются главным образом переносом теплых воздушных масс с Атлантического океана и Балтийского моря и холодных – из районов Арктики. Вторжения арктических воздушных масс вызывают резкие изменения погоды, весной и в начале лета они сопровождаются поздними заморозками, зимой – понижениями температуры, достигающими в отдельные дни до -40°C и ниже.

Проникновение атлантических воздушных масс связано с интенсивной циклонической деятельностью в северной части Атлантики, обуславливающей неустойчивую, пасмурную погоду, прохладную летом и относительно теплую, с частыми оттепелями зимой. В отдельные дни максимальная температура воздуха при оттепелях достигает $4-7^{\circ}\text{C}$, что вызывает интенсивное таяние снега. В течение зимы отмечается до 32 дней с оттепелями, наиболее часто они наблюдаются в декабре, в среднем до 14 дней.

Из-за нередких оттепелей мощного снежного покрова не проявляется. На открытых полевых участках наибольшая высота его отмечается в конце февраля и составляет 25-35 см, в лесу и на возвышенных участках до 35-45 см, что обеспечивает запасы воды в снеге до 60-90 мм. В течение зимы снег лежит 120-135 дней, появляется он в первой декаде ноября и окончательно сходит во второй декаде апреля. Устойчивый снежный покров держится со второй декады декабря до конца марта, в среднем 100-115 дней.

Самым холодным месяцем года является январь, когда средняя температура воздуха составляет $-7,5, -8^{\circ}\text{C}$. Примерно такая же температура (на $0,2-0,4^{\circ}\text{C}$ теплее) удерживается и в феврале. Однако в отдельные годы значения температуры существенно отличаются от средних многолетних.

Абсолютный минимум температуры воздуха составляет $-39, -45^{\circ}\text{C}$, но такие значения отмечаются очень редко, примерно 1 раз в 80-100 лет, чаще же (1 раз в 4 года) минимальная температура бывает $-30, -35^{\circ}\text{C}$. Самый теплый месяц – июль, с температурой воздуха $17 - 17,5^{\circ}\text{C}$, только в

заболоченных и лесных районах средняя температура этого месяца равна 16,5°C. В отдельные ясные дни температура воздуха достигает 30 - 36°C, но такие дни бывают редко.

Теплый период (с положительной средней суточной температурой воздуха) длится с начала апреля до третьей пятидневки ноября, в среднем 220-230 дней.

Вегетационный период (от весеннего до осеннего перехода средней суточной температуры воздуха через 5°C) длится 170-180 дней. Сумма положительных температур за этот период равна 2200-2400°C.

Летние месяцы характеризуются длинным днем и значительной продолжительностью солнечного сияния. Наибольший день наблюдается в июне и составляет 18 час. (на 15 число), к 15 август продолжительность его уже уменьшается до 15,5 час.

Значительная облачность которая преобладает в течение всего года, особенно в холодный период, в сильной степени уменьшает продолжительность солнечного сияния, которая составляет летом всего 50-60% возможной, а зимой лишь 10-15%.

В летний период преобладают облака верхнего и среднего ярусов. Пасмурные дни с плотной облачностью и без просветов летом бывают редко, в среднем 3-5 дней в месяц. В дневные часы преобладает переменная облачность с сильным развитием кучевых облаков. В осенне-зимний период облачность резко увеличивается. Число пасмурных дней к октябрю возрастает до 10-14, в декабре оно равно 16-20.

По количеству осадков область относится к зоне достаточного увлажнения, осадки вполне компенсируют возможное испарение. В течение года на большей части территории выпадает 550-600 мм осадков, в возвышенных районах (Бежаницко-Вязовские горы, Лужское взгорье, Судомская гора) количество осадков увеличивается до 650 мм. В наиболее увлажненные годы сумма осадков возрастает до 850-900 мм, в сухие же годы снижается до 350-400 мм, но такие годы наблюдаются редко.

Примерно 70% годовой суммы осадков приходится на теплый период (апрель - октябрь). Летние осадки часто носят ливневый характер и сопровождаются грозами. В отдельных случаях за одни сутки может выпасть осадков, сколько их выпадает в среднем за месяц.

Грозы чаще всего бывают в июле, в среднем 7-8 дней в месяц, в отдельные годы до 15-18 дней. В сумме же за год насчитывается 22-27 дней с грозой. Град – редкое явление, в среднем за лето отмечается 2 раза, наблюдается почти ежегодно (90%). В некоторые годы повторяемость града увеличивается до 6 дней. Наиболее вероятен он в мае и июне.

Преобладающим направлением ветра являются юго-западное и южное в зимний период и западное и юго-западное летом. Скорость ветра в осенне-зимний период является наибольшей в году и составляет 4-5 м/сек. В теплое время ветры ослабевают, средние скорости за месяц не превышают 3,5 м/сек. Сильные ветры (≥ 15 м/сек.) наблюдаются 5-8 дней в году, на побережьях крупных водоемов и в возвышенных районах повторяемость их увеличивается до 15 дней [3].

1.4 Растительность

Территория Северо-Запада расположена в основном в южной подзоне тайги; лишь небольшая северо-восточная часть ее находится в подзоне средней тайги, а крайняя юго-западная – в зоне смешанных лесов.

В ботанико-географическом отношении территория бассейна относится к лесной зоне. Общая залесённость около 58%. Лес сосредоточен, главным образом, в северной части бассейна, где преобладают леса с господством тёмнохвойных пород – ели, сосны, лиственницы. Они покрывают основную часть территории бассейна. Центральная и южная части бассейна реки Великой находятся в пределах таёжно-широколиственной (подтаёжной) зоны. Кроме того, водосборный бассейн находится на стыке двух флористических округов евросибирской области – балтийского и

среднерусского. При господствующем положении таёжных и подтаёжных видов здесь встречаются также виды, относящиеся к средневропейским и восточноевропейским умеренным лесным элементам [4].

1.5 Подземные воды

Одним из факторов, играющих существенную роль в формировании речного стока в бассейнах рек Северо-Запада, являются подземные воды. Для данной территории характерно значительное развитие речной сети, что активизирует подземный сток в зоне интенсивного водообмена.

Мощность зоны интенсивного водообмена определяется дренирующей способностью рек, которая зависит от глубины эрозионного вреза речных долин, глубина же вреза их достигает нескольких десятков метров. Котловины озер и долины рек являются зонами разгрузки не только водоносных горизонтов зоны интенсивного водообмена, но и более глубоких напорных водоносных комплексов.

Большая часть территории Псковской области входит в Ленинградский артезианский бассейн, сложенный главным образом палеозойскими терригенными и карбонатными осадками. В соответствии с типами водопроницаемости осадочных пород здесь выделяются серии водоносных горизонтов и комплексов с порово-пластовыми и трещино-пластовыми подземными водами. В вертикальном гидрогеологическом разрезе отчетливо выделяются два яруса подземных вод: нижний, охватывающий гдовский водоносный горизонт, и верхний, включающий водоносные комплексы от кембро-ордовикского до четвертичного [5].

2 Математический аппарат

2.1 Критерии, используемые для проверки однородности гидрологических рядов

Если в качестве математической модели для описания статистической структуры гидрологических рядов рассматривать случайную величину, то статистические характеристики гидрологического ряда не должны изменяться, т.е. все элементы данной выборки должны относиться к одной генеральной совокупности. По сути это эквивалентно предположению о неизменности условий формирования стока. Если в результате природных катаклизмов или антропогенной деятельности условия формирования стока изменятся, то это неминуемо приведет и к изменению статистических характеристик ряда, например, среднего или дисперсии.

Если статистические характеристики отдельных частей ряда существенно отличаются, то такой ряд является неоднородным (нестационарным). При этом надо иметь в виду, что изменение условий формирования стока может сказаться на одних характеристиках стока и почти не отразиться на других. Например, строительство водохранилища многолетнего регулирования наверняка окажет влияние на характеристики максимального стока, но может практически не оказать влияния на среднегодовые расходы.

Для проверки однородности гидрологических рядов используются критерии двух типов: параметрические и непараметрические. В параметрических критериях при построении анализируемой статистики используют выборочные оценки параметров распределения. При этом считается, что исходная выборка относится к генеральной совокупности с известным типом распределения (как правило, принимается нормальный закон распределения).

Непараметрические критерии базируются на использовании непараметрических статистик.

Статистика $g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ является непараметрической, если ее распределение не зависит от распределения X . Поэтому наряду с термином "непараметрический" используется более точный: "свободный от распределения". Хотя непараметрические критерии часто менее эффективны, чем стандартные (параметрические), потеря эффективности в этом случае компенсируется более широкими возможностями их применения [6].

2.1.1 Критерий Стьюдента для проверки значимости различия средних значений двух выборок

Пусть $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ и $(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$ – выборки длиной m и n из нормальных распределений с неизвестными параметрами m_x, σ_x и m_y, σ_y , но при этом известно, что $\sigma_x = \sigma_y$, т.е. они имеют одинаковое, хотя и неизвестное СКО, обозначим его буквой σ (без индекса).

Если предположить, что эти выборки относятся к одной генеральной совокупности, то разность должна быть близка к нулю. На основе этой разности построим статистику.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sigma_{\bar{x} - \bar{y}}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\bar{x} - \bar{y}}$ – СКО разности $(\bar{x} - \bar{y})$. Эта статистика подчиняется распределению Стьюдента при $\nu = (m+n-2)$. В математической статистике доказано, что

$$\sigma_{\bar{x} - \bar{y}} = S \sqrt{\frac{m+n}{mn}}, \quad (2)$$

где S – эмпирическая оценка $\sigma_{\bar{x} - \bar{y}}$. Значение S определяется в зависимости от выборочных значений S_x и S_y .

$$S = \sqrt{\frac{(m-1)S_x^2 + (n-1)S_y^2}{m+n-2}} \quad (3)$$

В окончательном виде выражение для статистики t имеет вид:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{S} \sqrt{\frac{mn}{m+n}} \quad (4)$$

В практике гидрологических расчетов используется статистика, где исходный ряд делится на две части (две выборки). Если дата возможного нарушения стока не известна, ряд делится пополам. При этом предполагается, что если условия формирования стока не изменились, то разница двух выборочных средних должна быть незначимой. Уровень значимости обычно принимается $2\alpha = 5\%$ или $2\alpha = 10\%$.

Критерий Стьюдента является так называемым стандартным критерием и рекомендуется в большинстве нормативных документов в качестве одного из официальных текстов на однородность. Однако при его использовании следуют учитывать три момента.

1. При построении критерия предполагалось, что анализируемые выборки относятся к нормальным совокупностям, а большинство гидрологических рядов, как правило, имеют небольшую положительную асимметрию, что повышает риск совершить ошибку.

2. При построении критерия предполагалось, что анализируемые выборки имеют одинаковую (хотя и неизвестную) дисперсию, поэтому перед использованием критерия Стьюдента следует проверить ряд на однородность по дисперсии.

3. В классической статистике длина выборок предполагается значительно большей, чем та, которую мы имеем на практике. Поэтому нельзя исключить ситуацию, когда гипотеза об однородности ряда опровергается из-за недостаточной длины этого ряда [6].

2.1.2 Критерий равенства двух дисперсий (Критерий Фишера)

Если $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ и $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ – выборки из нормальных совокупностей с параметрами m_x, σ_x и m_y, σ_y и если $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, то отношение их выборочных дисперсий S_x^2 / S_y^2 подчиняется распределению Фишера с числом степеней свободы $\nu_1 = m-1$ и $\nu_2 = n-1$. Следовательно, при нулевой

гипотезе $H_0 : S_x^2 = S_y^2$ и уровне значимости 2α доверительная область для отношения S_x^2 / S_y^2 определяется выражением

$$F_\alpha(v_1, v_2) \leq (S_x^2 / S_y^2) < F_{1-\alpha}(v_1, v_2) \quad (5)$$

или

$$1 / F_{1-\alpha} \leq (S_x^2 / S_y^2) < F_{1-\alpha} \quad (6)$$

Распределение Фишера, как известно, несимметрично, и для того чтобы сократить объем таблиц, их составляют только для значений $F > 1$, а при сравнении дисперсий S_x^2 и S_y^2 в числитель всегда подставляют большую дисперсию. В этом случае доверительная область при уровне значимости 2α определяется выражением

$$1 \leq (S_x^2 / S_y^2) < F_{1-\alpha} \quad (7)$$

Этот критерий используется для проверки однородности гидрологических рядов по дисперсии. Исходный ряд делится на две части, затем оцениваются дисперсии для каждой из частей ряда и вычисляется эмпирическое значение статистики Фишера $F^* = S_1^2 / S_2^2$, где $S_1^2 > S_2^2$. Полученное значение F^* сравнивается с табличным значением $F_{1-\alpha}$. Если при принятом уровне значимости оказывается, что $F^* < F_{1-\alpha}$, то расхождение дисперсий считается незначимым и гипотеза об однородности ряда по дисперсии не опровергается.

