



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 работа)

На тему Периодограммы рядов скоростей
течения рек Ленинградской области

Исполнитель Мезенин Евгений Сергеевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

«09» июня 2017г.

Санкт-Петербург
2017.



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 работа)

На тему Периодограммы рядов скоростей
течения рек Ленинградской области

Исполнитель Мезенин Евгений Сергеевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)
кандидат технических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)
Хаустов Виталий Александрович
(фамилия, имя, отчество)

« » 20 г.

Санкт–Петербург
2017

Содержание

| | Стр. |
|--|------|
| Введение | 3 |
| 1 Методология частично инфинитного моделирования | 5 |
| 1.1 Ликвидация неустойчивости решений модели методами частично инфинитного моделирования | 5 |
| 1.2 Уравнение неустановившегося режима движения речного потока | 9 |
| 2 Метод выделения периодов (метод Шустера) | 15 |
| 3 Формирование базы данных для исследования | 24 |
| 3.1 Инструментарий | 24 |
| 3.2 Ряды скоростей течения рек Ленинградской области | 26 |
| 4 Обработка рядов скоростей течения рек | 29 |
| 4.1 Построение периодограмм рядов скоростей | 32 |
| Заключение | 45 |
| Список использованных источников | 46 |
| Приложение А – Скорости потока р. Стрелка | 47 |

ВВЕДЕНИЕ

Для описания процесса неустановившегося движения воды в открытых руслах используются дифференциальные уравнения, впервые полученные Сен-Венаном в 1871 году. Существуют различные формы записи этих уравнений.

Система уравнений одномерной гидравлической идеализации для деформируемых русел способна решать непростые задачи, связанные с прогнозами паводков и половодий, размывами в нижних бьефах ГЭС, сгонно-нагонными явлениями и т. п.

Однако существуют проблемы, которые не представляется возможным решить посредством данной системы. Это образование в быстротоках периодических поверхностных волн; низкочастотные колебания скорости в реках и каналах при неизменных граничных условиях, грядообразование [1].

Система уравнений Сен-Венана:

$$i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Q^2}{C^2 R F^2} + \frac{1}{gF} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2\alpha Q}{gF^2} \frac{\partial Q}{\partial x}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1(x, t); \quad (2)$$

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = q_2(x, t); \quad (3)$$

$$G = f(d, U, \dots). \quad (4)$$

где i_0 – уклон реки, ‰;

h – уровень воды, м;

Q^2 – расход воды, м³/с;

C^2 – коэффициент Шези;

F – площадь поперечного сечения, м²;

R – гидравлический радиус, м;

q_1 – модуль притока, м²/с.

Целью исследования является выявление низкочастотных колебаний в пульсациях скоростей в натурных данных на примере р. Стрелка.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- а) провести измерения пульсации скоростей потока при различных соотношениях уклона поверхности и уклона дна;
- б) провести обработку полученных рядов скоростей речных потоков;
- в) рассчитать период низкочастотных колебаний скоростей потока по методу Шустера.

1 Методология частично инфинитного моделирования

1.1 Ликвидация неустойчивости решений модели методами частично инфинитного моделирования

Данный раздел написан по источникам [1, 2, 3]

В чем отличие частично инфинитное моделирование от моделирования? В широком смысле – «ничем», а в узком смысле – «всем». Моделирование подразумевает корректную постановку задачи: выписываем уравнения, которые отражают действующие в моделируемом объекте закономерности. Которые в свою очередь дополняются информацией (граничными и начальными условиями), которые гарантируют существование и единственность решения. Также его непрерывную зависимость от условий и параметров уравнений, то есть устойчивость. Буквально, с одной стороны, что мы будем моделировать, если решение вообще не существует или не устойчиво? Но, с другой стороны, правильно «финитно» можно моделировать только системы, в которых не происходит ничего нового, имеется только место количественные изменения составляющих вектора состояния. Если при использовании жестких требованиях к классу допустимых решений добиться успеха не удастся, то эту «финитность» начинают размывать: расширять функциональные пространства в которых ищут решения и задают исходную информацию (например переходят к та называемым обобщенным решениям).

А если мы хотим моделировать процессы развития, качественные скачки? Нельзя, «отвечает» классическая наука. Она права: жестко зафиксировав изучаемую предметную область набором рациональных понятий, по-другому никак, нельзя прогнозировать появление чего-то принципиально нового, который не входит в набор этих рациональных понятий, иначе это уже не наука, а угадывание. А если мы все-таки хотим,

пусть не в полном объеме, иначе мы бы стали богом моделируя творческие процессы? Если захотеть, то все «можем», но «частично инфинитно», то есть нарушая условия корректности. На самом деле все, что появляется в науке нового, для этого наука и существует, получается путем частично инфинитного моделирования, нарушения корректности.

Чтобы было понятнее, давайте рассмотрим пример.

Пусть сток моделируется уравнением:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{k\tau} Q + \dot{x}, \quad (5)$$

где Q – расход воды, м³/с;

k – коэффициент стока;

τ – время добегания;

\dot{x} – интенсивность осадков, м³/с.

Величины (Q , k , τ , \dot{x}) это и есть «финитное» – конечный набор рациональных понятий, под расходом воды есть решение, то есть численные значения, имеющие размерность м³/с, полученные путем рационального решений над рациональными понятиями, которые входят в это уравнение. Все что в это уравнение не входит (например, циклон, который формирует осадки), считается полностью инфинитные понятия.

Но для корректности решения надо знать начальные значения расхода, то есть начальное условие. Оно получается из измерений, то есть с использованием совсем других рациональных (гидрометрических) понятий, которые не входят в предметную область, фиксируемую моделью. Таким образом, начальное условие $Q|_{t=t_0}$ частично инфинитно для этой модели – это граница между гидрологией и гидрометрией.

В более кратком смысле слова под частично инфинитным моделированием понимаем моделирование процессов развития, то есть математическое описание процесса расширения набора переменных вектора

состояния системы (фазовые переменные). Такое моделирование частично инфинитно, так как в рамках стартовой модели нельзя прямо указать на качество новых фазовых переменных.

Основная предпосылка философии состоит в том, что окружающая нас реальность (какой бы природы она ни была) гносеологически структурируется на отдельные предметные области, фиксируемые субъективной системой взаимодействий. Сам факт фиксации объекта реальности (предметной области) уже говорит о том, что он стал для нас финитным (выразим в образах или понятиях). Все, что за пределами этой рациональной фиксации – инфинитное окружение. При этом любые две предметные области инфинитны по отношению друг к другу, то есть «вторая» предметная область не выразима в рациональных структурах «первой», и наоборот. Граница между предметными областями – частично инфинитна. Это означает, что коэффициенты моделей осуществляют «интерфейс» между финитной предметной областью, которая характеризуется переменным состоянием, и инфинитным окружением, которое вызывает «шумы». При их определенной интенсивности возникает неустойчивость, которая приводит к тому, что задаваемые коэффициенты становятся искомыми финитными переменными состояния расширенной предметной области.

Под речным стоком в данной работе мы понимаем, многолетний годовой, минимальный и максимальный сток, характеристики которых нормируются СНиПами [4]. Однако излагаемая ниже методология пригодна, с оговорками и дополнениями, и для других видов стока (склонового, руслового и т. д.)

Идея частично инфинитного моделирования предполагает, что изучаемая предметная область (речной бассейн в данном случае) описывается конечным (и небольшим) числом фазовых переменных, взаимодействующих друг с другом, а их селективная ценность связана с инфинитным окружением, которое через частично инфинитную границу

влияет на коэффициенты модели, которые определяют эту ценность. Остановимся подробнее на этой «конечномерности».

Многолетний сток представляется, а значит можно говорить о поле речного стока $\varphi(x, y, t)$ и его формальном математическом представлении

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = L(\varphi), \varphi|_{t=0} = \varphi_0 \quad (6)$$

где L – нелинейный дифференциальный оператор.

Решение системы можно представить в виде ряда по некоторой системе базисных ортогональных функций

$$\varphi(t, x, y) = \sum_i \psi_{ik} \Phi_i(x, y) \quad (7)$$

Подставляя, что в и применяя процедуру Галеркина, получают для определения функций $\psi_{ik}(t)$ систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{\psi}_N = F_N(\psi_1, \dots, \psi_N; t), \psi(0) = \psi_0 \quad (8)$$

Существуют несколько веских аргументов, чтобы в ряду ограничиться конечным числом N слагаемых.

Первый. Обычно в физических задачах, например в гидромеханике вязкой жидкости, конечно мерность Галеркинской аппроксимации связывают с действием вязкости, «выжигающей» высокочастотные составляющие поля скорости. В нашем случае роль такой «вязкости» может играть точность оценки норм тех или иных характеристик, используемых при построении карт.

Второй. Говорить о поле стока можно, и то условно, учитывая фрагментарность речных водосборов, только в отношении его зональных характеристик. Роль той же вязкости играют репрезентативные площади водосборов, исключая влияние азональных факторов (например, для лесной зоны ≈ 1000 км)

Поэтому конечномерность подразумевается как само собой разумеющаяся. Для водосборов система сводится к виду:

$$\dot{\psi}_N = \sum a_{ijk} \psi_j \psi_k + \sum b_{ij} \psi_j + c_i, \quad (9)$$

$$\psi_i(\mathbf{o}) = \psi_{i0}; \quad i = \overline{1, N}, \quad (10)$$

причем заменой переменных систему можно сделать однородной.

В данной значении N не больше четырех (устанавливается методами фрактальной диагностики) и основной задачей является разработка технологии, позволяющей по мере необходимости изменять N .

1.2 Уравнение неустановившегося режима движения речного потока

В главе излагает исследование из источника [3].

В середине XX в. было открыто явление низкочастотных колебаний скорости в безнапорных потоках. Период находился в диапазоне от минуты до десятков минут, в зависимости от гидравлических характеристик потока в створе измерения (уровни воды, уклоны, гидравлические сопротивления). Участки рек, на которых наблюдали подобное явление, имели стационарные граничные условия, которые не могли породить периодических процессов.

Открытие это связывают с такими именами, как С.И. Коплан-Дикс, В.В. Дементьева и японца Иокоси. В работе приводятся результаты непрерывных измерений скорости в течении 48 минут одновременно на семи вертикалях в точках $0,6 h$, где h – глубина реки на вертикали, при устойчивом русле р. Полометь. Были обнаружены 20-минутные периоды колебаний с амплитудой 8 % от осредненного значения скорости.

Низкочастотные пульсации Гринвальд относит их к типу внешней масштаб турбулентности. Они охватывают всю вертикаль, в результате чего пульсирующим оказывается и расход воды». С турбулентностью он их не связывает. Что касается колебаний в 10 минут и более, то их физическая природа связана скорее с формированием стока на данной реке, различными атмосферными осадками, чем с турбулентностью.

Продолжительные непрерывные измерения скоростей в естественных потоках обнаруживают существование пульсаций с очень большими периодами – порядка минут и даже десятка минут. Пульсации столь низкой частоты охватывают всю вертикаль, а наиболее сильные из них – все живое сечение реки, так что пульсирующим оказывается и сам расход воды. их физическая природа недостаточно ясна. Скорее всего, они связаны с неравномерностью мгновенного расположения вихрей масштаба l_0 вдоль потока (с вариациями типа вихревой цепочки).

Так как сам факт явления низкочастотной пульсации расхода (или осредненной по сечению потока скорости) не опровергался (любой экспериментатор мог их обнаружить, анализируя результаты достаточно длительных измерений продолжительностью в несколько периодов), то естественно начались поиски периодических решений уравнений одномерной гидравлической идеализации – системы Сен-Венана. Наиболее глубоко и последовательно этим занимался известный гидролог Н. А. Картвелишвили. Однако попытки получить замкнутые структурные образования (предельные циклы) на фазовой плоскости, соответствующей гиперболической системе Сен-Венана, закончились неудачей, рисунок 1.1

(наличие подобных циклов указывало бы на то, что низкочастотные пульсации скорости – автоволновое свойство решений модели одномерной гидравлической идеализации, рисунок 1.2).

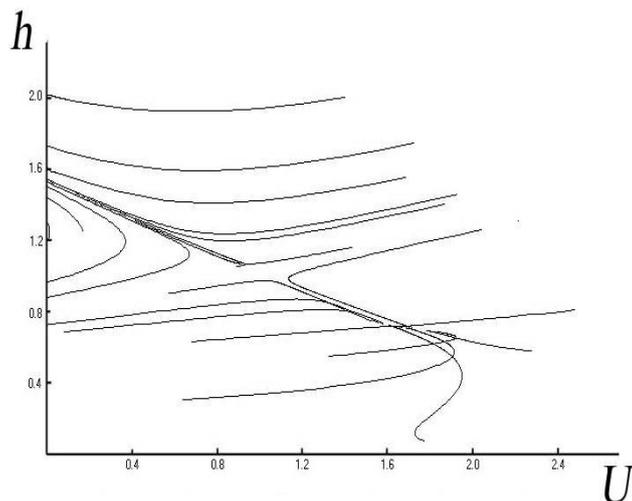


Рисунок 1.1 – Фазовые портреты при отсутствии замкнутых циклов.

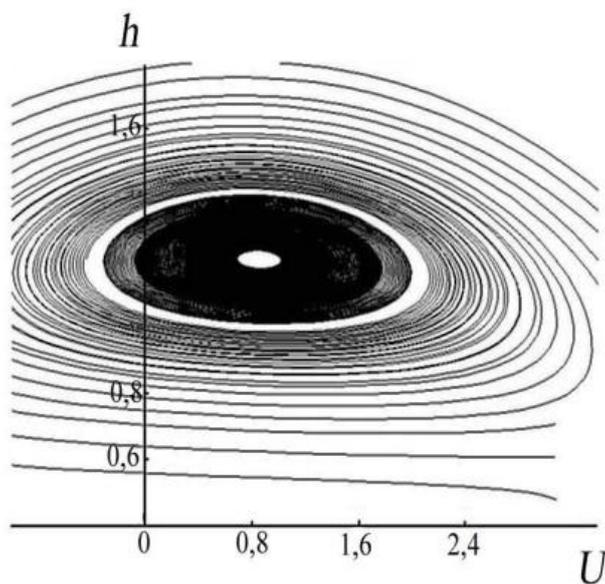


Рисунок 1.2 – Фазовые портреты при наличии замкнутых циклов.