Критерий Фишера (так же как и критерий Стьюдента) относится к категории стандартных критериев и рекомендуется в большинстве нормативных документов в качестве официального теста на однородность.

Помимо стандартных критериев Стьюдента и Фишера существует еще множество разных критериев, например: Рангово-суммарный критерий Уилкоксона – Манна – Уитни.

Данный критерий был предложен Уилкоксоном и в дальнейшем усовершенствован Манном и Уитни.

Критерий используется для проверки нулевой гипотезы о том, что две независимые выборки принадлежат к совокупности, которые имеют идентичные функции распределения.

Критерий Уилкоксона – Манна – Уитни относится к категории непараметрических критериев и не подразумевает непосредственного расчета выборочных параметров функции распределения.

Достоинством критерия является то, что он не требует обязательной принадлежности выборок к нормальным совокупностям.

Существует также критерий рассеяния Зигеля – Тьюки. Поскольку критерий Уилкоксона является слабо чувствительным к различию выборок по характеристикам рассеяния Зигель и Тьюки предложили другой ранговый критерий. Формально критерий Зигеля – Тьюки позволяет проверить ту же нулевую гипотезу: две независимые выборки относятся к одной и той же генеральной совокупности. Однако этот критерий является более чувствительным именно к различию дисперсий выборок.

Критерий является непараметрическим, так как его распределение тестовой статистики не зависит от типа распределения исходных выборок [6].

2.2 Разностно-интегральная кривая

Способ разностно-интегральной кривой существует для оценки циклических колебаний многих явлений природы. Основоположником был В.Г. Глушаков.

Способ вычисления заключается в том, что для данного ряда наблюдений производится вычисление модульных коэффициентов. Были построены разностно-интегральные кривые по осадкам, стоку и температуре за 12 месяцев.

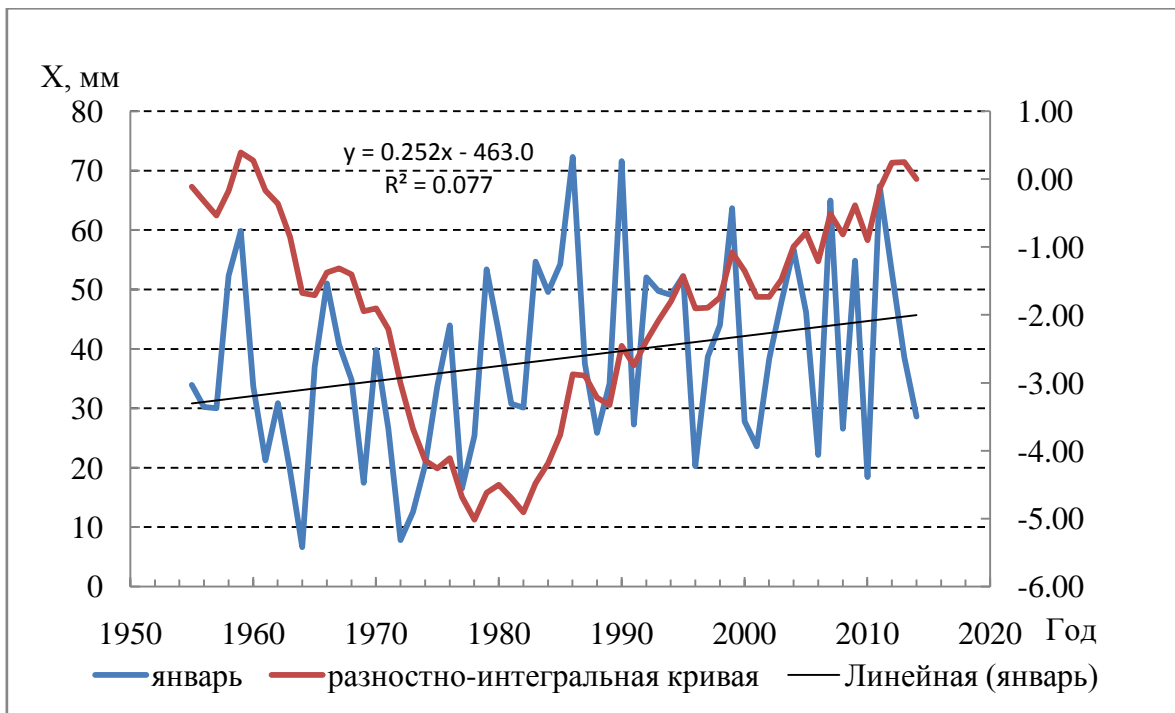


Рисунок 2 – Разностно-интегральная кривая по осадкам за январь

На рисунке 2 видно разделение двух периодов: маловодного и многоводного. А также по линии тренда видно, что осадки за январь с 1954 по 2014 гг. увеличивались.

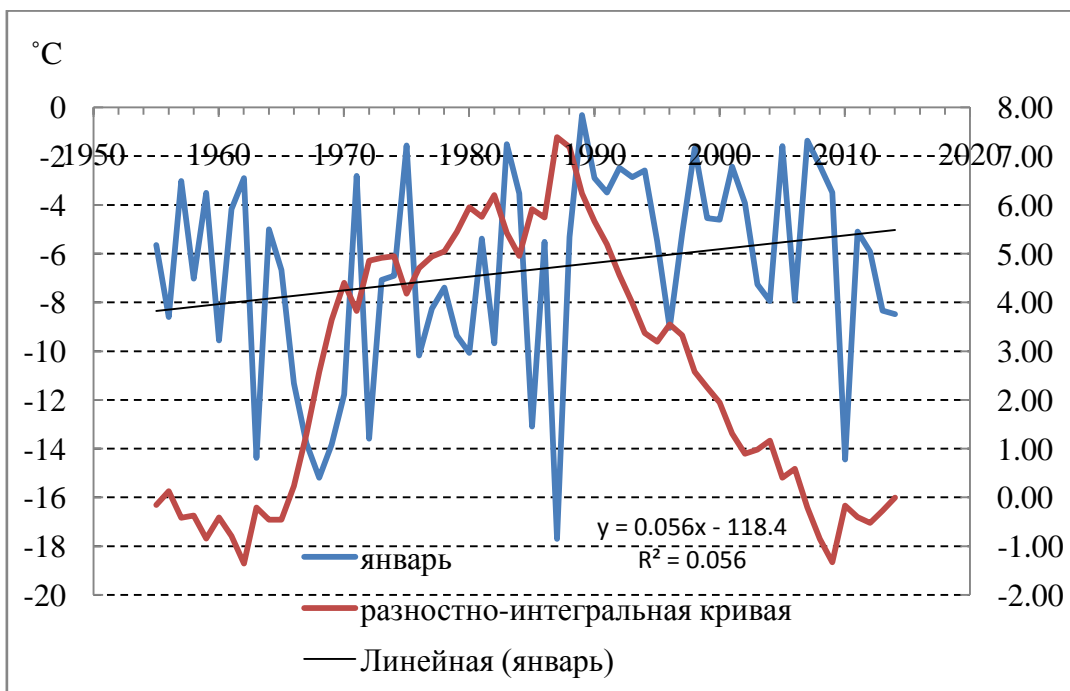


Рисунок 3 – Разностно-интегральная кривая по температуре за январь

На рисунке 3 изображена также линия тренда, по которой видно увеличение температуры в период с 1954 по 2014 гг.

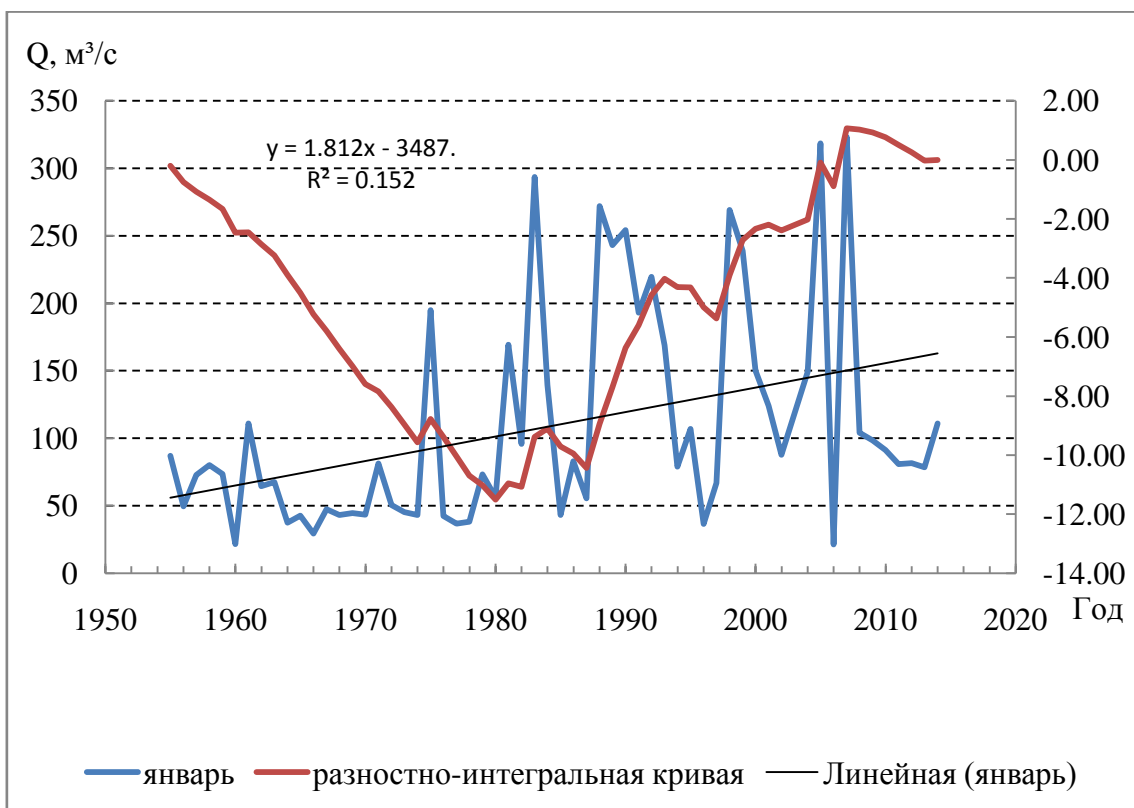


Рисунок 4 – Разностно-интегральная кривая по стоку за январь

На рисунке 4 видно разделение двух периодов: маловодного и многоводного. А также по линии тренда видно, что расход воды с 1954 по 2014 гг. увеличился.

2.3 Статистические параметры и расчет ошибки

На практике наиболее часто встречаются такие статистические параметры как мода, медиана, дисперсия, среднеквадратическое отклонение и другие. Мной были подсчитаны дисперсия, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии по стоку, осадкам и температуре за каждый календарный месяц.

Таблица 1 – Статистические параметры среднемесячной температуры

месяц	t	D	Cv	Cs
январь	-6,7	17,2	-0,6	-0,7
февраль	-6,6	17,8	-0,6	-0,1
март	-2,1	9,9	-1,5	-0,4
апрель	5,4	3,6	0,4	-0,1
май	12,1	3,4	0,2	-0,1
июнь	15,9	2,7	0,1	0,4
июль	17,8	3,0	0,1	0,7
август	16,1	1,7	0,1	0,3
сентябрь	10,9	2,2	0,1	-0,4
октябрь	5,6	2,8	0,3	-0,7
ноябрь	0,1	5,9	32,9	-1,0
декабрь	-4,4	11,6	-0,8	-0,4

В таблице 1 представлены выше упомянутые характеристики по температуре. Из таблицы видно, что самый большой коэффициент вариации был в ноябре и составил 32,9, а что касается коэффициента асимметрии, то он равен -1,0, а это значит что в этом месяце было несимметричное распределение. В феврале, апреле и мае было самое симметричное распределение. Наименьшая средняя температура была в январе и равна $-6,7^{\circ}\text{C}$, наибольшая была в июле – $17,8^{\circ}\text{C}$. Дисперсия наибольшая в феврале (17,8), наименьшая в августе (1,7).