Сущность открытия заключается в том, что периодические низкочастотные колебания скорости действительно являются решениями уравнений системы Сен-Венана (она таких решений не имеет), а их модификации. Последняя сводится к тому, что коэффициент

гидравлического сопротивления λ (или связанный с ним коэффициент Шези C) перестает рассматриваться как задаваемый параметр. Начинает считаться равноправной фазовой переменной, наряду с расходом и уровнем.

Коэффициент C зависит не только от наполнения русла, как это следует из классических формул гидравлики, но и от полного ускорения

$$\frac{dU}{dt} = U, \quad (11)$$

то есть

$$\frac{\partial c}{\partial U^2} \neq 0, \quad (12)$$

причем

$$\frac{\partial c}{\partial U^2} \geq 0 \quad (13)$$

ускорение снижает сопротивления.

Этот факт был установлен теоретически и подтвержден на натуральных данных экспериментально по рекам Тверце и Свирь, на которых в шестидесятые годы проводились уникальные исследования неустановившегося движения по заказу Министерства обороны СССР.

Учёт этого главного обстоятельства меняет на определенных частотах тип модели с гиперболического на эллиптический. Это и приводит к появлению колебаний скорости. Условия, при которых это происходит и формула, связывающая период колебаний с гидравлическими характеристиками потока, были установлены путем проецирования модернизированной модели одномерной гидравлической идеализации на одну фазовую переменную – расход (скорость) в предположении, что информация

об уровне известна. При этом мы приходим к так называемому обобщенному уравнению Риккати (искомая функция – расход или скорость), которое, путем ряда известных в математике преобразований, сводится к линейному однородному уравнению второго порядка. Последнее, в зависимости от знака коэффициента (зависящего от гидравлических характеристик) дает (или не дает) колебательные решения, период которых (оценка расстояний между последовательными нулями колеблющегося решения) определяется теоремой Штурма. Этот период T дается формулой:

$$T = \pi C R^{0.5} / g \sqrt{I - i_0}, \quad (14)$$

где R – гидравлический радиус;

g – ускорение свободного падения;

I – уклон водной поверхности;

i_0 – уклон дна.

Эта формула определяет не только период рассматриваемых колебаний в зависимости от гидравлических характеристик, но и указывает на условия, при которых они существуют, то есть $I > i_0$. При $I \rightarrow i_0$ режим движения становится равномерным. То есть показывает, что он всегда не устойчив, в реальности его не существует – река «дрожит», период колебаний формально стремится к бесконечности. Применяя к модернизированной модели своеобразную операцию ее проецирования на одну из переменных (расход или скорость), считая при этом вторую переменную (уровень) известной из измерений, мы приходим к моделям, из которых можно определить период экспериментально наблюдаемого явления колебаний. В терминах фазовых пространств это означает появление в них замкнутых циклов. Опуская подробные преобразования, приведем лишь узловые их ступени:

Система Сен-Венана модернизируется путем ввода в нее новых зависимостей для гидравлических сопротивлений

$$\lambda_{\text{нст}}/\lambda_{\text{уст}} = f(dUdt, \omega), \quad (15)$$

где $\lambda_{\text{нст}}/\lambda_{\text{уст}}$ – отношение неустойчившегося $\lambda_{\text{нст}}$ и установившегося $\lambda_{\text{уст}}$ значений коэффициентов гидравлического сопротивления;
 $dUdt, \omega$ – частота и полное ускорение.

2 Метод выделения периодов (метод Шустера)

В исследованных временных рядах имеются достаточно строгие периодичности. Спектральный анализ не представит их так очевидно, к тому же он теряет всю информацию о фазе колебаний, содержащуюся в исходном ряду. Для получения значения фаз должен быть использован метод периодограммного анализа А. Шустера.

Метод открыт в 1898г. и нашел широкое применение в практике различных геофизических исследований, как один из основных методов выделения скрытых периодичностей во временных рядах. Следует указать на одно из важных достоинств метода, а именно, его более высокую избирательность по сравнению с методом спектрального анализа. Вследствие, этого, особенно при анализе коротких рядов наблюдений, периодограммный метод может иметь и самостоятельное значение.

Рассмотрим краткие теоретические предпосылки метода Шустера [6]. Известно, что любую функцию $f(t)$ можно представить рядом Фурье:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nqt + b_n \sin nqt), \quad (16)$$

где a_0 – среднее ряда значений;

$$q = \frac{2\pi}{N};$$

N – число наблюдаемых моментов $f(t)$.

Точность функции $f(t)$ будет определяться числом измерений (наблюдений). Вне пределов этого ряда его значения будут повторяться, так как входящие в него периоды являются кратными взятому промежутку и никакого реального значения не имеют.

Однако при изучении внутренней структуры исследуемого ряда необходимо найти действительные периоды. Для этого выражение записывается в виде:

$$f(t) = a_0 + A_1 \sin(q_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(q_2 t + \varphi_2) + \dots + l(t), \quad (17)$$

где $q_1 = \frac{2\pi}{T_1}, q_2 = \frac{2\pi}{T_2}, \dots;$

$T_1, T_2 \dots$ – действительные периоды;

A_1, A_2 – их амплитуды;

$l(t)$ – некоторая неизвестная ограниченная непериодическая функция.

Данный ряд менее точно выражает функцию $f(t)$, чем ряд Фурье, однако он может дать более или менее точно приближенные значения для исследуемой функции вне пределов рассматриваемого ряда.

Чтобы найти параметры периодичности T в исследуемом ряду, весь ряд данных делят на отрезки величиной с предполагаемый период T (остаток отбрасывается). Здесь один отрезок помещается под другим и производится суммирование по вертикальным столбцам:

| | | | |
|---------|------------------------------------|--------------------------------------|---|
| | x_0 | x_1 | $x_2 \dots \dots \dots x_{T-1}$ |
| | x_T | x_{T+1} | $x_{T+2} \dots \dots \dots x_{2T-1}$ |
| | | | |
| | $x_{(m-1)T}$ | $x_{(m-1)T+1}$ | $x_{(m-1)T+2} \dots \dots \dots x_{mT-1}$ |
| Суммы | Σ_0 | Σ_1 | $\Sigma_2 \dots \dots \dots \Sigma_{T-1}$ |
| Среднее | \bar{x}_0 | \bar{x}_1 | $\bar{x}_2 \dots \dots \dots \bar{x}_{T-1}$ |

Далее вычисляются a_T, b_T, A_T и φ_T :

$$a_T = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^{T-1} x_t \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right), \quad (18)$$

$$b_T = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^{T-1} x_t \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right), \quad (19)$$

По вычисленным амплитудам и фазам для различных пробных периодов строится график, где по оси абсцисс откладываются периоды, а по оси ординат – амплитуды соответствующих периодов. Получается периодограмма. Максимумы на периодограмме указывают на возможные периоды, характеризующие закономерности данного ряда.

При разложении в ряд Фурье ограниченного числа данных могут быть получены максимумы для периодов, которые вовсе не присущи данному ряду, так называются ложные периоды. Они получаются в виде вторичных максимумов. Для их обнаружения Шустером выведена формула:

$$S_1 = S \left(1 \pm \frac{1.43}{n}\right), \quad (20)$$

где n – число вошедших в ряд периодов.

Эти ложные периоды отличаются от истинных тем, что с увеличением ряда соответствующие им максимумы на периодограмме приближаются к максимуму истинного периода, который в отличие от них остается без изменения.

Для определения истинности обнаруженной в каком-либо ряду периодичности Шустер предлагает использовать величину отношения амплитуды этого периода к ее математическому ожиданию. Малые величины этого отношения дают основание предполагать, что выявленная периодичность является случайной. Чем больше амплитуда будет превышать математическое ожидание, тем вероятнее наличие вариации с данным периодом в исследуемом ряду.

Поскольку исследуемые ряды различны по существу, то и критерий истинности определяется Шустером несколько отлично для рядов разного рода. Шустер выделяет два рода рядов. К рядам первого рода относятся

ряды, содержащие величины, характеризующие частоту появления отдельных событий одного и того же рода независимо от их величины. Ряды второго рода представляют собой изменения в величине какого-нибудь явления через равные промежутки времени.

Математическое ожидание ε для рядов первого рода определяется Шустером как

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\pi}{n}} \quad (21)$$

где n – число появлений событий за весь промежуток времени.

Для рядов второго рода ε определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sqrt{\pi \sum_{i=0}^{n-1} \Delta x^2} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{N}}, \quad (22)$$

где σ – стандартное отклонение или средняя квадратическая ошибка исследуемого ряда;

N – общее число данных в исследуемом ряду

Амплитуда A_T в k раз превышает ε , в обоих случаях оказалось равной

$$e^{-\frac{\pi}{4}k^2} \quad (23)$$

Таким образом, вычислив величину ε и определив отношение $k = \frac{A_T}{\varepsilon}$ по таблице, можно получить какова вероятность того, что данная периодичность в исследуемом ряду является случайной.

Таблица 1 – Достоверности результатов по методу Шустера [6]

| k | $e^{-\frac{\pi}{4}k^2}$ | k | $e^{-\frac{\pi}{4}k^2}$ | k | $e^{-\frac{\pi}{4}k^2}$ |
|-----|-------------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|
| 0,1 | 0,9922 | 0,8 | 0,6049 | 2,0 | 0,04321 |
| 0,2 | 0,9691 | 0,9 | 0,5293 | 2,5 | 0,00738 |
| 0,3 | 0,9318 | 1,0 | 0,4559 | 3,0 | 0,00085 |
| 0,4 | 0,8819 | 1,2 | 0,3227 | 3,5 | $6,63 \times 10^{-5}$ |
| 0,5 | 0,8217 | 1,4 | 0,2145 | 4,0 | $3,49 \times 10^{-6}$ |
| 0,6 | 0,7537 | 1,6 | 0,1339 | 4,5 | $1,24 \times 10^{-7}$ |
| 0,7 | 0,6806 | 1,8 | 0,0785 | 5,0 | $2,97 \times 10^{-9}$ |

Такой способ нахождения ε пригоден лишь в случаях, когда величины данного ряда вполне независимы друг от друга. Так как последнее условие часто не выполняется, то Шустер предлагает находить эту величину опытным путем, беря в первом приближении среднее из них к теоретической величине ε .

Необходимо узнать, что спектральные методы анализа дают исчерпывающую информацию о структуре исследуемого ряда в том случае, если этот ряд является нормальным, стационарным и среднее его значение равно нулю.

Последнее условие легко удовлетворяется, если заменить исходный ряд другим, члены которого определяются соотношением:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}. \quad (24)$$

Стационарным называется такой ряд, среднее значение которого постоянно, то есть не меняется при изменении длины ряда.

Если же в исследуемом ряду имеется какой-либо тренд, то он уже не будет стационарным и возникает необходимость исключения тренда из первичного ряда.

Наконец, чтобы ряд был нормальным, необходимо, чтобы значения его членов были распределены по нормальному закону. Однако, даже в случае, если распределение членов ряда не является нормальным, вычисленная спектральная функция позволяет получить представление о его частной структуре.

Следовательно, в качестве первого этапа расчетов необходимо вычислить среднее значение данного ряда и вычесть его из каждого члена ряда. Эта операция достигается сразу же при вычислении статистических характеристик исследуемых рядов.

Далее должно следовать сглаживание, или фильтрация, исходных рядов. Эта операция дает возможность значительно уменьшить роль случайных ошибок, стационаривать ряд, исключить колебания, изучение которых в настоящее время не представляет интереса. Кроме того, при исследовании особенно коротких рядов наблюдений часто очень важно искусственно сузить полосу частот исследуемого ряда, чтобы уменьшить при анализе влияние друг на друга вариаций с близкими частотами. Такие задачи в значительной мере решаются с помощью фильтрации исходных рядов.

Вопросы, которые связаны с теорией и применением фильтрации к анализу натуральных рядов наблюдений, получили в настоящее время широкое освещение в литературе. В наиболее полной форме применительно к задачам гидрометеорологии.

В общем случае основной целью фильтрации является выделение из исследуемого ряда гармоник с частотами $f_l \leq f \leq f_n$ и подавление всех прочих составляющих.

Осуществляется фильтрация с помощью преобразование вида

$$\tilde{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t + \tau)d\tau, \quad (25)$$

где $h(\tau)$ представляет собой весовую функцию фильтрации

Любая фильтрация предусматривает изменение амплитуд гармоник процесса $x(t)$. Функция, которая определяет характер изменения амплитуд при прохождении ряда через фильтр, называется частотной характеристикой фильтра. При условии, что начальные фазы гармоник после фильтрации должны остаться неизменными, частотная характеристика $R(f)$ имеет вид

$$R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau. \quad (26)$$

Весовая же функция $h(\tau)$ такого фильтра связана с частотной характеристикой обратным преобразованием Фурье

$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} R(f) \cos 2\pi f\tau df. \quad (27)$$

Задача фильтрации решается наилучшим образом, если $f_l \leq f \leq f_h$ на выходе фильтра сохраняются неизменными, а амплитуды всех остальных гармоник обратятся в ноль. Частотная характеристика такого идеального фильтра имеет вид

$$R(f) = \begin{cases} 1 & \text{при } f_l \leq f \leq f_h, \\ 0 & \text{при } f < f_l, f > f_h. \end{cases} \quad (28)$$

Однако реализация такого идеального фильтра требует задания весовой функции, а следовательно, и самого процесса на бесконечном интервале. Поскольку интервал задания исходной функции $x(t)$ всегда конечен, то и интервал задания весовой функции $h(\tau)$ также должен быть конечен. Тогда уравнение принимает вид

$$R(f) = \int_{-L/2}^{L/2} h(\tau) 2\pi f \tau d\tau, \quad (29)$$

где L – интервал задания весовой функции,

$$h(\tau) = \begin{cases} h(\tau) \text{ при } |\tau| \leq \frac{L}{2}, \\ 0 \text{ при } |\tau| > \frac{L}{2}. \end{cases} \quad (30)$$

В этом случае амплитуды гармоник, которые лежат в диапазоне $f_l \leq f \leq f_h$, умножаются на величины, отличные от единицы, а амплитуды гармоник с частотами вне этого диапазона – на величины, отличные от нуля.