Таблица 2 – Статистические параметры среднемесячных осадков

месяц	X	D	Cv	Cs
январь	38,3	252	0,4	0,2
февраль	31,3	167	0,4	0,6
март	31,2	205	0,5	0,8
апрель	36,0	386	0,5	0,6
май	52,7	406	0,4	0,3
июнь	76,6	979	0,4	0,6
июль	77,0	1198	0,4	0,7
август	77,1	1822	0,6	1,1
сентябрь	59,5	890	0,5	0,7
октябрь	55,1	540	0,4	0,4
ноябрь	48,5	404	0,4	0,3
декабрь	42,8	168	0,3	0,4

В таблице 2 представлены аналогичные характеристики по осадкам. Самый большой коэффициент вариации приходится на август и составляет 0,6, и в этом же месяце самое несимметричное распределение. Самое симметричное распределение приходится на январь, коэффициент асимметрии равен 0,2. Наименьшее количество осадков было в феврале и марте (31,3 и 31,2 соответственно), наибольшее было в последние месяцы лета (в июле 77,0, в августе 77,1). Дисперсия наибольшая в августе (1822), наименьшая в феврале (167).

Таблица 3 – Статистические параметры среднемесячных расходов воды

месяц	Q	D	Cv	Cs
январь	109,0	6546,0	0,74	1,70
февраль	112,0	11421,0	0,95	2,20
март	156,0	15412,0	0,80	1,46
апрель	366,0	48145,0	0,60	0,47
май	200,0	23982,0	0,77	3,72
июнь	98,9	5563,0	0,75	2,42
июль	85,1	4702,0	0,81	2,17
август	90,3	7298,0	0,95	2,45
сентябрь	93,0	6700,0	0,88	1,85
октябрь	111,0	11122,0	0,95	2,37
ноябрь	120,0	7330,0	0,71	1,79
декабрь	114,0	4832,0	0,61	1,65

В таблице 3 представлены такие же характеристики по стоку. Самый большой коэффициент вариации приходится на февраль, август и октябрь и составляет 0,95. В мае самое несимметричное распределение. Самое симметричное распределение приходится на апрель, коэффициент асимметрии равен 0,6. Наименьший расход был зафиксирован в июле (85,1 м³/с), наибольший расход был в апреле и составил 366 м³/с. Дисперсия наибольшая была также в апреле (48145), наименьшая в июле (4702).

На графиках можно увидеть как менялся тот или иной параметр в зависимости от месяца.

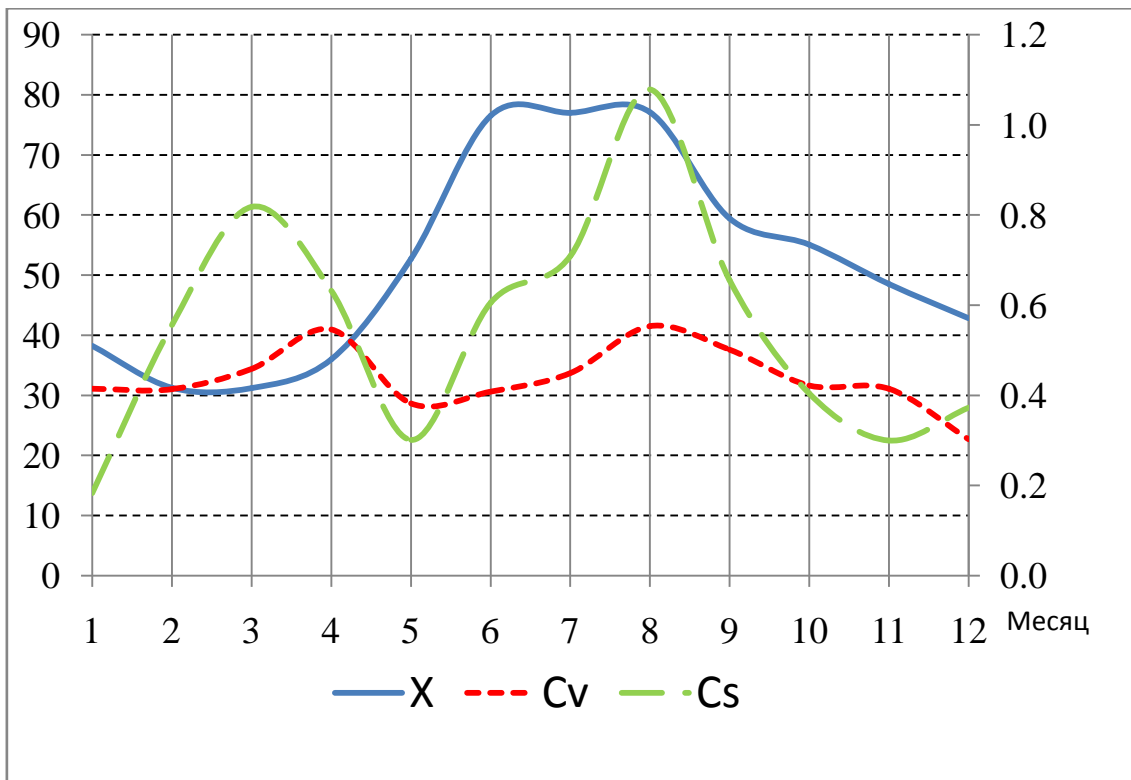


Рисунок 5 – Статистические параметры среднемесячных осадков

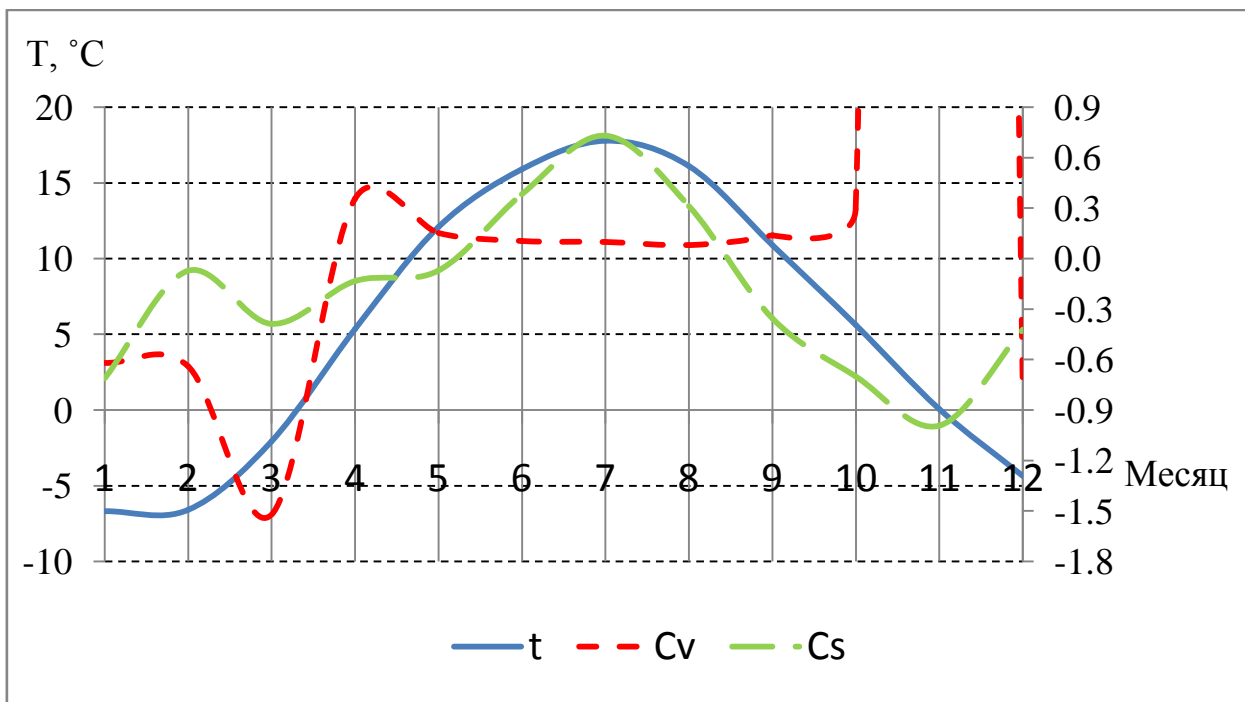


Рисунок 6 – Статистические параметры среднемесячных температур

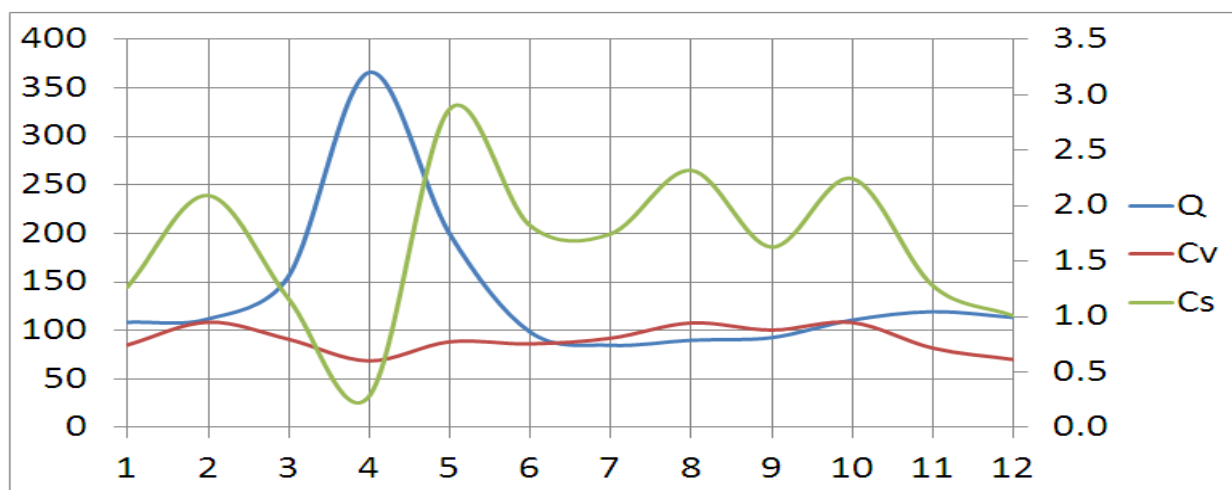


Рисунок 7 – Статистические параметры среднемесячных расходов воды

2.4 Методы расчета оценок параметров распределения

При статистической обработке гидрологических данных используются несколько методов расчета оценок параметров распределения. Эти методы можно условно разделить на три группы: аналитические, графоаналитические и графические.

Графические и графоаналитические методы сочетают в себе элементы аналитического расчета и графические построения.

В аналитических методах оценки параметров распределения представляют собой числа, полученные путем подстановки выборочных значений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ случайных величин X в теоретическую формулу оцениваемого параметра. При этом желательно, чтобы оценка удовлетворяла требованиям состоятельности, несмещенности и эффективности [6].

2.4.1 Графоаналитический метод на основе кривой Пирсона III типа

Методика, применяемая в настоящее время в России, была разработана Алексеевым в 1960 году и предполагает использование кривой Пирсона III типа.

На клетчатку вероятности наносятся точки эмпирической кривой обеспеченностей. При этом по оси ординат следует откладывать значения

исследуемой случайной величины, а не модульные коэффициенты. Затем в поле точек проводится сглаженная кривая.

По сглаженной кривой определяются три опорные ординаты (для обеспеченностей - 5, 50 и 95 %): x_5 , x_{50} , x_{95} .

Дальнейший расчет сводится к тому, чтобы найти такие значения параметров распределения, при которых аналитическая кривая будет проходить через эти точки. Для решения этой задачи трижды воспользуемся формулой:

$$x_5 = \sigma^*_x t_5 + \bar{x}; \quad (8)$$

$$x_{50} = \sigma^*_x t_{50} + \bar{x}; \quad (9)$$

$$x_{95} = \sigma^*_x t_{95} + \bar{x}, \quad (10)$$

где t_5 , t_{50} , t_{95} – нормированные ординаты кривой обеспеченностей Пирсона III типа. Таким образом, имеется три неизвестных параметра и три уравнения.