Поскольку реализация идеального фильтра в виде на ограниченном интервале невозможна, задачей фильтрации является нахождение такой частотной характеристики и соответствующей весовой функции, которая обеспечивала бы выделение гармоник в заданном диапазоне оптимальным образом. Решение этой задачи возможно лишь при условии, что спектр данного процесса известен или если есть физические основания предполагать наличие определенных гармоник в исследуемом интервале частот. Последнее обстоятельство может в значительной степени способствовать правильному выбору как вида фильтра, то есть его весовой функции, так и интервалов его задания.

Переходя к сумме по конечному интервалу $(2k + 1)$, выражение запишем в виде

$$\tilde{x} = \sum_{j=-k}^k h_j x_{i+j}. \quad (31)$$

По данной программе рассчитываются статистические характеристики, выполняется фильтрация ряда, выполняется расчет автокорреляционной

функции при сдвиге m и вычисляются $m + 1$ оценок спектральной плотности. На последнем этапе определяются амплитуды и фазы для заданного интервала периодов по методу Шустера.

3 Формирование базы данных для исследования

3.1 Инструментарий

Измерения производились с помощью гидрометрической вертушки ГР-99. Кафедрой гидрометрии была предоставлена вертушка без контактного устройства. Для фиксации отчетов использовалась аудиоколонка, самостоятельно переделанная для подключения к корпусу вертушки. Сигнал с аудиоколонки (каждые пол-оборота винта) фиксировался при помощи диктофона в формате *amr*. Прибор измерения показан на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Самодельное контактное устройство

Гидрометрическая вертушка ГР-99 осуществляет измерение скорости течения потока воды. Работа гидрометрических вертушек основана на

наличии зависимости между скоростью вращения лопастного винта вертушки и скоростью набегающего водного потока.

Основные части гидрометрической вертушки ГР-99 (см. рисунок 3.2):

- корпус;
- ходовая часть с лопастным винтом;
- хвостовое оперение;
- контактное устройство (система магнит – геркон). (см. рисунок 3.3)



Рисунок 3.2 – Гидрометрическая вертушка ГР-99



Рисунок 3.3 – Оригинальное контактное устройство

При проведении измерений корпус вертушки был закреплен на деревянной штанге (см. рисунок 3.4).

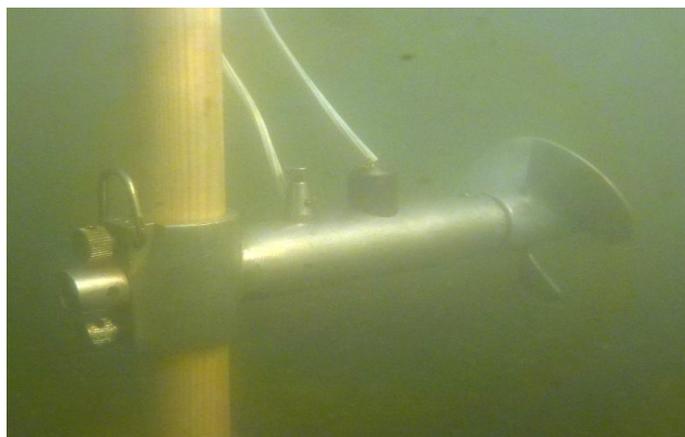


Рисунок 3.4 – Вертушка, закрепленная на деревянной штанге

3.2 Ряды скоростей течения рек Ленинградской области

В качестве исходных данных использовались результаты непрерывных измерений скоростей течения на реке Стрелка.

Водосбор р. Стрелки находится на территории Ломоносовского района и Гатчинского района Ленинградской области и Петродворцового района г. Санкт-Петербурга. Рассматриваемая территория расположена на северо-западе Европейской части России Площадь водосбора реки составляет 155 км².

Река Стрелка берет свое начало на Ижорской возвышенности у деревни Терволово Гатчинского района в 43 километрах юго-западнее Санкт-Петербурга.

Длина реки более 34 километров, средний уклон – 2,9%. Русло очень извилистое. Преобладающая ширина русла от 1 до 8 м. Глубина не превышает 1,5 метра.

Бассейн реки имеет продолговатую форму. Поверхность бассейна слабохолмистая.

Гидрографическая сеть бассейна представлена в основном мелиоративными канавами и небольшими ручьями, общее число которых 155 общей протяженностью 190 км.

Река Стрелка относится к равнинным рекам со смешанным питанием с преобладанием снегового.

Для измерений было выбрано три участка: прямой участок реки (см. рисунок 3.5, 3.6), участок с поворотом (см. рисунок 3.7), и участок, где происходит сужение русла (с подпором) (см. рисунок 3.8). На каждом участке измерения производились в течение двух часов.



Рисунок 3.5 – Спутниковый снимок участка реки, на котором проводились измерения



Рисунок 3.6 – Прямой участок реки



Рисунок 3.7 – Участок реки с поворотом



Рисунок 3.8 – Участок реки, на котором происходит сужение русла

4 Обработка рядов скоростей течения рек

Обработка полученных записей вызвала некоторые сложности, связанные с тем, что существует не так много программ способных преобразовывать звукоряд в числовой. Кроме того, в аудиозаписи присутствовали помехи, которые необходимо было устранить.

Для обработки данных было рассмотрено множество графических и аудио программ и приложений, среди которых:

«Аудиомастер» – многофункциональный аудиоредактор для работы с звуковыми файлами.

«*Graph*» – программа с открытым кодом, предназначенная для построения математических графиков.

«*Audacity*» – свободный многоплатформенный аудиоредактор звуковых файлов

«*BPM Analyzer*» – приложение, позволяющее узнать число ударов в минуту любой звуковой дорожки.

«*Wav2txt*» – это программа *Windows*, которая преобразует аудиофайл формата WAV в текстовый файл с разделителями табуляции, подходящий для загрузки в электронную таблицу или другую программу анализа.

«*Adobe Audition*» – аудиоредактор, разработанный фирмой *Adobe*. Позволяет работать с одиночными аудио файлами, а также может выступать в качестве многодорожечного редактора. Программа поддерживает различные форматы, в том числе формат *amr*.

«*Wavview*» – приложение для преобразования WAV файла в форматы *txt*, *xls*. Поддерживаются форматы 8-bit/16-bit *PCM*, с любым количеством каналов.

В итоге, для решения данной задачи, подошли редакторы «*Adobe Audition*» и «*Wavview*».

Обработка происходила поэтапно. В первую очередь аудиозапись конвертировалась из формата *amr* в *wav*. Затем, при помощи функций *Adaptive Noise Reduction*, *Noise Reduction (process)* в *Adobe audition* устранялись фоновые и широкополосные шумы, что позволило четко выделить сигналы гидровертушки, как показано на рисунке 4.1.

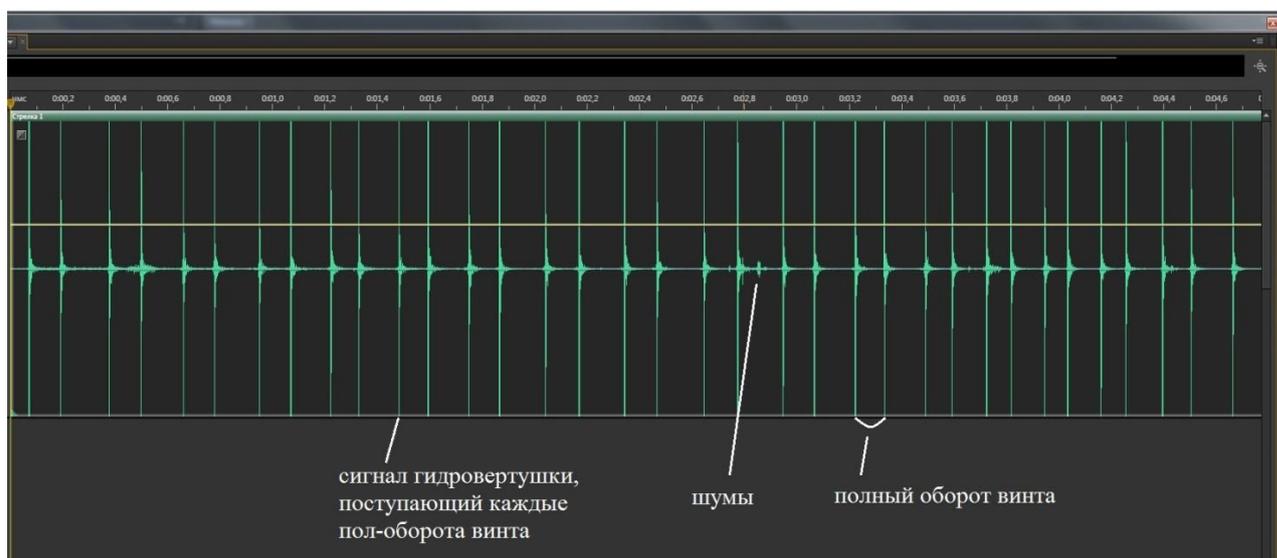


Рисунок 4.1 – Пятисекундный фрагмент записи

После первичной обработки запись фрагментировалась и при помощи приложения *Wavview* преобразована в формат *xls*. На рисунке видно, что присутствует сигналы гидровертушки, поступающие каждые пол-оборота шумы и полный оборот винта вертушки.

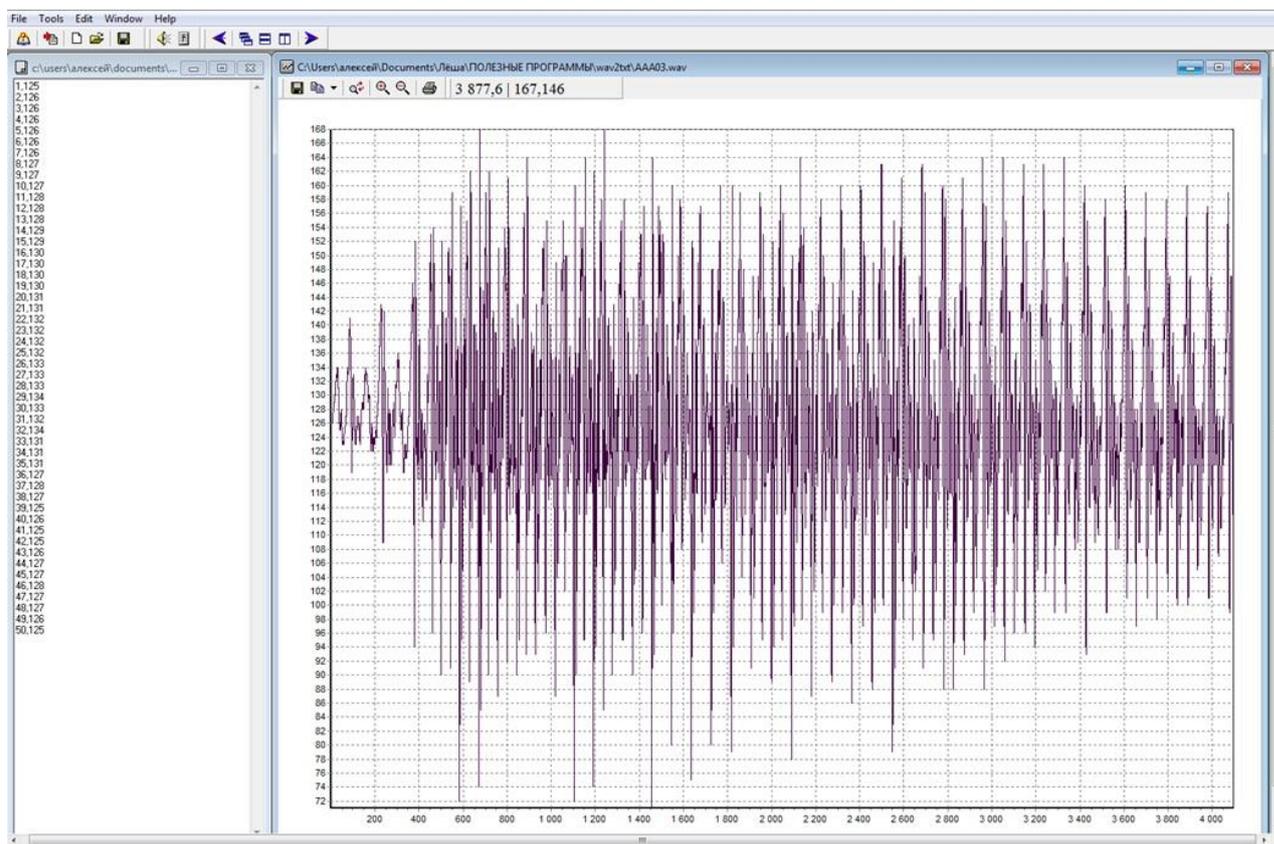


Рисунок 4.2 – Пример преобразования из формата *wav* в *xls* в приложении *Wavview*

Из-за высокой детализации записи в формате *wav* и принципа работы программы *Wavview*, полученные ряды включали в себя много дублированных значений. Поэтому после преобразования, в *Excel* был произведен поиск и фильтрация повторяющихся значений. В результате удалось получить необходимые отчеты. Длина одного двухчасового ряда включает в себя приблизительно тридцать тысяч значений. В таблице 1 представлен фрагмент двухчасового ряда.