Для расчета оценки коэффициента асимметрии сначала рассчитаем так называемый коэффициент скошенности S :

$$S = (x_p + x_{100-p} - 2x_{50}) / (x_5 - x_{95}) \quad (11)$$

В данной случае обеспеченность первой ординаты $p = 5\%$, следовательно:

$$s^* = (x_5 + x_{95} - 2x_{50}) / (x_5 - x_{95}) \quad (12)$$

И в итоге получим:

$$s^* = (t_5 + t_{95} - 2t_{50}) / (t_5 - t_{95}), \quad (13)$$

т.е. коэффициент скошенности не изменится при замене x_5 , x_{50} , x_{95} на нормированные ординаты. Но при фиксированном значении p для нормированного распределения Пирсона III типа имеет место однозначная зависимость коэффициента скошенности от коэффициента асимметрии.

Зная коэффициент скошенности, можно определить коэффициент асимметрии.

Выражение для оценки СКО:

$$\sigma^*_x = (x_5 - x_{95}) / (t_5 - t_{95}) \quad (14)$$

Оценку МО находим по формуле:

$$\bar{x} = x_{50} - \sigma_x^* t_{50} \quad (15)$$

Откуда коэффициент вариации равен:

$$C_v^* = \sigma_x^* / \bar{x} \quad (16)$$

Таким образом, аналитическая часть расчета сводится к тому, чтобы посчитать коэффициент скошенности, оценки СКО и МО и коэффициента вариации, используя данные формулы [6].

2.4.2 Графоаналитический метод на основе кривой Крицкого – Менкеля

Хотя кривая Крицкого – Менкеля рекомендуется нормативными документами как основная расчетная кривая, до последнего времени она не использовалась для оценки параметров распределения методом квантилей. Причиной этого является отсутствие для распределения Крицкого – Менкеля однозначной связи между коэффициентом асимметрии C_s и коэффициентом скошенности S .

В 1996 г. на кафедре гидрологии суши РГГМУ была предложена методика, учитывающая специфику данной кривой.

В отличие от стандартной схемы, наряду с обычным коэффициентом скошенности S , рассчитывается коэффициент S_2

$$S_2 = \frac{2x_{50}}{x_5 - x_{95}} = \frac{2k_{50}}{k_5 - k_{95}} \quad (17)$$

Как показали исследования, при фиксированном значении C_s/C_v коэффициент S_2 однозначно зависит от S .

Рассчитав S и S_2 по номограмме можно оценить соотношение C_s/C_v .

Большое значение коэффициента скошенности ($S > 0,6$) указывает на то, что $C_v > 1$. В этой ситуации выборочная оценка соотношения C_s/C_v является крайне ненадежной, и следует отказаться от ее расчета графоаналитическим методом.

При фиксированном C_s/C_v имеет место однозначная зависимость между коэффициентом вариации C_v и коэффициентом скошенности S .

На аналитических кривых обеспеченностей различие в асимметрии будет проявляться прежде всего в области больших и малых значений, т.е. на концах кривых.

Хотя графоаналитический метод является достаточно простым и наглядным, его следует применять с осторожностью, так как проведение сглаженной эмпирической кривой всегда носит субъективный характер и требует определенных практических навыков [6].

2.5 Критерии согласия

Одной из основных задач при определении расчетных гидрологических характеристик является выбор аналитического выражения для аппроксимации закона распределения исследуемой гидрологической величины.

Выбор считается обоснованным, если имеет место хорошее соответствие эмпирической и аналитической кривых обеспеченностей. На практике такой анализ нередко производится визуально, что, вносит элемент субъективизма. Более объективно решить поставленную задачу можно, используя критерии согласия. При этом реализуется схема, аналогичная той, которая применялась при проверке гипотез об однородности гидрологических рядов: выдвигаются нулевая и альтернативная гипотезы; назначается уровень значимости; вычисляется эмпирическое значение тестовой статистики; по результатам расчетов принимается решение.

В данной случае в качестве нулевой принимается гипотеза о соответствии (согласии) аналитической и эмпирической функций распределения, а в качестве альтернативной – их несоответствие.

Степень согласия оценивается с помощью специальных статистик. Различные критерии используют для оценки степени согласия разные статистики [6].

2.5.1 Критерий χ^2

Критерий χ^2 был предложен в начале XX в. Карлом Пирсоном и в настоящее время является наиболее распространенным критерием согласия. Для его применения область допустимых значений исследуемой случайной величины X разбивается на k интервалов.

При назначении границ интервалов наиболее удобно использовать следующую схему.

1. Выбрать аналитическую кривую для аппроксимации закона распределения исследуемой случайной величины.
2. Оценить по имеющейся выборке параметры распределения.
3. Построить на клетчатке вероятности аналитическую кривую обеспеченностей.
4. Разбить ось обеспеченностей на k равных интервалов.
5. Используя аналитическую кривую, определить границы интервалов для случайной величины X в зависимости от границ интервалов на оси обеспеченностей.

При реализации данной схемы интервалы по оси X не будут равновеликими, но зато вероятность попадания значения случайной величины X в любой интервал будет одинаковой $p = 1/k$. Одинаковым будет и теоретическое число случаев попадания значения случайной величины в каждый интервал $m = n/k$ (n – длина выборки).

Критерий χ^2 может быть применен при выяснении вопроса о лучшем соответствии одной из нескольких аналитических кривых распределения одному и тому же эмпирическому ряду. При этом меньшее значение χ^2 будет свидетельствовать о лучшем соответствии данной функции распределения эмпирическим данным.

Использование критерия Пирсона для выборок небольшого объема может привести к неправильным выводам, а ряды наблюдений за гидрологическими характеристиками обычно не превышают несколько десятков лет. Из-за этого данный критерий не всегда можно использовать [6].

2.5.2 Критерий Колмогорова

В качестве меры отличия эмпирических данных от аналитической функции распределения А.М. Колмогоров принимает наибольшее по абсолютной величине расхождение между эмпирической $P^*(x)$ и аналитической $P(x)$ функциями обеспеченностей.

$$\Delta = \max |P^*(x) - P(x)| \quad (18)$$

Вычисления по критерию Колмогорова производятся следующим образом. Для каждого значения случайной величины X , полученного по выборке, вычисляются $P^*(x)$, $P(x)$ и их разности. Затем выбирается наибольшая по модулю разность Δ и рассчитывается статистика.

Расчетная схема для критерия согласия Колмогорова достаточно проста. Вместе с тем этот критерий имеет определенные недостатки, в частности, при его применении учитывается лишь наибольшее расхождение между эмпирической и аналитической функциями распределения, т.е. используется далеко не вся информация, заключенная в рядах наблюдений. Оценка согласия по одной точке может в отдельных случаях плохо отражать соответствие эмпирических данных теоретическому закону распределения. К тому же наибольшая разность Δ обычно отмечается в средней части кривой распределения, в то время как в гидрологической практике нас чаще интересуют ее левая и правая части. Кроме того, данный критерий не учитывает числа параметров, входящих в теоретическую функцию распределения, хотя на практике оценку каждого из них приходится производить по эмпирическим данным.

Отмеченные недостатки не исключают возможности применения критерия Колмогорова в гидрологических расчетах. Статистика λ может быть применена и для сравнения степени соответствия нескольких аналитических функций распределения применительно к одному эмпирическому материалу аналогично тому, как это было указано при использовании критерия χ^2 [6].

2.5.3 Критерий $\rho\omega^2$ (Крамера – Мизеса – Смирнова)

Тестовой статистикой данного критерия является средний квадрат отклонений между аналитической $P(x)$ и эмпирической $P^*(x)$ функциями обеспеченностей по всем значениям случайной величины X .

Использование данного критерия более трудоемко, но это компенсируется наиболее полным использованием информации, заключенной в фактических рядах наблюдений.

Применение этого критерия предполагает знание не только типа распределения, но и параметров, обычно оцениваемых по выборке, что может приводить к признанию нуль-гипотезы даже в случае недостаточного согласования аналитических и эмпирических функций обеспеченностей [6].

2.6 Гистограммы. Частота повторяемости

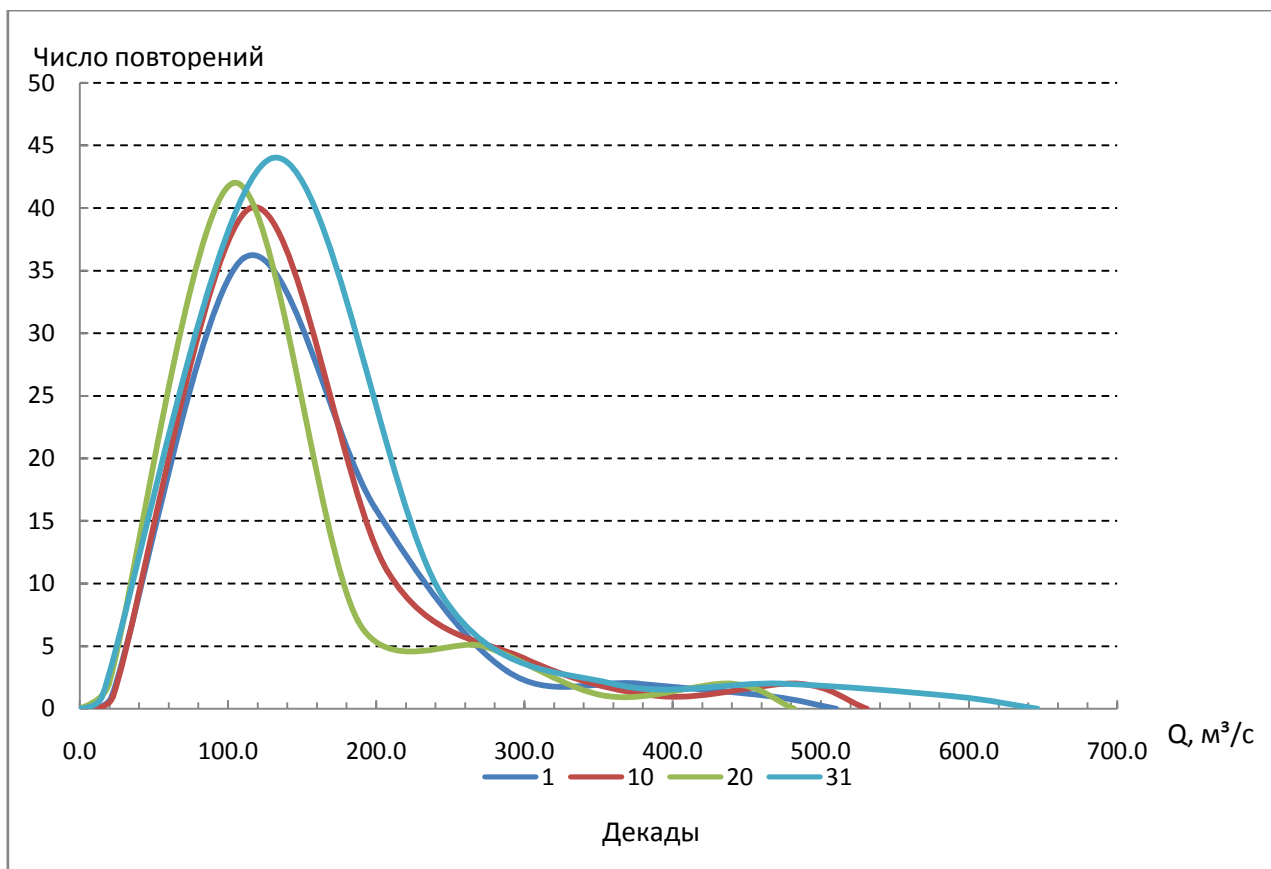


Рисунок 8 – Частота повторяемости среднемесячных расходов воды по декадам за январь

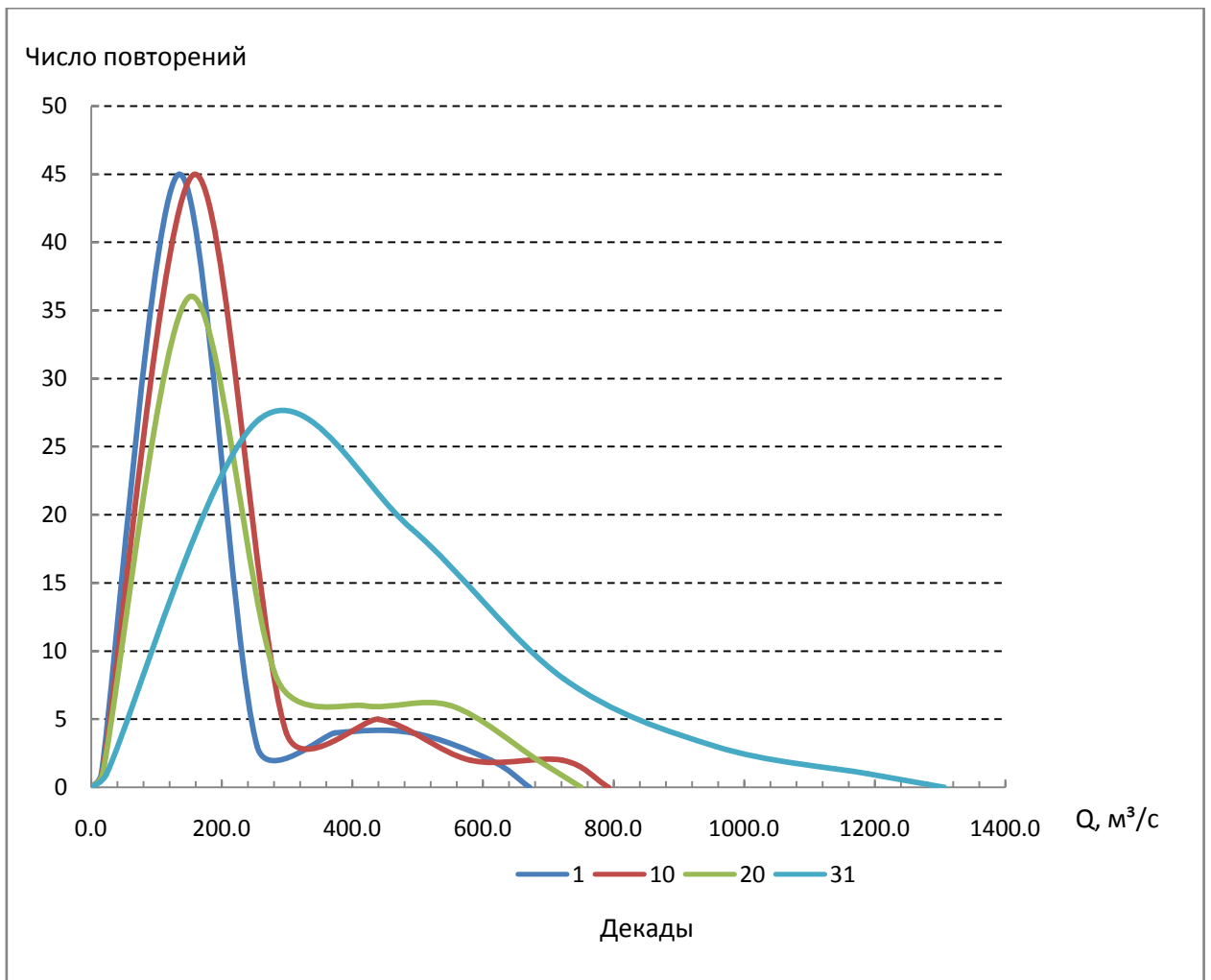


Рисунок 9 – Частота повторяемости среднемесячных расходов воды по декадам за март