Таблица 1 – Фрагмент двухчасового ряда

| № | Секунды | Целые секунды | Количество оборотов |
|---|----------|---------------|---------------------|
| 1 | 0,095 | 0 | 1 |
| 2 | 0,280667 | 0 | 2 |
| 3 | 0,450833 | 0 | 3 |
| 4 | 0,765833 | 0 | 4 |

| № | Секунды | Целые секунды | Количество оборотов |
|----|----------|---------------|---------------------|
| 5 | 1,035667 | 1 | 5 |
| 6 | 1,230833 | 1 | 6 |
| 7 | 1,390333 | 1 | 7 |
| 8 | 1,589333 | 1 | 8 |
| 9 | 1,75 | 1 | 9 |
| 10 | 1,961167 | 1 | 10 |
| 11 | 2,15 | 2 | 11 |
| 12 | 2,430833 | 2 | 12 |
| 13 | 2,5855 | 2 | 13 |
| 14 | 2,77 | 2 | 14 |
| 15 | 2,975167 | 2 | 15 |
| 16 | 3,175667 | 3 | 16 |
| 17 | 3,355 | 3 | 17 |
| 18 | 3,617333 | 3 | 18 |
| 19 | 3,807333 | 3 | 19 |
| 20 | 3,976167 | 3 | 20 |
| 21 | 4,1525 | 4 | 21 |
| 22 | 4,420833 | 4 | 22 |
| 23 | 4,585833 | 4 | 23 |
| 24 | 4,755833 | 4 | 24 |
| 25 | 4,987667 | 4 | 25 |
| 26 | 5,15 | 5 | 26 |
| 27 | 5,395167 | 5 | 27 |
| 28 | 5,571 | 5 | 28 |
| 29 | 5,755333 | 5 | 29 |
| 30 | 5,975333 | 5 | 30 |

Затем полученные ряды были осреднены по тридцать, шестьдесят и сто секунд (см. Приложение А) для дальнейшей обработки по методу периодограмм-анализа А. Шустера.

4.1 Построение периодограмм рядов скоростей

Для построения периодограмм использовались осредненные ряды. Диагностировались ряды количества оборотов.

Чтобы найти параметры периодичности T в исследуемом ряду, весь ряд данных делят на отрезки величиной с предполагаемый период T (остаток отбрасывается).

По вычисленным амплитудам и фазам для различных пробных периодов строится график, где по оси абсцисс откладываются периоды, а по оси ординат – амплитуды соответствующих периодов.

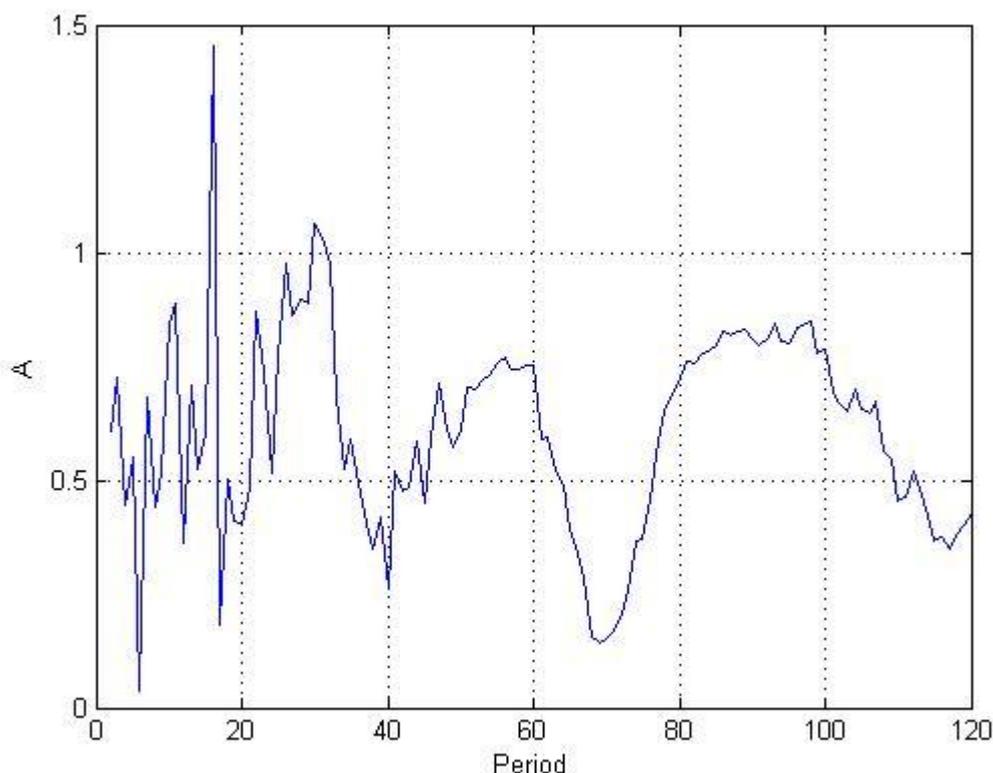
Максимумы на периодограмме указывают на возможные периоды, характеризующие закономерности данного ряда.

Бывают ложные максимумы, это когда присутствует тенденция, ложные максимумы мы отбрасываем и не обращаем на них внимание.

Осредненные ряды за 30 секунд.

На рисунке 4.3 показана периодограмма для осредненного ряда по 30 сек и график вероятностей для первого участка (Стрелка 1).

a)



б)

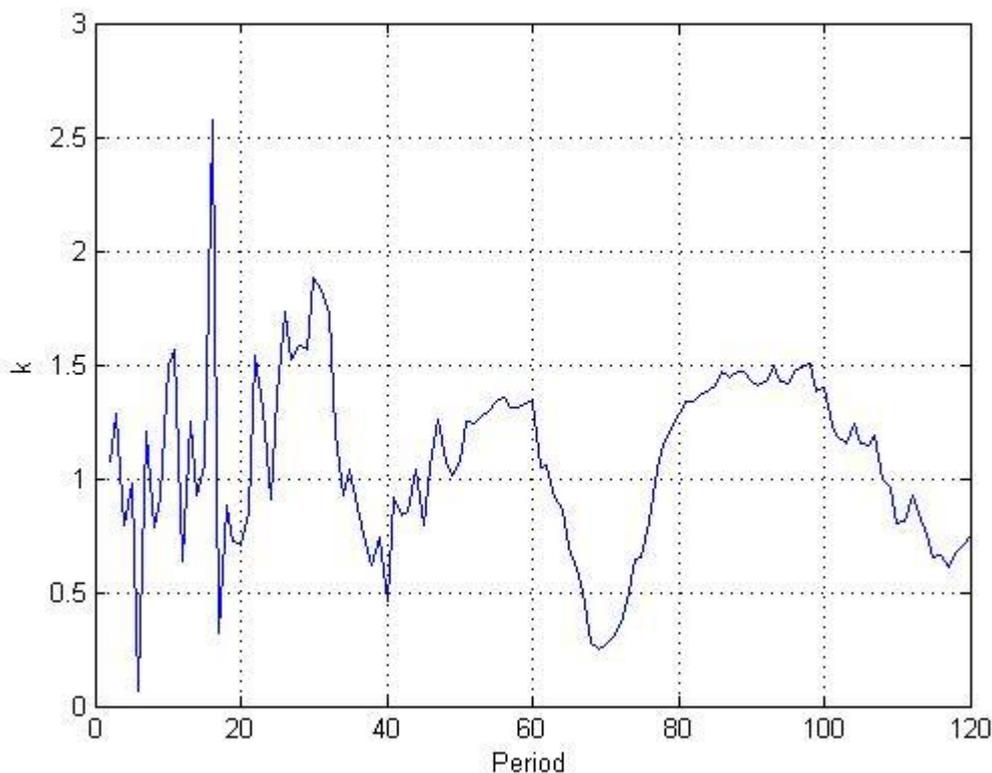


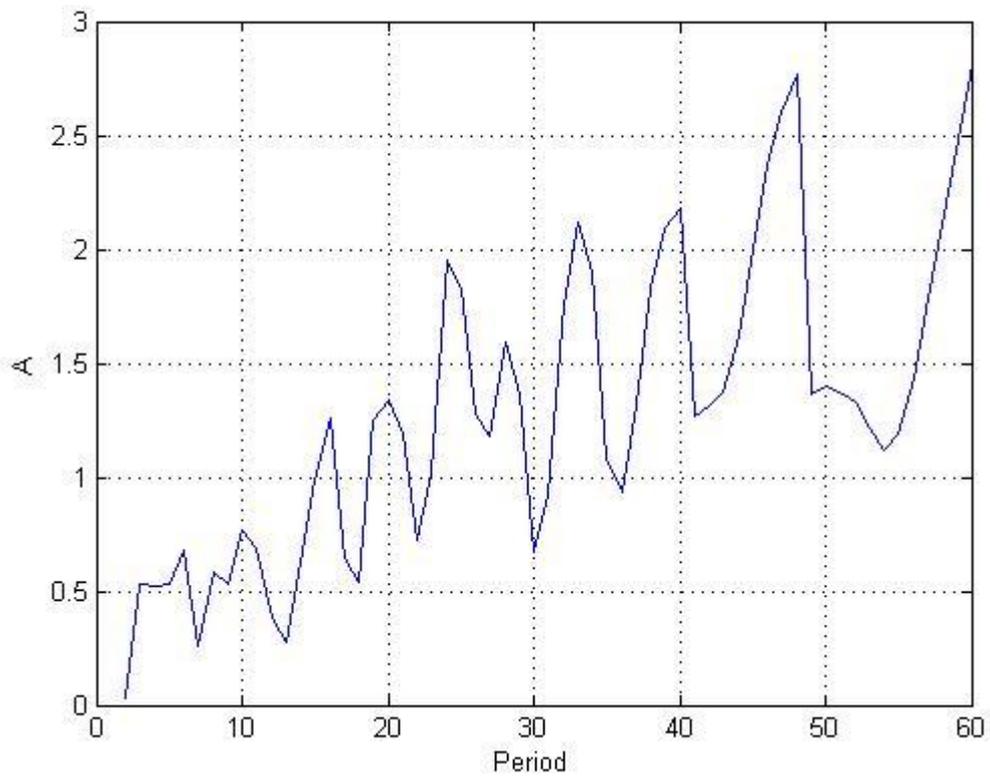
Рисунок 4.3 – Периодограмма для осредненного ряда по 30 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 1

На рисунке 4.3 видно, что максимальная амплитуда равна 1,45, а вероятность равна 2,57. Выбранная амплитуда соответствует 8 минутам. Вероятность достоверности этой амплитуды равна 99 %.

На рисунке 4.4 показана периодограмма для Стрелки на участке с сужением. Видно, что максимальная амплитуда равна 1,45, что соответствует вероятности 1,27 (72 %).

На рисунке 4.4 четко прослеживается тенденция увеличения амплитуд. Такая картина изменения амплитуд говорит о ненадежных натуральных данных. Результаты не вызывают доверия. В ходе измерения на этом участке был замечена подводная помеха в виде камня, которая искажала измерения.

a)



б)

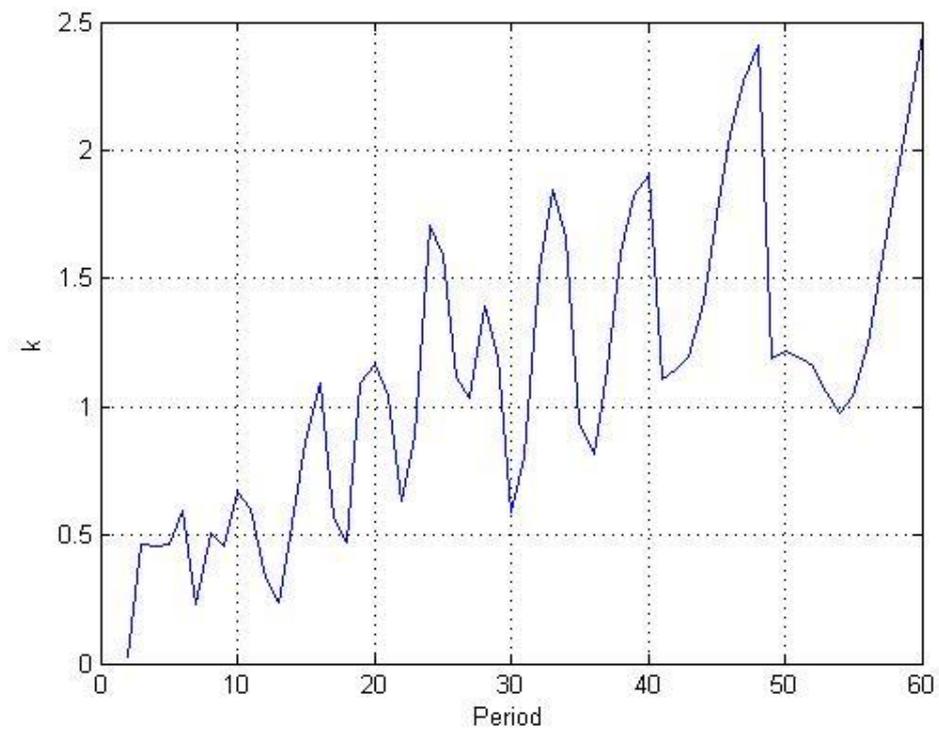
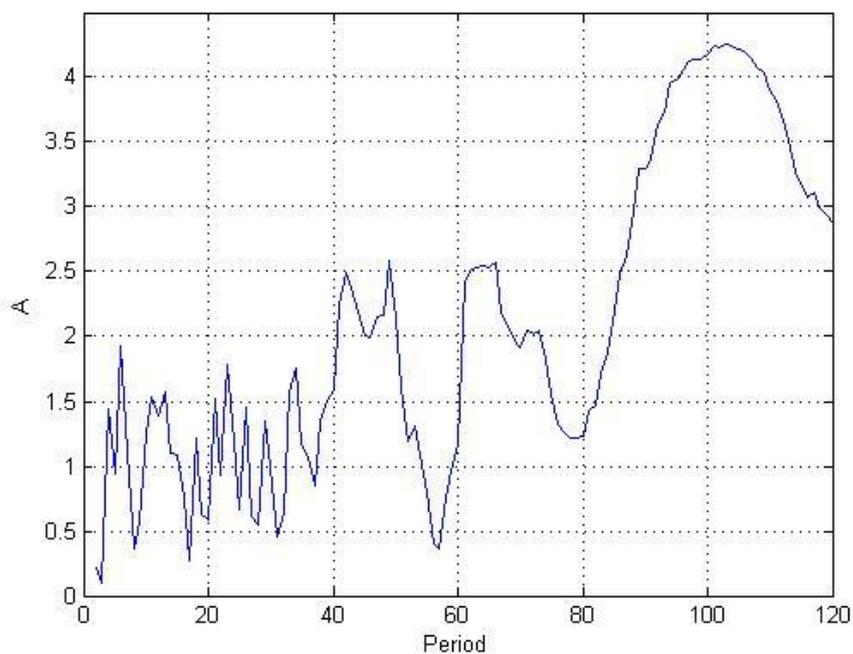


Рисунок 4.4 – Периодограмма для осредненного ряда по 30 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 2

На рисунке 4.5 показана периодограмма для Стрелки на участке с поворотом.

а)



б)

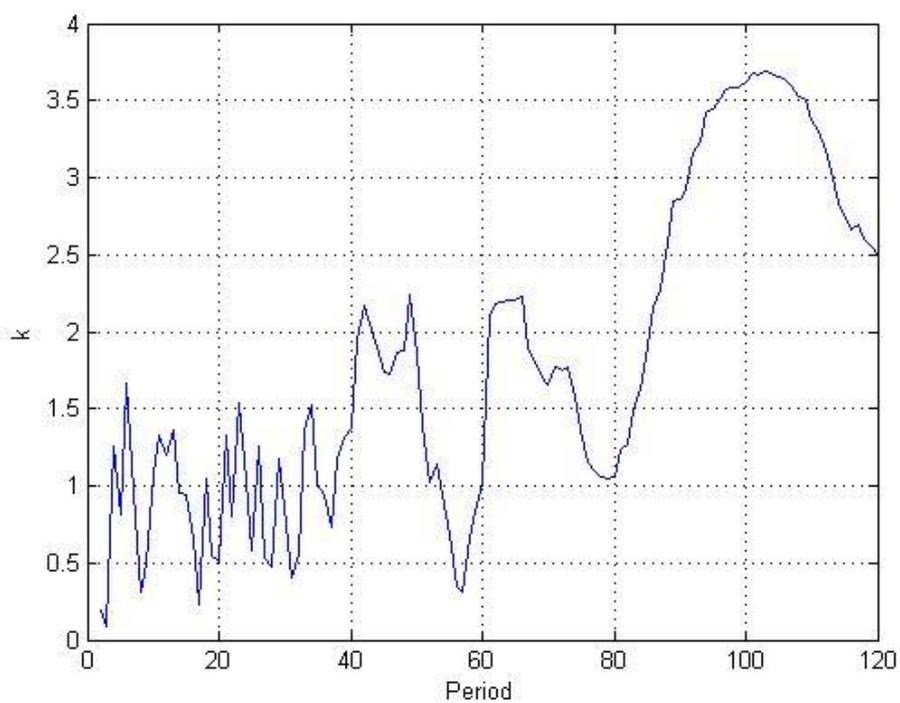


Рисунок 4.5 – Периодограмма для осредненного ряда по 30 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 3

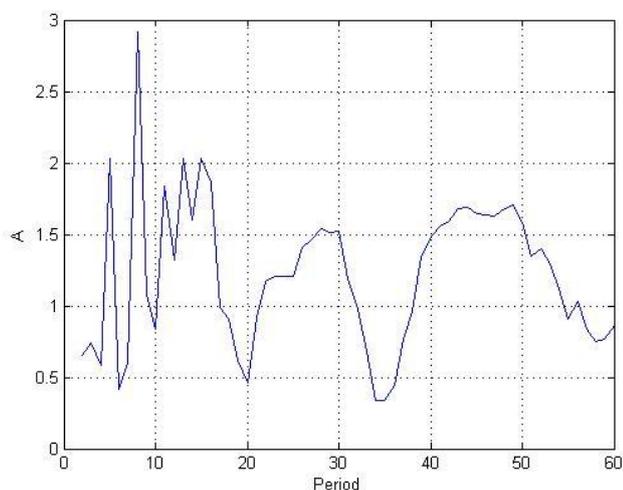
На рисунке 4.5 нами выделена амплитуда равна 1,78 и 1,93, но был взят больший период, так как он содержит в себе меньший период. Выбранные амплитуды соответствуют 12 минутам и 3 минутам.

На этих графиках хорошо видны ложные амплитуды, которые образуются последовательными увеличениями значений.

Осредненные ряды за 60 секунд.

На рисунке 4.6 видно, что максимальная амплитуда равна 2,91, но можно обратить внимание и на 2,03. Вероятность максимальной амплитуды составляет 99 %. Период получился равным 8 минутам.

а)



б)

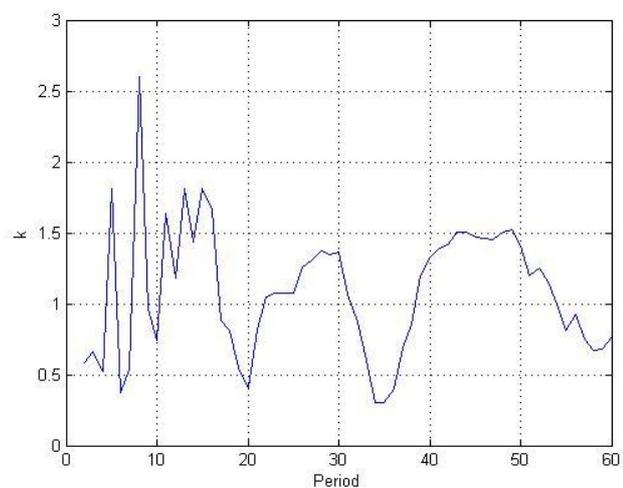
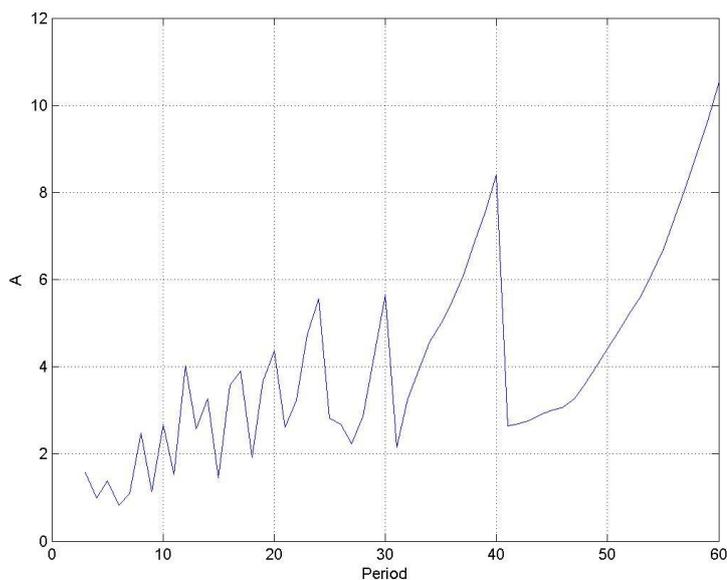


Рисунок 4.6 – Периодограмма для осредненного ряда по 60 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 1

На рисунке 4.7 показана периодограмма для Стрелки на участке с сужением. Видно, что максимальная амплитуда равна 4,02, что соответствует вероятности 1,26 (72 %). Но опять же, как на рисунке 4.4, присутствует тренд в изменении амплитуд. В данных есть систематическая ошибка, входящая в величины скоростей потоков, вероятно, с разными знаками.

а)



б)

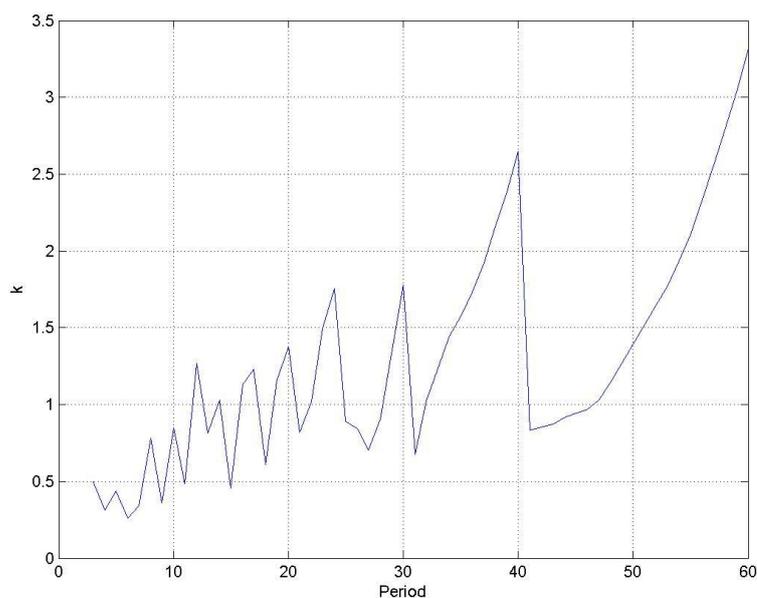


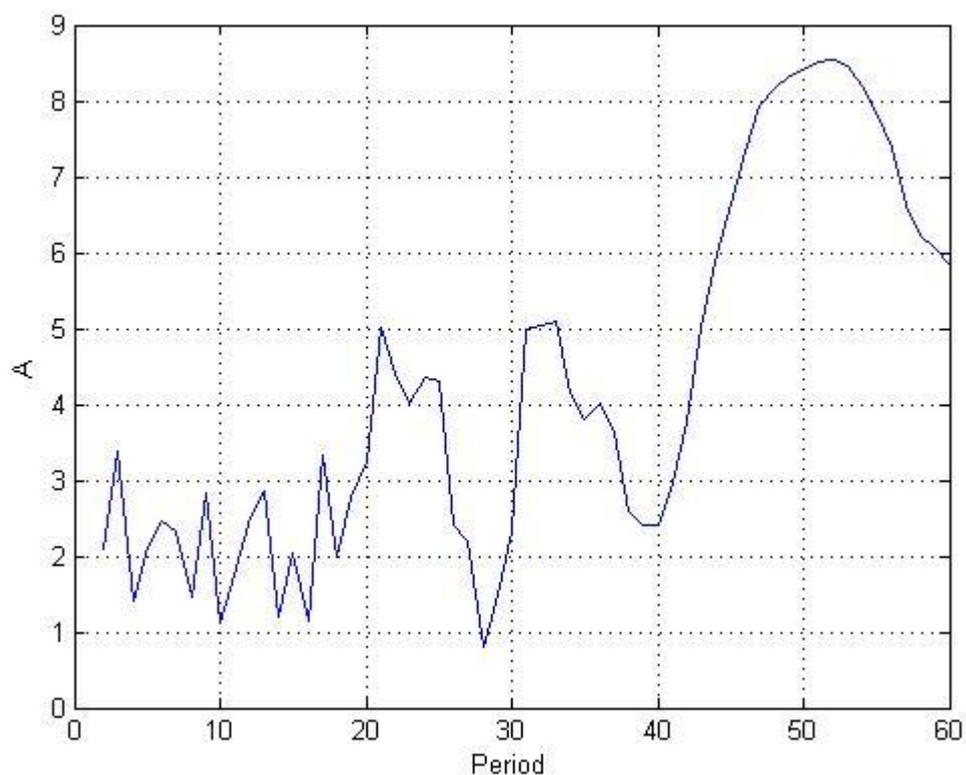
Рисунок 4.7 – Периодограмма для осредненного ряда по 60 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 2

На рисунке 4.8 показана периодограмма для Стрелки на участке с поворотом.

На рисунке можно выделить несколько амплитуд: 3, 40, 2,50, 2,82, 3,37. Выбираем ту амплитуду, которая содержит в себе все остальные – это 3,37, что соответствует 17 минутам. Вероятность равна 1,22.