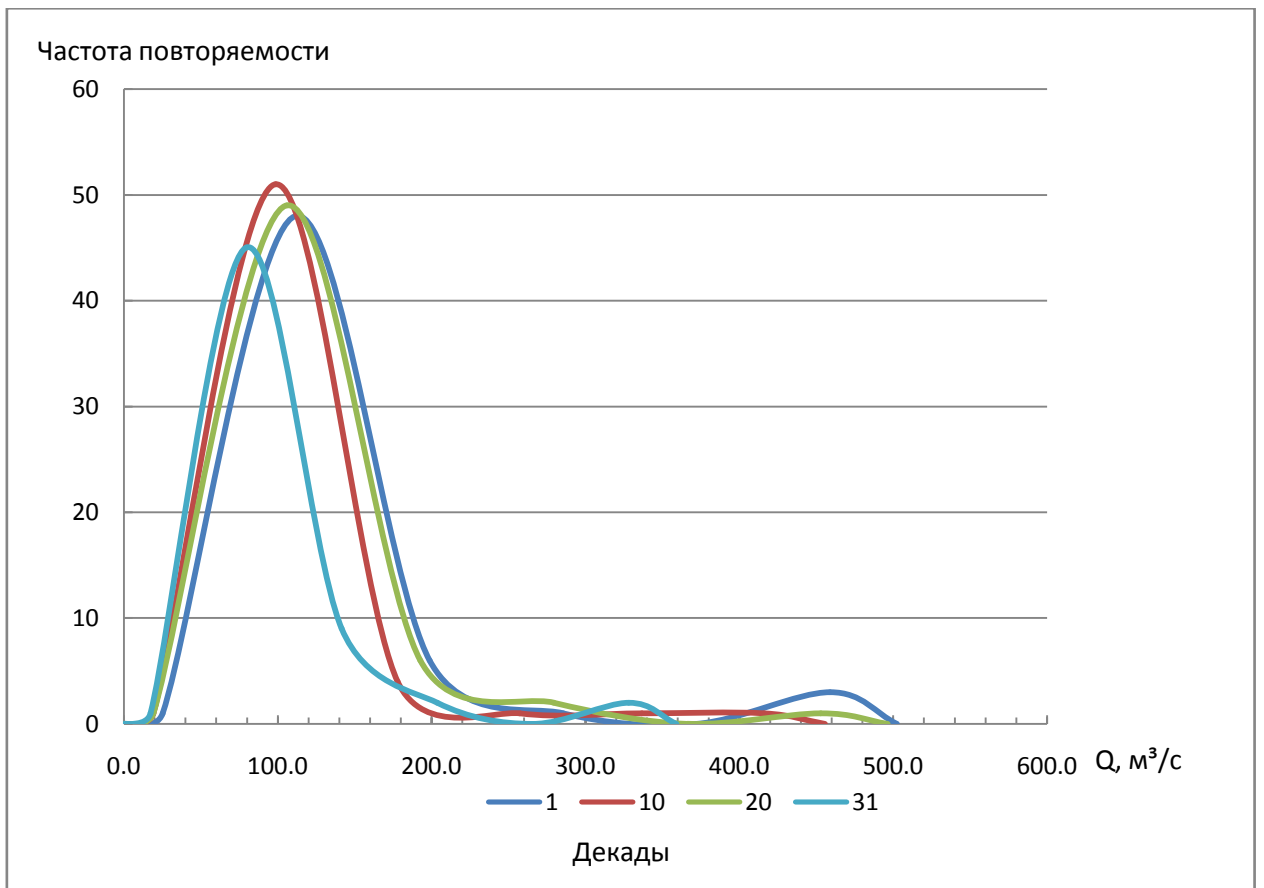


Рисунок 10 – Частота повторяемости среднемесячных расходов воды за июль

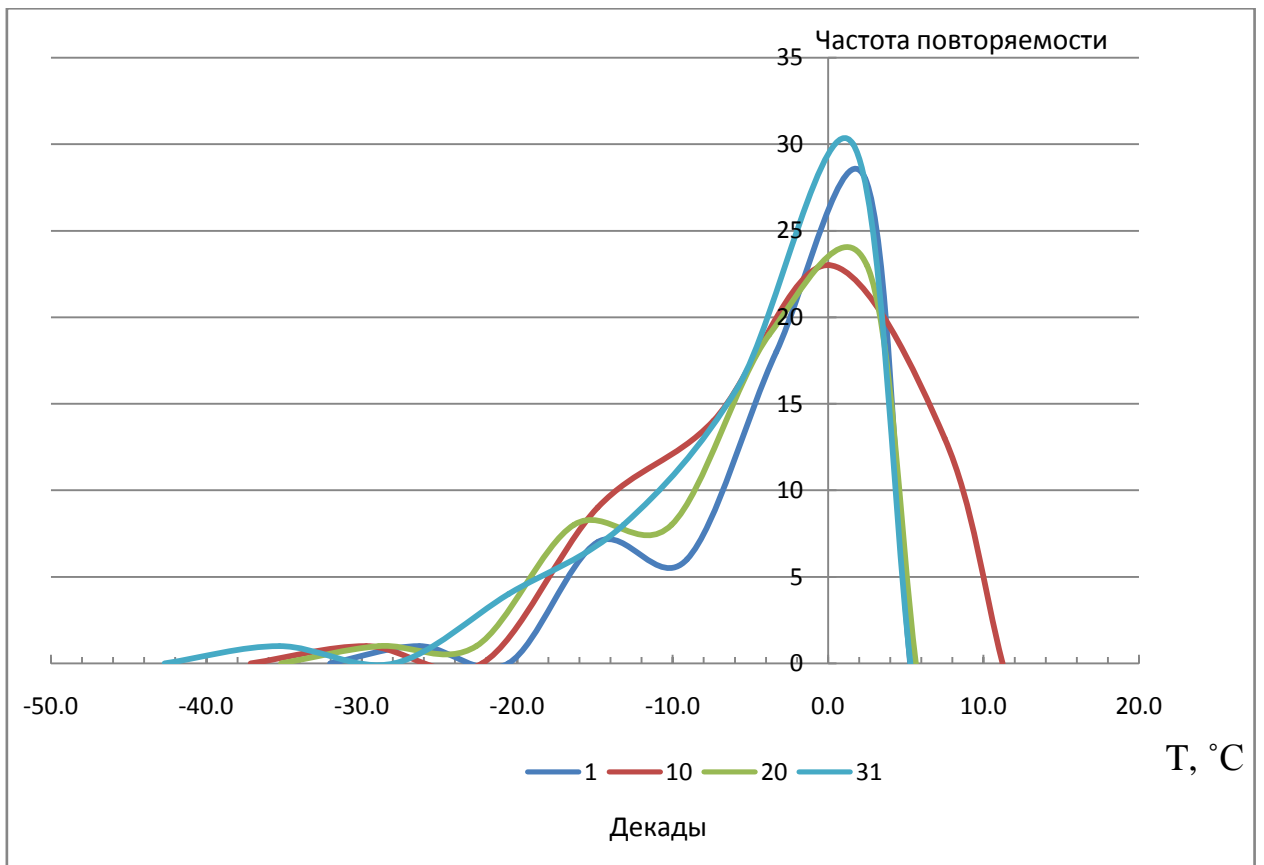


Рисунок 11 – Частота повторяемости среднемесячных температур за январь

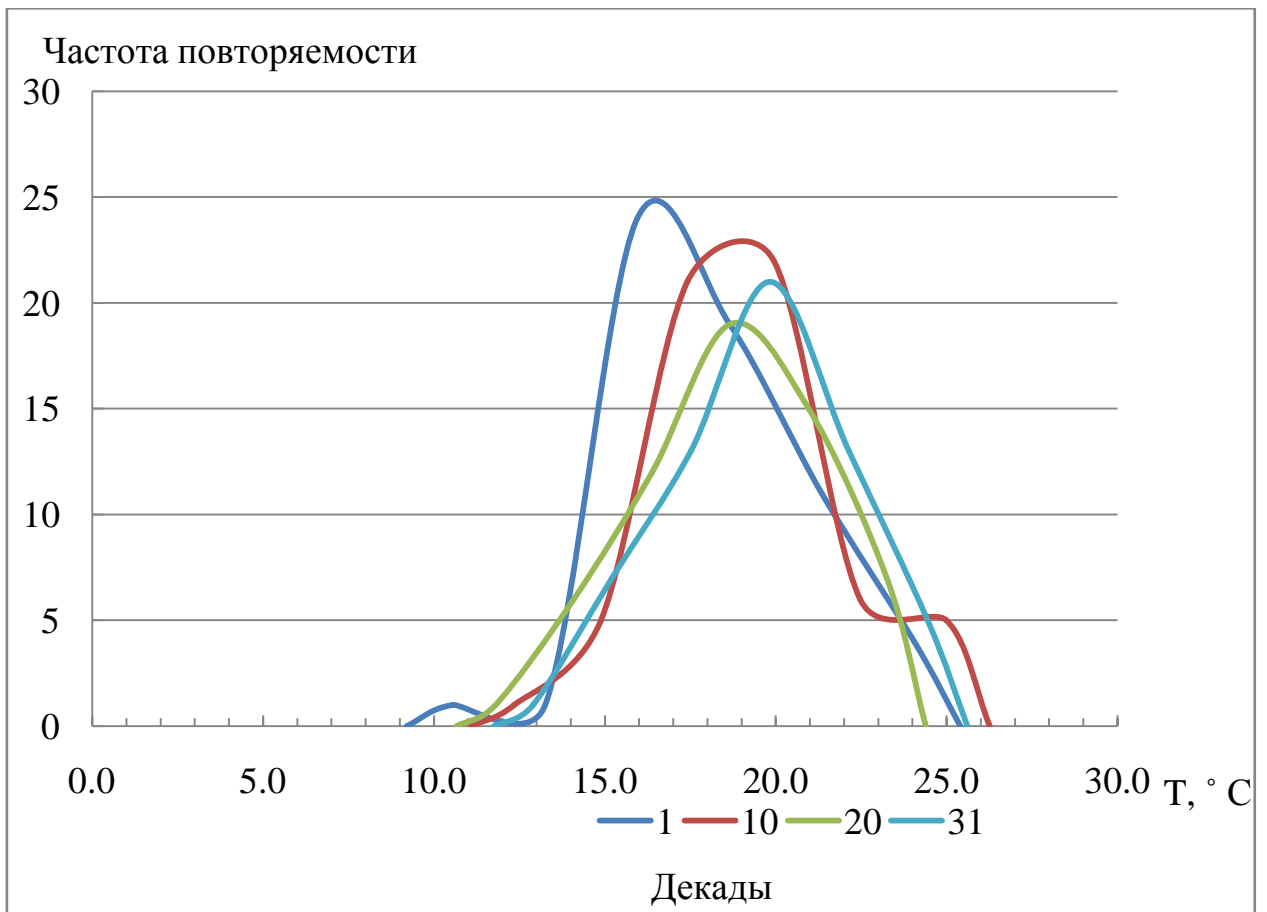


Рисунок 12 – Частота повторяемости среднемесячных температур за июль

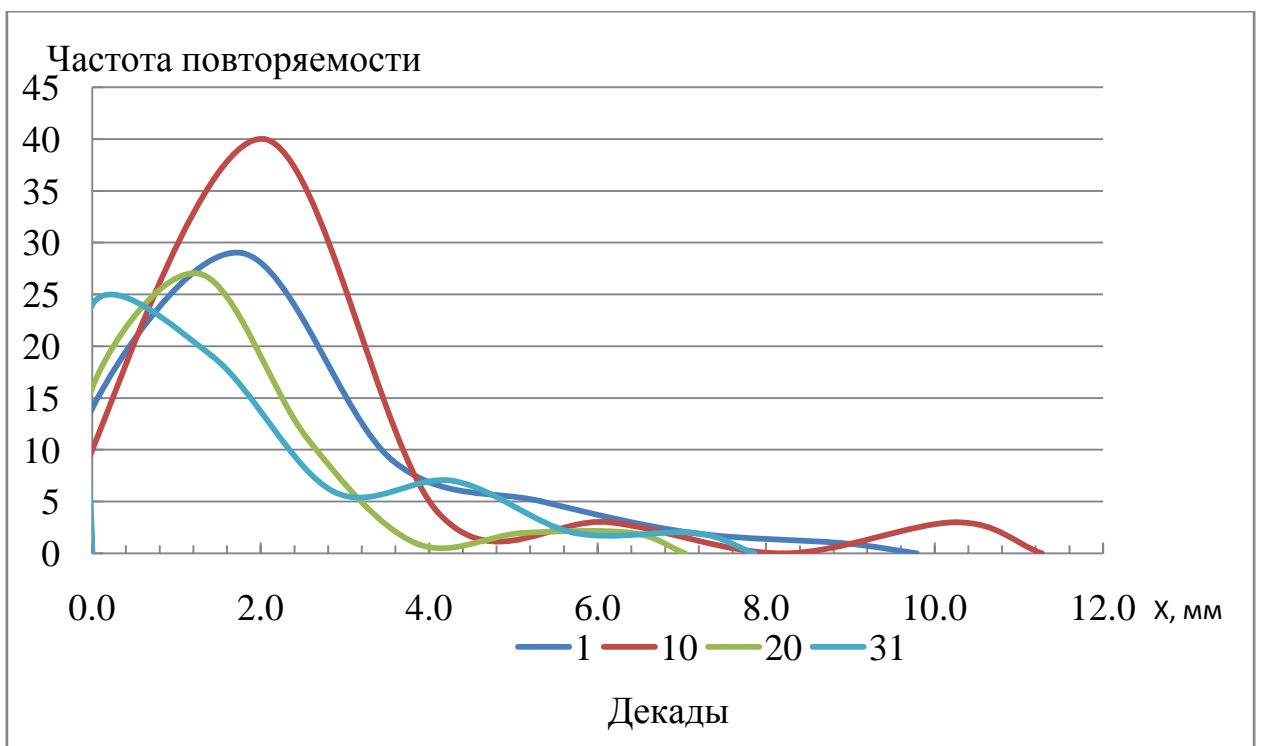


Рисунок 13 – Частота повторяемости среднемесячных осадков за январь

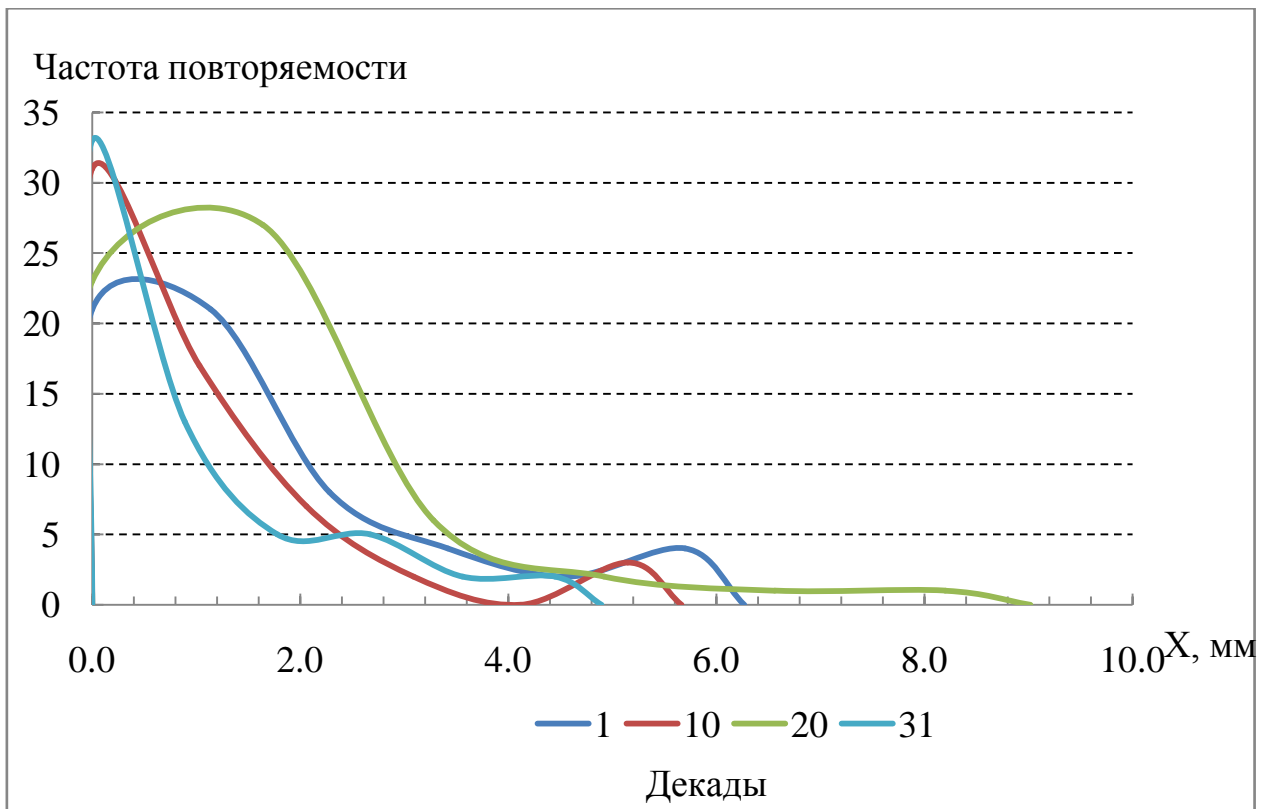


Рисунок 14 – Частота повторяемости среднемесячных осадков за март

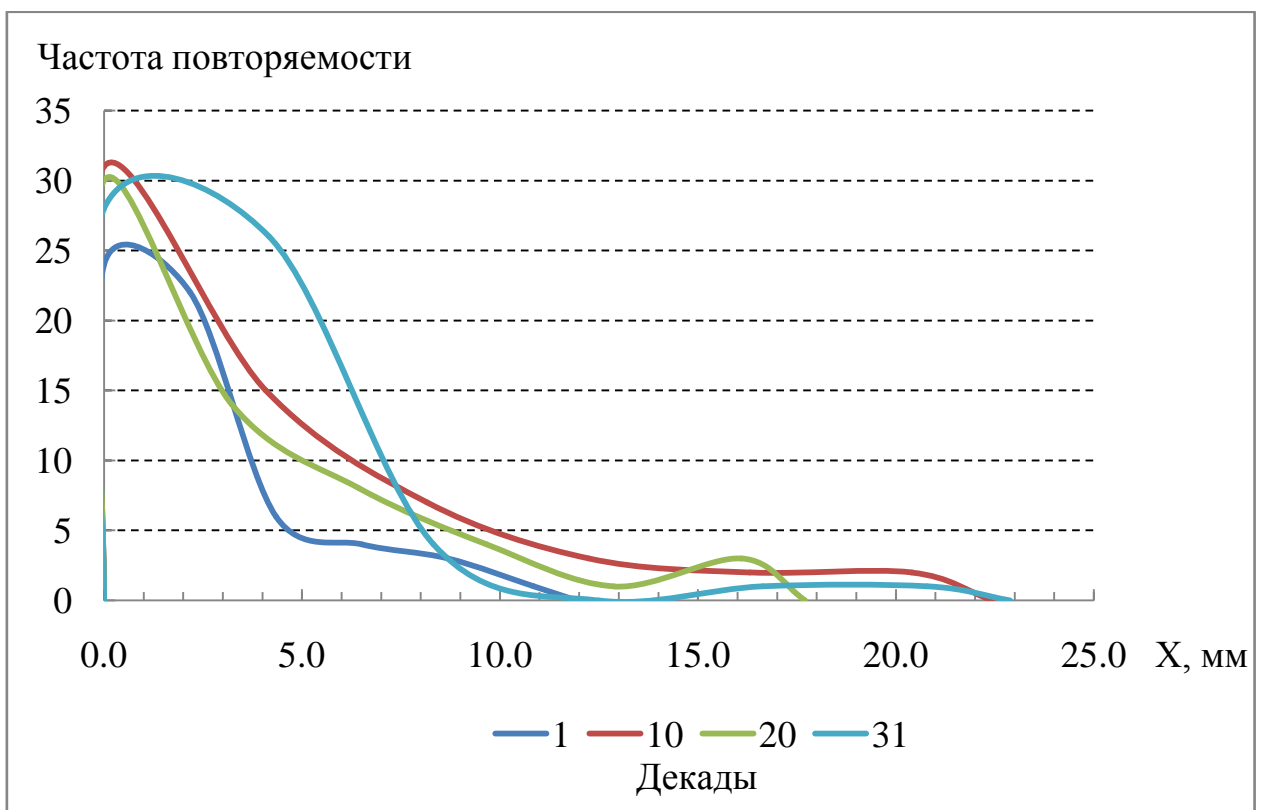


Рисунок 15 – Частота повторяемости среднемесячных осадков за июль

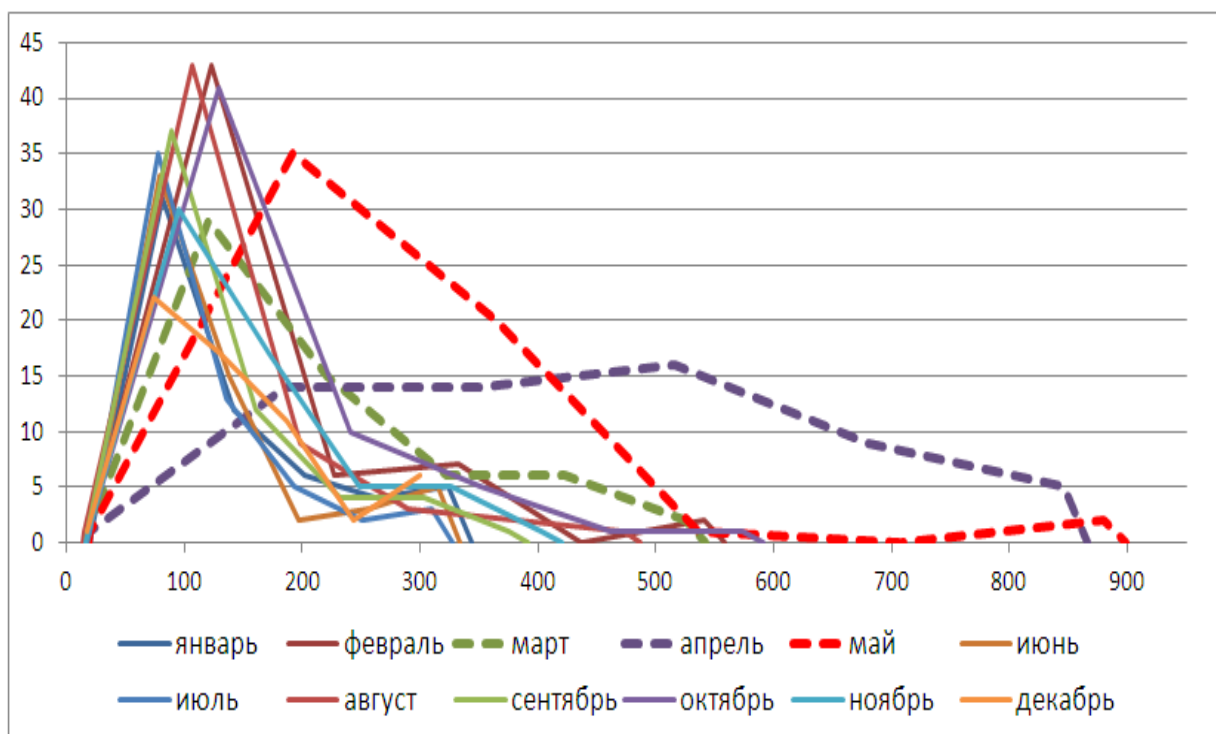


Рисунок 16 – Частота повторяемости расходов воды

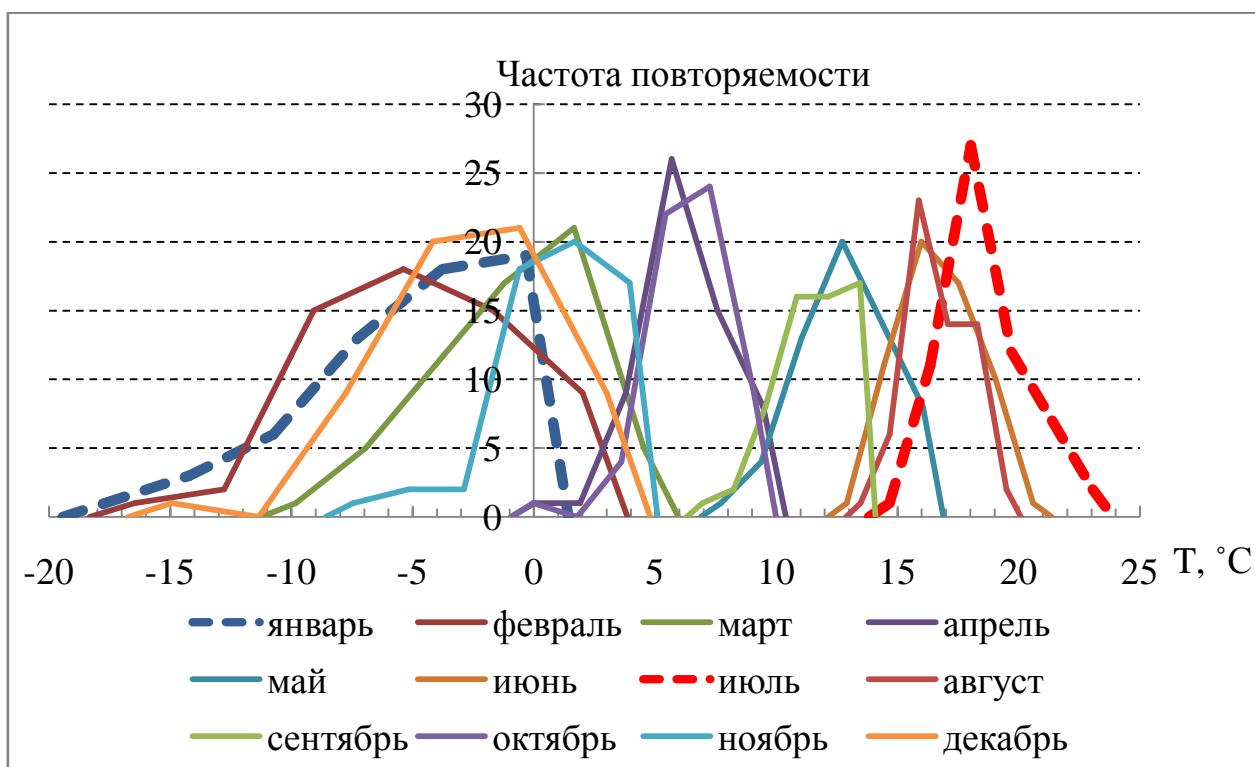


Рисунок 17 – Частота повторяемости среднемесячной температуры

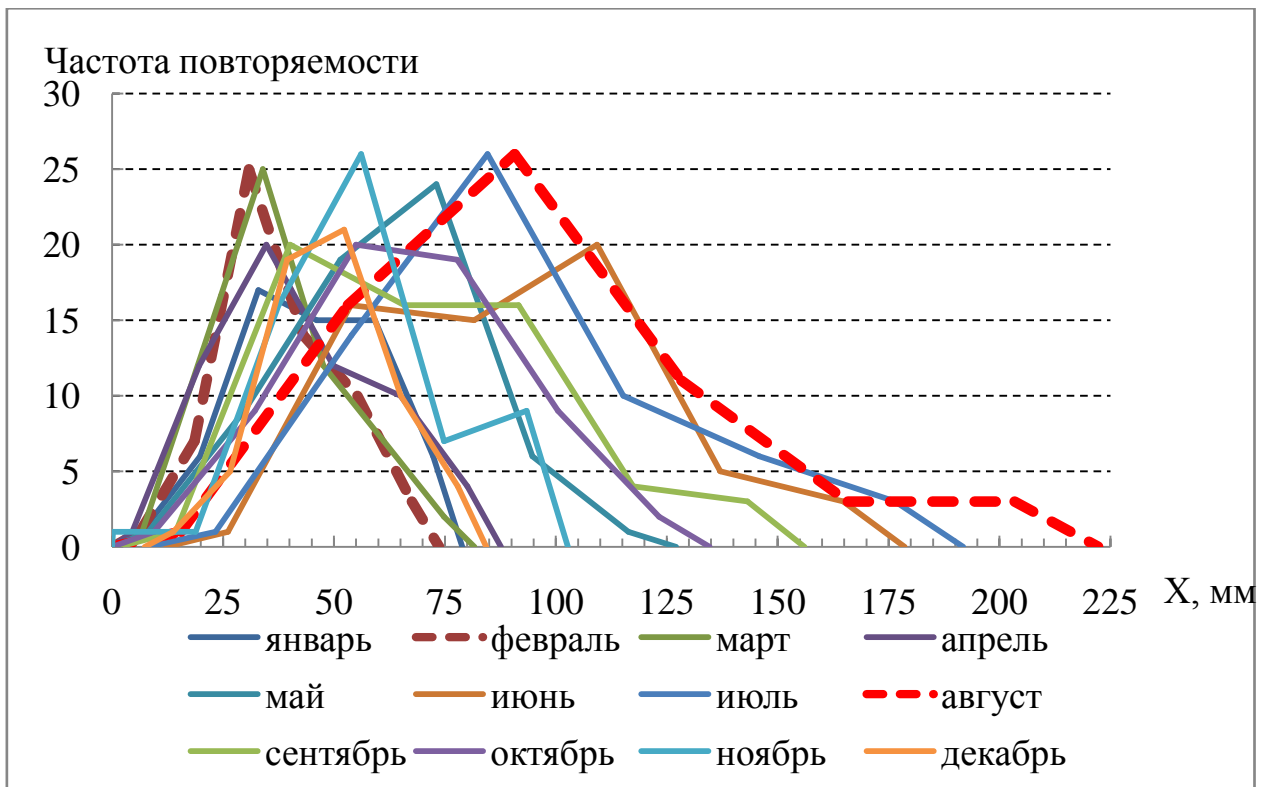


Рисунок 18 – Частота повторяемости среднемесячных осадков

3 Расчет параметров распределения

3.1 Выводы об однородности

Таблица 4 Однородность рядов

Однородность (сток)		Однородность (осадки)		Однородность (t)		
Месяц	Стьюдент	Фишер	Стьюдент	Фишер	Стьюдент	Фишер
январь	-	-	-	+	-	+
февраль	-	-	-	+	+	+
март	-	-	-	+	-	+
апрель	+	+	+	+	-	+
май	+	-	+	+	+	+
июнь	-	-	-	-	+	+
июль	+	-	+	+	-	+
август	+	-	-	-	-	+
сентябрь	+	-	+	+	+	+
октябрь	+	+	+	+	+	+
ноябрь	+	+	+	+	+	+
декабрь	+	+	+	+	+	+

Все данные были проверены на однородность по критерию Стьюдента и Фишера. Для проверки были выбраны два теста: двухвыборочный t-тест с одинаковыми дисперсиями и двухвыборочный F-тест для дисперсии.

Общий ряд был поделен на две части и после этого была произведена проверка на однородность.

В первом тесте сравнивались две характеристики: t-статистика и t критическое двухстороннее, если t-статистика по модулю меньше чем t критическое двухстороннее, то ряд считается однородным, в другом случае – неоднороден. Во втором тесте сравнивались F и F критическое одностороннее, если F меньше чем F критическое, то ряд считается однородным, если F больше F критического – неоднородным.