При сравнении с рисунком 4.5 и 4.11 наблюдается аналогия графиков. Это говорит о надежности обрабатываемой информации.

a)



б)

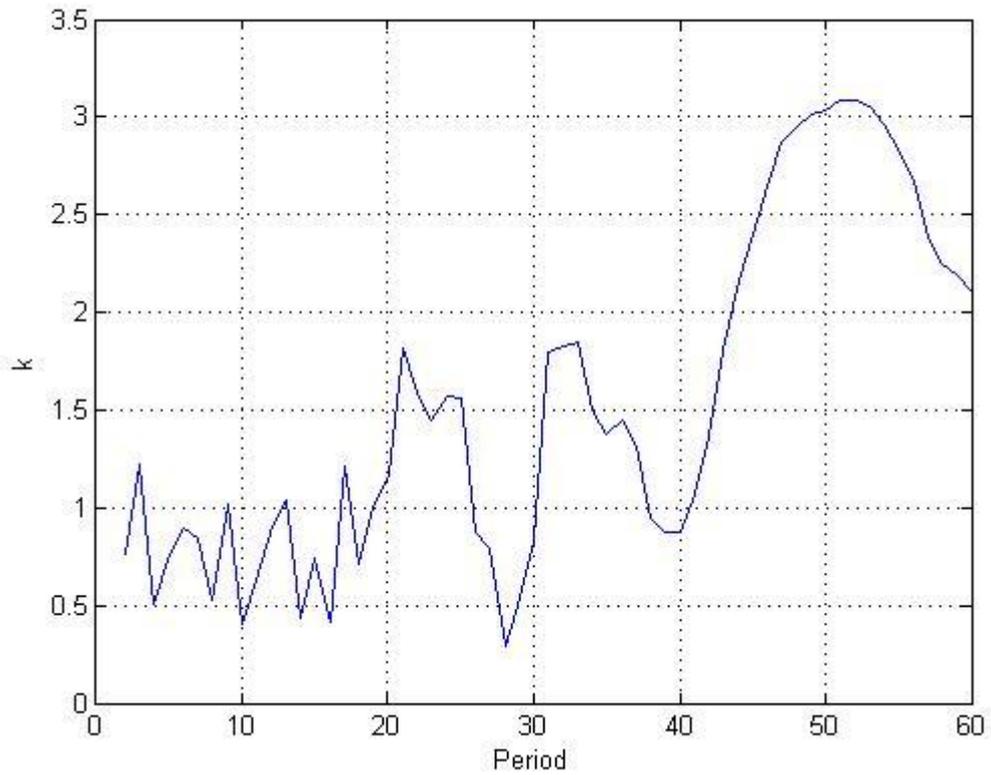
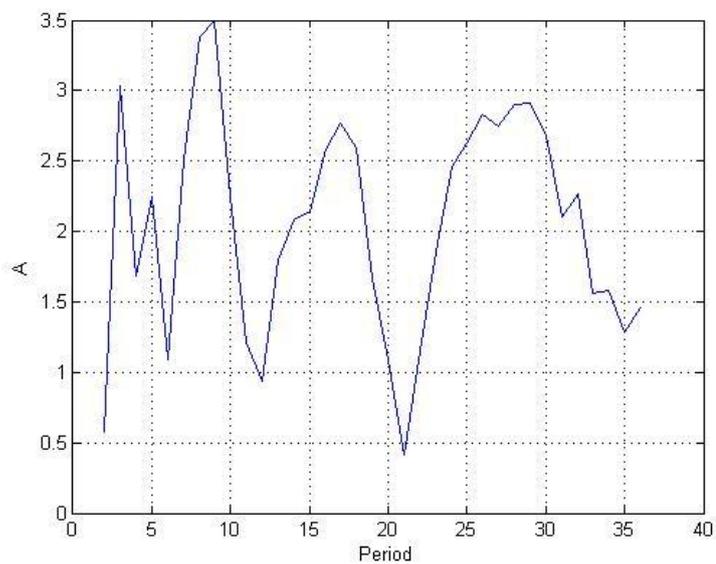


Рисунок 4.8 – Периодограмма для осредненного ряда по 60 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 3

Осредненные ряды за 100 секунд.

а)



б)

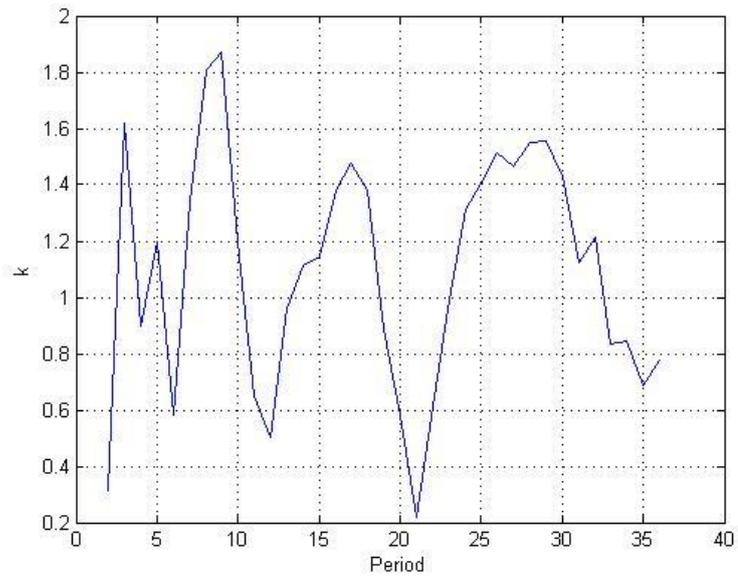
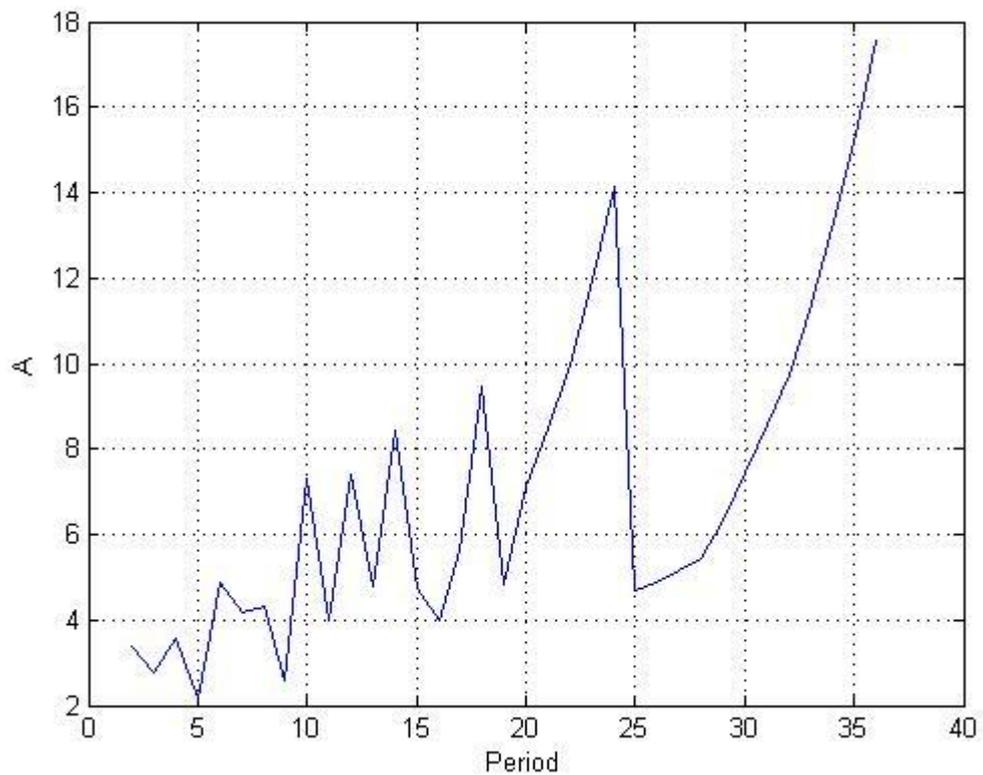


Рисунок 4.9 – Периодограмма для осредненного ряда по 100 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 1

На рисунке 4.9 четко видна амплитуда равная 3,48 с вероятностью 1,86.

а)



б)

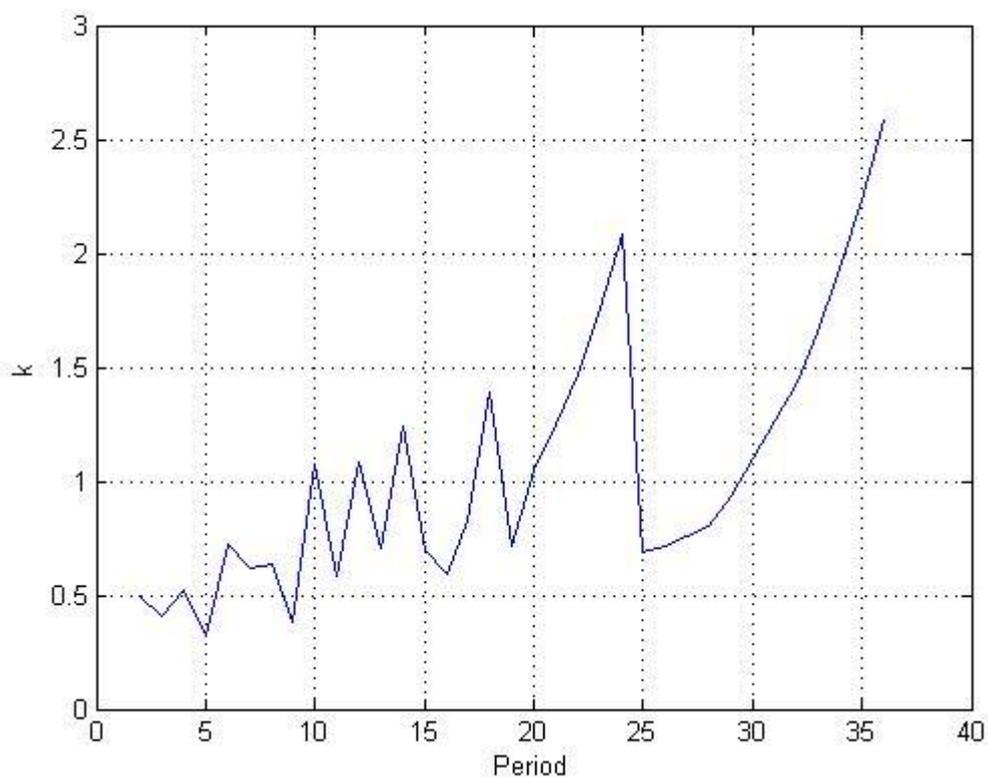


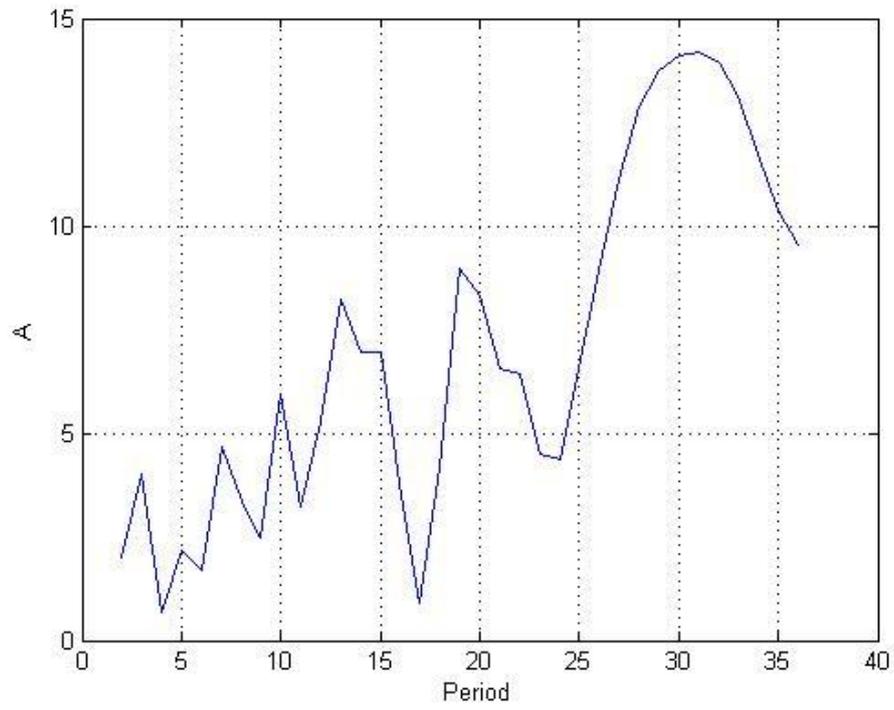
Рисунок 4.10 – Периодограмма для осредненного ряда по 100 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 2

На рисунке 4.10 выделена амплитуда равная 7,47 и 8,20, что соответствует периодам 16 и 23 минутам. Но второй период близок к ложному. Вероятность первой амплитуды равна 1,05.

На рисунке 4.11 показана периодограмма для Стрелки на участке с поворотом.

На рисунке видно максимальную амплитуду 5,92 с вероятностью 1,13. Это соответствует периоду 17 минут. Остальные амплитуды можно отнести к ложным.

a)



б)

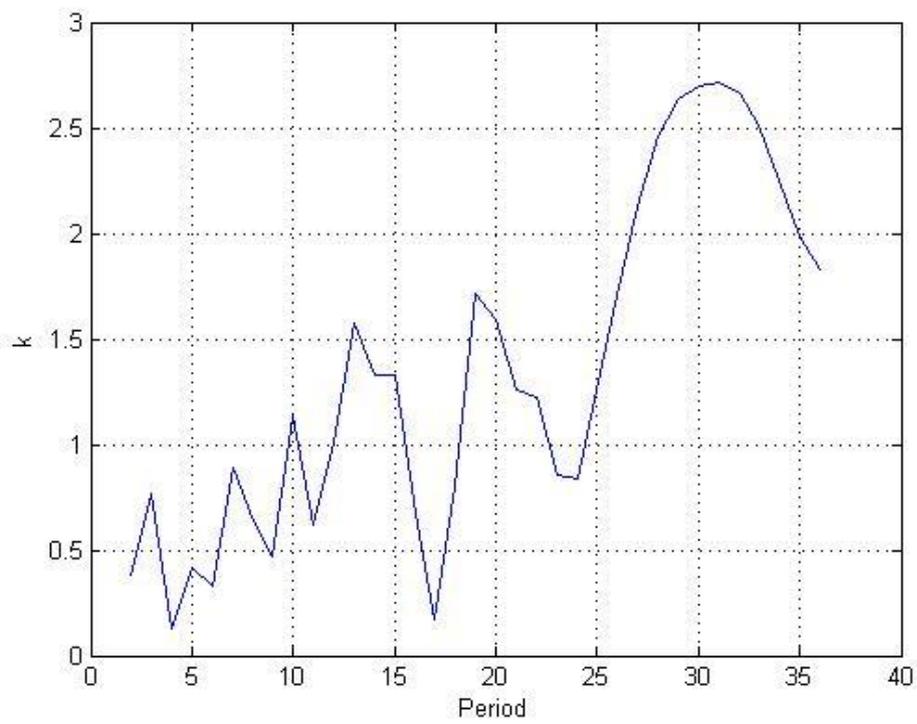


Рисунок 4.11 – Периодограмма для осредненного ряда по 100 сек (а) и график вероятностей k (б), Стрелка 3

В таблицах 2 и 3 представлены обобщенные результаты.