В стоке по Стюденту неоднородны ряды за январь, февраль, март, июнь; по Фишеру наоборот больше однородных рядов, чем неоднородных, всего четыре ряда были однородными (апрель, октябрь, ноябрь, декабрь). В осадках по Стюденту однородными ряды были за апрель, май, июль и последние четыре месяца года, по Фишеру все ряды однородны, кроме июня и августа, которые впрочем неоднородны и по Стюденту. Что касается рядов температуры и их однородности, то все ряды по Фишеру однородны, по Стюденту неоднородными оказались пять рядов (январь, март, апрель, июль, август). Ряд за август является самым неоднородным по всем параметрам, он однороден лишь по Стюденту в стоке и по Фишеру (температура).

Из таблицы видно, что по Фишеру ряды были более однородны, чем по Стюденту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе поставленной работы была сформирована база ежедневных и месячных данных по стоку (расходы воды) и метеорологическим характеристикам (осадки и температура) за многолетний период времени (1955-2014 гг.)

Мной были рассчитаны среднегодовые расходы воды, в ходе которых я получил, что минимальный расход воды приходится на 1973 год и равнялся $69,3 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальный расход воды был в 1990 году и составил $289,2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Также мной были рассчитаны среднегодовые осадки, максимальное количество осадков выпало на 2009 год – $70,2 \text{ мм}$; минимальное количество осадков пришлось на 1964 год – $35,4 \text{ мм}$.

Что касается среднегодовых температур, то минимальная температура была зафиксирована в 1956 году и равнялась $2,9 \text{ }^\circ\text{C}$, в 1989 году была самая максимальная температура, которая составила $7,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Все данные были проверены на однородность по критерию Стьюдента и Фишера. Для проверки были выбраны два теста: двухвыборочный t-тест с одинаковыми дисперсиями и двухвыборочный F-тест для дисперсии.

Общий ряд был поделен на две части и после этого была произведена проверка на однородность.

В первом тесте сравнивались две характеристики: t-статистика и t критическое двухстороннее, если t-статистика по модулю меньше чем t критическое двухстороннее, то ряд считается однородным, в другом случае – неоднороден. Во втором тесте сравнивались F и F критическое одностороннее, если F меньше чем F критическое, то ряд считается однородным, если F больше F критического – неоднородным.