Таблица 2 – Результаты обработки рядов по методу Шустера

| | Стрелка 1 | | | Стрелка 2 | | | Стрелка 3 | | |
|---------------------|-----------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| | 30 | 60 | 100 | 30 | 60 | 100 | 30 | 60 | 100 |
| <i>A</i> | 1,45 | 2,91 | 3,48 | 1,45 | 4,02 | 7,47 | 1,78 | 3,37 | 5,92 |
| <i>k</i> | 2,57 | 2,60 | 1,86 | 1,27 | 1,26 | 1,05 | 1,54 | 1,22 | 1,13 |
| Достоверность, % | 99 | 99 | 93 | 72 | 72 | 55 | 82 | 70 | 62 |
| Период | 16 | 8 | 9 | 16 | 12 | 10 | 23 | 17 | 10 |
| Минуты | 8 | 8 | 15 | 8 | 12 | 17 | 12 | 17 | 17 |

Из таблицы 2 видно, что с увеличением периода осреднения незначительно увеличивается период, но уменьшается достоверность амплитуды. В таблице 3 показаны выбранные периоды для каждого участка.

Были выбраны большие периоды, так как при истинности меньших периодов они будут включены в большие. Наоборот такая форма не действует.

Таблица 3 – Осреднение результатов по участкам

| Период Участок | 30 | 60 | 100 | Период |
|-------------------|----|----|-----|--------|
| 1 | 8 | 8 | 15 | 15 |
| 2 | 8 | 12 | 17 | 17 |
| 3 | 12 | 17 | 17 | 17 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследования были получены следующие результаты:

а) проведены измерения пульсации скоростей потока при различных соотношениях уклона поверхности и уклона дна;

б) проведена обработка полученных рядов скоростей речных потоков;

в) рассчитан период низкочастотных колебаний скоростей потока по методу Шустера.

Получено, что реки Стрелка низкочастотный период пульсации скоростного потока равен 17 минутам. Период не зависит от соотношения уклонов дна и водной поверхности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Коваленко, В.В. Новые явления и закономерности формирования стока. [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб: изд. РГГМУ, 2013. – 172 с.
- 2 Коваленко, В.В. Частично инфинитный механизм турбулизации природных и социальных процессов [Текст] / В. В. Коваленко. – СПб: изд. РГГМУ, 2006. – 166 с.
- 3 Коваленко, В. В. Моделирование гидрологических процессов [Текст] / В.В. Коваленко, Н. В. Викторова, Е. В. Гайдукова. – СПб: изд. РГГМУ, 2006. – 560 с.
- 4 СП 33-101-2003 Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200035578> – М.: Техэксперт, 2015. (Дата обращения: 18.05.2017).
- 5 Коваленко, В.В. Частично инфинитная гидрология [Текст] / В.В. Коваленко – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 230с.
- 6 Саруханян, Э.И. Многолетние колебания стока Волги. [Текст] / Э. И. Саруханян, Н. П. Смирнов.– Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 166с.
7. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде *MATLAB*. [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: изд. Техносфера, 2006. – 616 с.
- 8 Иглин, С.П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе *MATLAB*. [Текст] / С.П. Иглин.– Харьков.: изд. НТУ «ХПИ», 2006. – 612 с.
- 9 Поршнева С.В. *MATLAB 11*. Основы работы и программирования. учебник. изд. "Бином. Лаборатория знаний" 2006г. – 320 с.
- 10 Коваленко, В.В. Измерение и расчет характеристик неустановившихся речных потоков. [Текст] / В.В. Коваленко. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 160 с.

Приложение А – Скорости потока р. Стрелка

Таблица А.1 – Осредненные по тридцать секунд ряды скоростей речных потоков, полученные на прямом участке реки

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|----|---------|---------------------|------------------|
| 1 | 30 | 95 | 0,364 |
| 2 | 60 | 88 | 0,337 |
| 3 | 90 | 88 | 0,337 |
| 4 | 120 | 83 | 0,318 |
| 5 | 150 | 92 | 0,353 |
| 6 | 180 | 81 | 0,311 |
| 7 | 210 | 96 | 0,368 |
| 8 | 240 | 87 | 0,334 |
| 9 | 270 | 90 | 0,345 |
| 10 | 300 | 87 | 0,334 |
| 11 | 330 | 85 | 0,326 |
| 12 | 360 | 93 | 0,357 |
| 13 | 390 | 88 | 0,337 |
| 14 | 420 | 90 | 0,345 |
| 15 | 450 | 91 | 0,349 |
| 16 | 480 | 88 | 0,337 |
| 17 | 510 | 94 | 0,360 |
| 18 | 540 | 87 | 0,334 |
| 19 | 570 | 86 | 0,330 |
| 20 | 600 | 90 | 0,345 |
| 21 | 630 | 88 | 0,337 |
| 22 | 660 | 89 | 0,341 |
| 23 | 690 | 80 | 0,307 |
| 24 | 720 | 85 | 0,326 |
| 25 | 750 | 79 | 0,303 |
| 26 | 780 | 89 | 0,341 |
| 27 | 810 | 93 | 0,357 |
| 28 | 840 | 88 | 0,337 |
| 29 | 870 | 90 | 0,345 |
| 30 | 900 | 93 | 0,357 |
| 31 | 930 | 97 | 0,372 |
| 32 | 960 | 85 | 0,326 |
| 33 | 990 | 101 | 0,387 |
| 34 | 1020 | 91 | 0,349 |
| 35 | 1050 | 88 | 0,337 |
| 36 | 1080 | 82 | 0,314 |

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|----|---------|---------------------|------------------|
| 37 | 1110 | 81 | 0,311 |
| 38 | 1140 | 90 | 0,345 |
| 39 | 1170 | 82 | 0,314 |
| 40 | 1200 | 93 | 0,357 |
| 41 | 1230 | 88 | 0,337 |
| 42 | 1260 | 88 | 0,337 |
| 43 | 1290 | 80 | 0,307 |
| 44 | 1320 | 77 | 0,295 |
| 45 | 1350 | 77 | 0,295 |
| 46 | 1380 | 84 | 0,322 |
| 47 | 1410 | 82 | 0,314 |
| 48 | 1440 | 84 | 0,322 |
| 49 | 1470 | 82 | 0,314 |
| 50 | 1500 | 88 | 0,337 |
| 51 | 1530 | 85 | 0,326 |
| 52 | 1560 | 88 | 0,337 |
| 53 | 1590 | 83 | 0,318 |
| 54 | 1620 | 91 | 0,349 |
| 55 | 1650 | 85 | 0,326 |
| 56 | 1680 | 85 | 0,326 |
| 57 | 1710 | 83 | 0,318 |
| 58 | 1740 | 82 | 0,314 |
| 59 | 1770 | 91 | 0,349 |
| 60 | 1800 | 89 | 0,341 |
| 61 | 1830 | 97 | 0,372 |
| 62 | 1860 | 101 | 0,387 |
| 63 | 1890 | 89 | 0,341 |
| 64 | 1920 | 81 | 0,311 |
| 65 | 1950 | 85 | 0,326 |
| 66 | 1980 | 99 | 0,380 |
| 67 | 2010 | 80 | 0,307 |
| 68 | 2040 | 81 | 0,311 |
| 69 | 2070 | 88 | 0,337 |
| 70 | 2100 | 84 | 0,322 |
| 71 | 2130 | 92 | 0,353 |
| 72 | 2160 | 75 | 0,288 |
| 73 | 2190 | 84 | 0,322 |
| 74 | 2220 | 84 | 0,322 |
| 75 | 2250 | 85 | 0,326 |
| 76 | 2280 | 84 | 0,322 |
| 77 | 2310 | 86 | 0,330 |
| 78 | 2340 | 85 | 0,326 |

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|-----|---------|---------------------|------------------|
| 79 | 2370 | 88 | 0,337 |
| 80 | 2400 | 89 | 0,341 |
| 81 | 2430 | 89 | 0,341 |
| 82 | 2460 | 80 | 0,307 |
| 83 | 2490 | 85 | 0,326 |
| 84 | 2520 | 93 | 0,357 |
| 85 | 2550 | 81 | 0,311 |
| 86 | 2580 | 92 | 0,353 |
| 87 | 2610 | 77 | 0,295 |
| 88 | 2640 | 78 | 0,299 |
| 89 | 2670 | 80 | 0,307 |
| 90 | 2700 | 92 | 0,353 |
| 91 | 2730 | 88 | 0,337 |
| 92 | 2760 | 86 | 0,330 |
| 93 | 2790 | 85 | 0,326 |
| 94 | 2820 | 90 | 0,345 |
| 95 | 2850 | 90 | 0,345 |
| 96 | 2880 | 83 | 0,318 |
| 97 | 2910 | 94 | 0,360 |
| 98 | 2940 | 85 | 0,326 |
| 99 | 2970 | 83 | 0,318 |
| 100 | 3000 | 82 | 0,314 |
| 101 | 3030 | 89 | 0,341 |
| 102 | 3060 | 86 | 0,330 |
| 103 | 3090 | 83 | 0,318 |
| 104 | 3120 | 80 | 0,307 |
| 105 | 3150 | 85 | 0,326 |
| 106 | 3180 | 87 | 0,334 |
| 107 | 3210 | 84 | 0,322 |
| 108 | 3240 | 95 | 0,364 |
| 109 | 3270 | 86 | 0,330 |
| 110 | 3300 | 80 | 0,307 |
| 111 | 3330 | 85 | 0,326 |
| 112 | 3360 | 89 | 0,341 |
| 113 | 3390 | 86 | 0,330 |
| 114 | 3420 | 87 | 0,334 |
| 115 | 3450 | 85 | 0,326 |
| 116 | 3480 | 87 | 0,334 |
| 117 | 3510 | 81 | 0,311 |
| 118 | 3540 | 90 | 0,345 |
| 119 | 3570 | 92 | 0,353 |
| 120 | 3600 | 86 | 0,330 |

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|-----|---------|---------------------|------------------|
| 121 | 3630 | 87 | 0,334 |
| 122 | 3660 | 77 | 0,295 |
| 123 | 3690 | 90 | 0,345 |
| 124 | 3720 | 87 | 0,334 |
| 125 | 3750 | 86 | 0,330 |
| 126 | 3780 | 93 | 0,357 |
| 127 | 3810 | 90 | 0,345 |
| 128 | 3840 | 79 | 0,303 |
| 129 | 3870 | 96 | 0,368 |
| 130 | 3900 | 79 | 0,303 |
| 131 | 3930 | 86 | 0,330 |
| 132 | 3960 | 86 | 0,330 |
| 133 | 3990 | 87 | 0,334 |
| 134 | 4020 | 88 | 0,337 |
| 135 | 4050 | 84 | 0,322 |
| 136 | 4080 | 87 | 0,334 |
| 137 | 4110 | 76 | 0,291 |
| 138 | 4140 | 83 | 0,318 |
| 139 | 4170 | 84 | 0,322 |
| 140 | 4200 | 88 | 0,337 |
| 141 | 4230 | 99 | 0,380 |
| 142 | 4260 | 86 | 0,330 |
| 143 | 4290 | 84 | 0,322 |
| 144 | 4320 | 91 | 0,349 |
| 145 | 4350 | 80 | 0,307 |
| 146 | 4380 | 76 | 0,291 |
| 147 | 4410 | 88 | 0,337 |
| 148 | 4440 | 81 | 0,311 |
| 149 | 4470 | 86 | 0,330 |
| 150 | 4500 | 86 | 0,330 |
| 151 | 4530 | 87 | 0,334 |
| 152 | 4560 | 79 | 0,303 |
| 153 | 4590 | 92 | 0,353 |
| 154 | 4620 | 87 | 0,334 |
| 155 | 4650 | 90 | 0,345 |
| 156 | 4680 | 86 | 0,330 |
| 157 | 4710 | 84 | 0,322 |
| 158 | 4740 | 79 | 0,303 |
| 159 | 4770 | 93 | 0,357 |
| 160 | 4800 | 85 | 0,326 |
| 161 | 4830 | 87 | 0,334 |
| 162 | 4860 | 90 | 0,345 |

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|-----|---------|---------------------|------------------|
| 163 | 4890 | 81 | 0,311 |
| 164 | 4920 | 85 | 0,326 |
| 165 | 4950 | 84 | 0,322 |
| 166 | 4980 | 88 | 0,337 |
| 167 | 5010 | 82 | 0,314 |
| 168 | 5040 | 85 | 0,326 |
| 169 | 5070 | 86 | 0,330 |
| 170 | 5100 | 85 | 0,326 |
| 171 | 5130 | 93 | 0,357 |
| 172 | 5160 | 89 | 0,341 |
| 173 | 5190 | 87 | 0,334 |
| 174 | 5220 | 81 | 0,311 |
| 175 | 5250 | 91 | 0,349 |
| 176 | 5280 | 85 | 0,326 |
| 177 | 5310 | 90 | 0,345 |
| 178 | 5340 | 84 | 0,322 |
| 179 | 5370 | 86 | 0,330 |
| 180 | 5400 | 82 | 0,314 |
| 181 | 5430 | 84 | 0,322 |
| 182 | 5460 | 86 | 0,330 |
| 183 | 5490 | 87 | 0,334 |
| 184 | 5520 | 88 | 0,337 |
| 185 | 5550 | 90 | 0,345 |
| 186 | 5580 | 91 | 0,349 |
| 187 | 5610 | 85 | 0,326 |
| 188 | 5640 | 83 | 0,318 |
| 189 | 5670 | 90 | 0,345 |
| 190 | 5700 | 84 | 0,322 |
| 191 | 5730 | 88 | 0,337 |
| 192 | 5760 | 92 | 0,353 |
| 193 | 5790 | 94 | 0,360 |
| 194 | 5820 | 83 | 0,318 |
| 195 | 5850 | 81 | 0,311 |
| 196 | 5880 | 96 | 0,368 |
| 197 | 5910 | 87 | 0,334 |
| 198 | 5940 | 80 | 0,307 |
| 199 | 5970 | 84 | 0,322 |
| 200 | 6000 | 93 | 0,357 |
| 201 | 6030 | 85 | 0,326 |
| 202 | 6060 | 79 | 0,303 |
| 203 | 6090 | 91 | 0,349 |
| 204 | 6120 | 81 | 0,311 |

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|-----|---------|---------------------|------------------|
| 205 | 6150 | 88 | 0,337 |
| 206 | 6180 | 85 | 0,326 |
| 207 | 6210 | 88 | 0,337 |
| 208 | 6240 | 94 | 0,360 |
| 209 | 6270 | 81 | 0,311 |
| 210 | 6300 | 89 | 0,341 |
| 211 | 6330 | 88 | 0,337 |
| 212 | 6360 | 87 | 0,334 |
| 213 | 6390 | 89 | 0,341 |
| 214 | 6420 | 90 | 0,345 |
| 215 | 6450 | 77 | 0,295 |
| 216 | 6480 | 85 | 0,326 |
| 217 | 6510 | 87 | 0,334 |
| 218 | 6540 | 86 | 0,330 |
| 219 | 6570 | 86 | 0,330 |
| 220 | 6600 | 77 | 0,295 |
| 221 | 6630 | 86 | 0,330 |
| 222 | 6660 | 89 | 0,341 |
| 223 | 6690 | 89 | 0,341 |
| 224 | 6720 | 94 | 0,360 |
| 225 | 6750 | 89 | 0,341 |
| 226 | 6780 | 80 | 0,307 |
| 227 | 6810 | 81 | 0,311 |
| 228 | 6840 | 85 | 0,326 |
| 229 | 6870 | 91 | 0,349 |
| 230 | 6900 | 73 | 0,280 |
| 231 | 6930 | 78 | 0,299 |
| 232 | 6960 | 94 | 0,360 |
| 233 | 6990 | 86 | 0,330 |
| 234 | 7020 | 76 | 0,291 |
| 235 | 7050 | 81 | 0,311 |
| 236 | 7080 | 95 | 0,364 |
| 237 | 7110 | 87 | 0,334 |
| 238 | 7140 | 86 | 0,330 |
| 239 | 7170 | 88 | 0,337 |
| 240 | 7200 | 87 | 0,334 |

Таблица А.2 – Осредненные по шестьдесят секунд ряды скоростей речных потоков, полученные на прямом участке реки

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|----|---------|---------------------|------------------|
| 1 | 60 | 183 | 0,351 |
| 2 | 120 | 171 | 0,328 |
| 3 | 180 | 173 | 0,332 |
| 4 | 240 | 183 | 0,351 |
| 5 | 300 | 177 | 0,339 |
| 6 | 360 | 178 | 0,341 |
| 7 | 420 | 178 | 0,341 |
| 8 | 480 | 179 | 0,343 |
| 9 | 540 | 181 | 0,347 |
| 10 | 600 | 176 | 0,337 |
| 11 | 660 | 177 | 0,339 |
| 12 | 720 | 165 | 0,316 |
| 13 | 780 | 168 | 0,322 |
| 14 | 840 | 181 | 0,347 |
| 15 | 900 | 183 | 0,351 |
| 16 | 960 | 182 | 0,349 |
| 17 | 1020 | 192 | 0,368 |
| 18 | 1080 | 170 | 0,326 |
| 19 | 1140 | 171 | 0,328 |
| 20 | 1200 | 175 | 0,335 |
| 21 | 1260 | 176 | 0,337 |
| 22 | 1320 | 157 | 0,301 |
| 23 | 1380 | 161 | 0,309 |
| 24 | 1440 | 166 | 0,318 |
| 25 | 1500 | 170 | 0,326 |
| 26 | 1560 | 173 | 0,332 |
| 27 | 1620 | 174 | 0,334 |
| 28 | 1680 | 170 | 0,326 |
| 29 | 1740 | 165 | 0,316 |
| 30 | 1800 | 180 | 0,345 |
| 31 | 1860 | 198 | 0,380 |
| 32 | 1920 | 170 | 0,326 |
| 33 | 1980 | 184 | 0,353 |
| 34 | 2040 | 161 | 0,309 |
| 35 | 2100 | 172 | 0,330 |
| 36 | 2160 | 167 | 0,320 |
| 37 | 2220 | 168 | 0,322 |
| 38 | 2280 | 169 | 0,324 |
| 39 | 2340 | 171 | 0,328 |

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|----|---------|---------------------|------------------|
| 40 | 2400 | 177 | 0,339 |
| 41 | 2460 | 169 | 0,324 |
| 42 | 2520 | 178 | 0,341 |
| 43 | 2580 | 173 | 0,332 |
| 44 | 2640 | 155 | 0,297 |
| 45 | 2700 | 172 | 0,330 |
| 46 | 2760 | 174 | 0,334 |
| 47 | 2820 | 175 | 0,335 |
| 48 | 2880 | 173 | 0,332 |
| 49 | 2940 | 179 | 0,343 |
| 50 | 3000 | 165 | 0,316 |
| 51 | 3060 | 175 | 0,335 |
| 52 | 3120 | 163 | 0,312 |
| 53 | 3180 | 172 | 0,330 |
| 54 | 3240 | 179 | 0,343 |
| 55 | 3300 | 166 | 0,318 |
| 56 | 3360 | 174 | 0,334 |
| 57 | 3420 | 173 | 0,332 |
| 58 | 3480 | 172 | 0,330 |
| 59 | 3540 | 171 | 0,328 |
| 60 | 3600 | 178 | 0,341 |
| 61 | 3660 | 164 | 0,314 |
| 62 | 3720 | 177 | 0,339 |
| 63 | 3780 | 179 | 0,343 |
| 64 | 3840 | 169 | 0,324 |
| 65 | 3900 | 175 | 0,335 |
| 66 | 3960 | 172 | 0,330 |
| 67 | 4020 | 175 | 0,335 |
| 68 | 4080 | 171 | 0,328 |
| 69 | 4140 | 159 | 0,305 |
| 70 | 4200 | 172 | 0,330 |
| 71 | 4260 | 185 | 0,355 |
| 72 | 4320 | 175 | 0,335 |
| 73 | 4380 | 156 | 0,299 |
| 74 | 4440 | 169 | 0,324 |
| 75 | 4500 | 172 | 0,330 |
| 76 | 4560 | 166 | 0,318 |
| 77 | 4620 | 179 | 0,343 |
| 78 | 4680 | 176 | 0,337 |
| 79 | 4740 | 163 | 0,312 |
| 80 | 4800 | 178 | 0,341 |
| 81 | 4860 | 177 | 0,339 |

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|-----|---------|---------------------|------------------|
| 82 | 4920 | 166 | 0,318 |
| 83 | 4980 | 172 | 0,330 |
| 84 | 5040 | 167 | 0,320 |
| 85 | 5100 | 171 | 0,328 |
| 86 | 5160 | 182 | 0,349 |
| 87 | 5220 | 168 | 0,322 |
| 88 | 5280 | 176 | 0,337 |
| 89 | 5340 | 174 | 0,334 |
| 90 | 5400 | 168 | 0,322 |
| 91 | 5460 | 170 | 0,326 |
| 92 | 5520 | 175 | 0,335 |
| 93 | 5580 | 181 | 0,347 |
| 94 | 5640 | 168 | 0,322 |
| 95 | 5700 | 174 | 0,334 |
| 96 | 5760 | 180 | 0,345 |
| 97 | 5820 | 177 | 0,339 |
| 98 | 5880 | 177 | 0,339 |
| 99 | 5940 | 167 | 0,320 |
| 100 | 6000 | 177 | 0,339 |
| 101 | 6060 | 164 | 0,314 |
| 102 | 6120 | 172 | 0,330 |
| 103 | 6180 | 173 | 0,332 |
| 104 | 6240 | 182 | 0,349 |
| 105 | 6300 | 170 | 0,326 |
| 106 | 6360 | 175 | 0,335 |
| 107 | 6420 | 179 | 0,343 |
| 108 | 6480 | 162 | 0,311 |
| 109 | 6540 | 173 | 0,332 |
| 110 | 6600 | 163 | 0,312 |
| 111 | 6660 | 175 | 0,335 |
| 112 | 6720 | 183 | 0,351 |
| 113 | 6780 | 169 | 0,324 |
| 114 | 6840 | 166 | 0,318 |
| 115 | 6900 | 164 | 0,314 |
| 116 | 6960 | 172 | 0,330 |
| 117 | 7020 | 162 | 0,311 |
| 118 | 7080 | 176 | 0,337 |
| 119 | 7140 | 173 | 0,332 |
| 120 | 7200 | 175 | 0,335 |

Таблица А.3 – Осредненные по сто секунд ряды скоростей речных потоков, полученные на прямом участке реки

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|----|---------|---------------------|------------------|
| 1 | 100 | 301 | 0,346177 |
| 2 | 200 | 292 | 0,335827 |
| 3 | 300 | 294 | 0,338127 |
| 4 | 400 | 296 | 0,340427 |
| 5 | 500 | 304 | 0,349627 |
| 6 | 600 | 292 | 0,335827 |
| 7 | 700 | 284 | 0,326627 |
| 8 | 800 | 290 | 0,333527 |
| 9 | 900 | 300 | 0,345027 |
| 10 | 1000 | 317 | 0,364577 |
| 11 | 1100 | 280 | 0,322027 |
| 12 | 1200 | 293 | 0,336977 |
| 13 | 1300 | 282 | 0,324327 |
| 14 | 1400 | 269 | 0,309377 |
| 15 | 1500 | 279 | 0,320877 |
| 16 | 1600 | 281 | 0,323177 |
| 17 | 1700 | 293 | 0,336977 |
| 18 | 1800 | 288 | 0,331227 |
| 19 | 1900 | 316 | 0,363427 |
| 20 | 2000 | 293 | 0,336977 |
| 21 | 2100 | 276 | 0,317427 |
| 22 | 2200 | 277 | 0,318577 |
| 23 | 2300 | 284 | 0,326627 |
| 24 | 2400 | 291 | 0,334677 |
| 25 | 2500 | 285 | 0,327777 |
| 26 | 2600 | 286 | 0,328927 |
| 27 | 2700 | 276 | 0,317427 |
| 28 | 2800 | 289 | 0,332377 |
| 29 | 2900 | 295 | 0,339277 |
| 30 | 3000 | 282 | 0,324327 |
| 31 | 3100 | 284 | 0,326627 |
| 32 | 3200 | 284 | 0,326627 |
| 33 | 3300 | 287 | 0,330077 |
| 34 | 3400 | 288 | 0,331227 |
| 35 | 3500 | 284 | 0,326627 |
| 36 | 3600 | 296 | 0,340427 |
| 37 | 3700 | 284 | 0,326627 |
| 38 | 3800 | 299 | 0,343877 |
| 39 | 3900 | 281 | 0,323177 |

| № | секунды | количество оборотов | скорость течения |
|----|---------|---------------------|------------------|
| 40 | 4000 | 289 | 0,332377 |
| 41 | 4100 | 281 | 0,323177 |
| 42 | 4200 | 279 | 0,320877 |
| 43 | 4300 | 300 | 0,345027 |
| 44 | 4400 | 276 | 0,317427 |
| 45 | 4500 | 281 | 0,323177 |
| 46 | 4600 | 287 | 0,330077 |
| 47 | 4700 | 289 | 0,332377 |
| 48 | 4800 | 286 | 0,328927 |
| 49 | 4900 | 286 | 0,328927 |
| 50 | 5000 | 284 | 0,326627 |
| 51 | 5100 | 283 | 0,325477 |
| 52 | 5200 | 295 | 0,339277 |
| 53 | 5300 | 296 | 0,340427 |
| 54 | 5400 | 277 | 0,318577 |
| 55 | 5500 | 281 | 0,323177 |
| 56 | 5600 | 303 | 0,348477 |
| 57 | 5700 | 284 | 0,326627 |
| 58 | 5800 | 299 | 0,343877 |
| 59 | 5900 | 296 | 0,340427 |
| 60 | 6000 | 283 | 0,325477 |
| 61 | 6100 | 282 | 0,324327 |
| 62 | 6200 | 282 | 0,324327 |
| 63 | 6300 | 297 | 0,341577 |
| 64 | 6400 | 295 | 0,339277 |
| 65 | 6500 | 278 | 0,319727 |
| 66 | 6600 | 279 | 0,320877 |
| 67 | 6700 | 293 | 0,336977 |
| 68 | 6800 | 289 | 0,332377 |
| 69 | 6900 | 275 | 0,316277 |
| 70 | 7000 | 283 | 0,325477 |
| 71 | 7100 | 286 | 0,328927 |
| 72 | 7200 | 289 | 0,332377 |