В стоке по Стьюденту неоднородны ряды за январь, февраль, март, июнь; по Фишеру наоборот больше однородных рядов, чем неоднородных, всего четыре ряда были однородными (апрель, октябрь, ноябрь, декабрь). В осадках по Стьюденту однородными ряды были за апрель, май, июль и

последние четыре месяца года, по Фишеру все ряды однородны, кроме июня и августа, которые впрочем неоднородны и по Стьюденту. Что касается рядов температуры и их однородности, то все ряды по Фишеру однородны, по Стьюденту неоднородными оказались пять рядов (январь, март, апрель, июль, август). Ряд за август является самым неоднородным по всем параметрам, он однороден лишь по Стьюденту в стоке и по Фишеру (температура).

Мной были подсчитаны дисперсия, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии по стоку, осадкам и температуре за каждый календарный месяц.

Самый большой коэффициент вариации по температуре был в ноябре и составил 32,9, а что касается коэффициента асимметрии, то он равен -1,0, а это значит что в этом месяце было несимметричное распределение. В феврале, апреле и мае было самое симметричное распределение. Наименьшая средняя температура была в январе и равна $-6,7^{\circ}\text{C}$, наибольшая была в июле – $17,8^{\circ}\text{C}$. Дисперсия наибольшая в феврале (17,8), наименьшая в августе (1,7).

Самый большой коэффициент вариации по осадкам приходится на август и составляет 0,6, и в этом же месяце самое несимметричное распределение. Самое симметричное распределение приходится на январь, коэффициент асимметрии равен 0,2. Наименьшее количество осадков было в феврале и марте (31,3 и 31,2 соответственно), наибольшее было в последние месяцы лета (в июле 77,0, в августе 77,1). Дисперсия наибольшая в августе (1822), наименьшая в феврале (167).

. Самый большой коэффициент вариации по стоку приходится на февраль, август и октябрь и составляет 0,95. В мае самое несимметричное распределение. Самое симметричное распределение приходится на апрель, коэффициент асимметрии равен 0,6. Наименьший расход был зафиксирован в июле ($85,1 \text{ м}^3/\text{с}$), наибольший расход был в апреле и составил $366 \text{ м}^3/\text{с}$. Дисперсия наибольшая была также в апреле (48145), наименьшая в июле (4702).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хапок.ru // Базы и водоёмы [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://hapok.ru/>
2. Earthpapers.net // Диссертации / Гидрология суши [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://earthpapers.net/>
3. allbest // Водный баланс [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://knowledge.allbest.ru/>
4. Росприроднадзор // Федеральная экологическая информация Псковской области [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://60.rpn.gov.ru/>
5. Гидрогеологическая и геоэкологическая компания ГИДЭК // Библиотека ГИДЭК/ Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.hydrogeoecology.ru/>
6. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник. Специальность "Гидрология" направления подготовки "Гидрометеорология". – СПб.: изд. РГГМУ. 2007. – 279 с.
7. Гидрологические ежегодники. Бассейн Балтийского моря. Под редакцией И. В. Кузнецова, В. И. Антиповой и Т. Ф. Эйпре. Ленинград.
8. Метеорологические ежемесячники.
Главное управление Гидрометеорологической службы при совете министров СССР, Северно-западное управление Гидрометеорологической службы

Приложение А

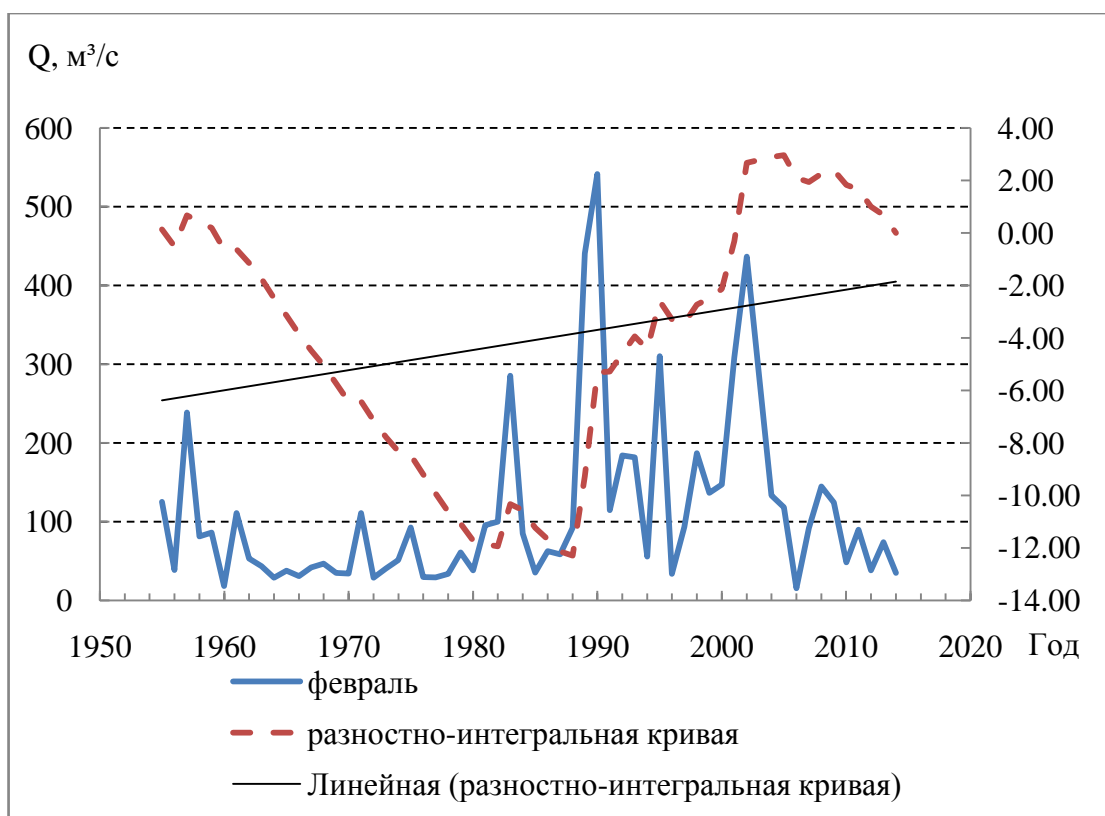


Рисунок А.1 – Разностно-интегральная кривая по стоку за февраль

Приложение Б

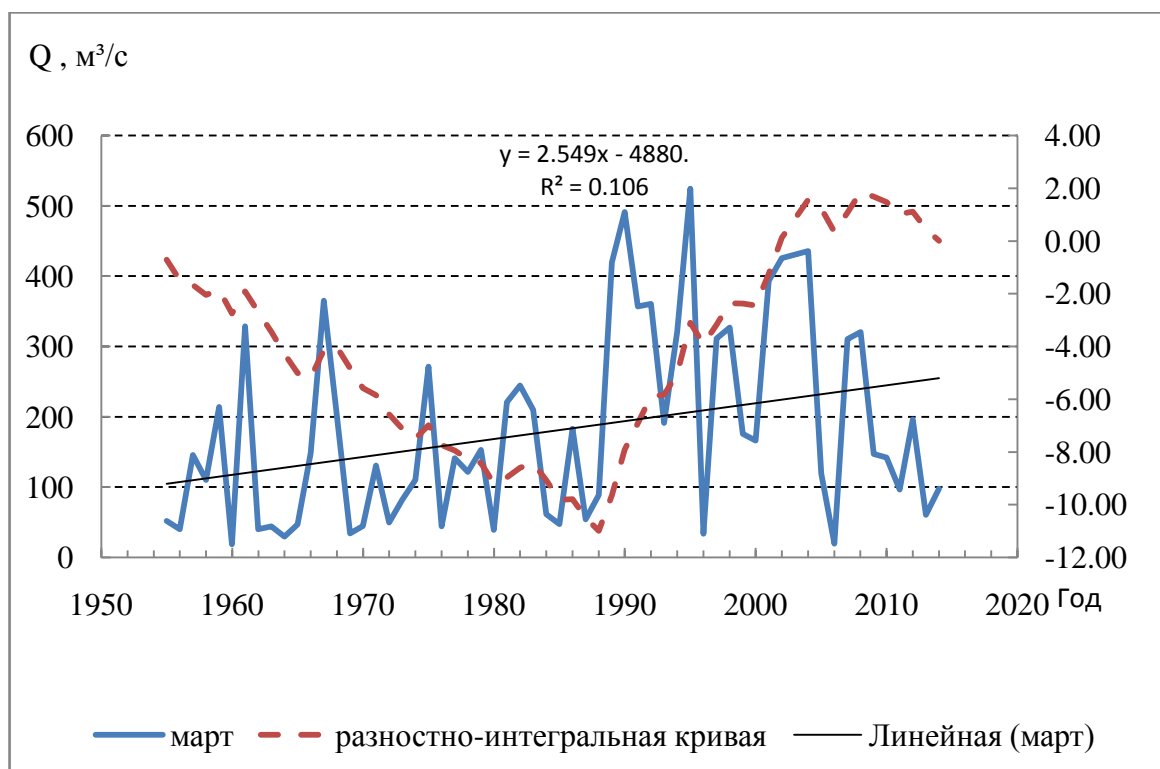


Рисунок Б.2 – Разностно-интегральная кривая по стоку за март

Приложение В

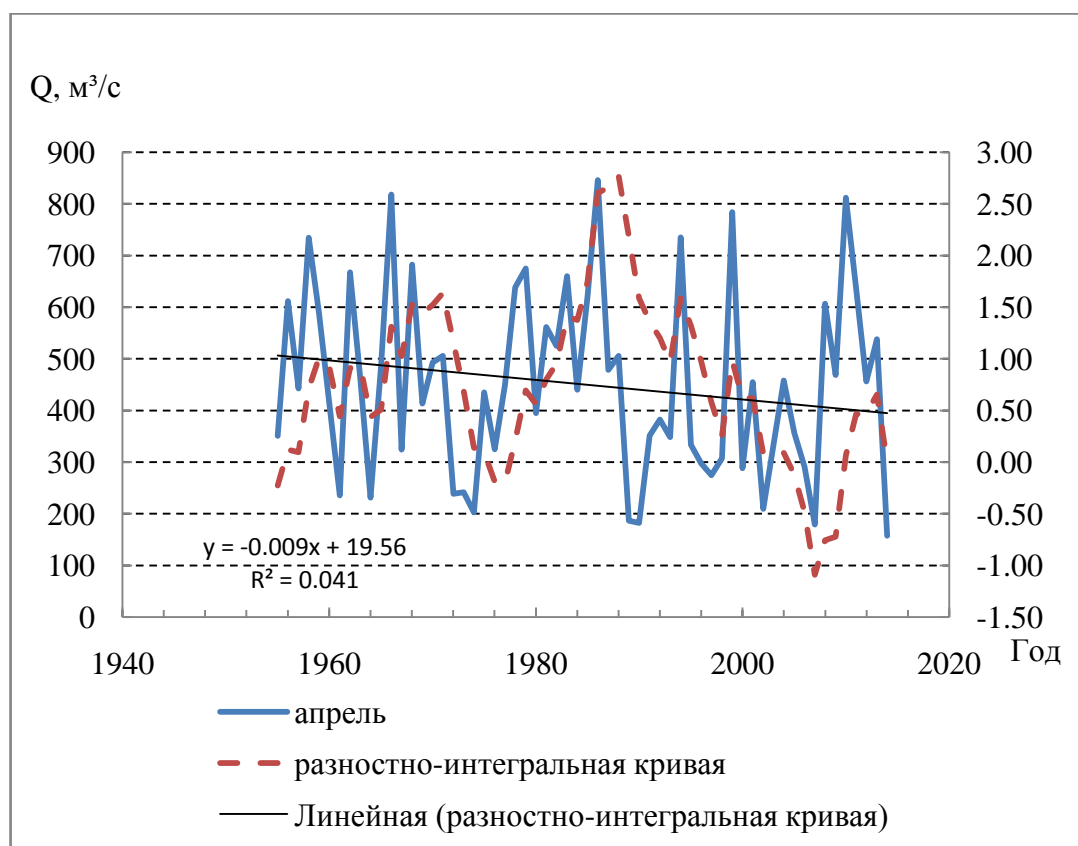


Рисунок В.3 – Разностно-интегральная кривая по стоку за апрель