МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Расчет распределения скоростей течения в естественных руслах**

Исполнитель Сезонов Ярослав Михайлович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.г.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Голосовская Вера Алексеевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

к.г.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич

(фамилия, имя, отчество)

«01» июня 2026 г.

Санкт–Петербург

2026

Оглавление

1 Физико-географическая характеристика реки Согожа.....2
1.1 Общая характеристика реки 2
1.2 Геологическое строение и история формирования территории 3
1.3 Рельеф и геоморфологические особенности.....4
1.4 Климатические условия бассейна 5
1.5 Гидрология и режим реки 5
1.6. Ландшафты, почвы и экосистемы.....7
1.7 Хозяйственное использование и антропогенное воздействие 7
1.8 Крупнейшее антропогенное изменение 8
1.9 Детализация ключевых последствий.....10
2 Расчетная часть 11
2.1 Описание поста 11
2.2 Исходные данные 11
2.3 Профили сечения и их анализ 15
3 Расчет коэффициента Караушева 21
3.1 Формула Шези и коэффициент Караушева 21
3.2 Расчет коэффициента Караушева по всем имеющимся данным и поиск зависимости 23
3.3 Расчет коэффициента Караушева при наличии измеренного уклона и проверка зависимости.....29
3.4 Вывод из анализа применения коэффициента Караушева k.....33
4 Вывод.....34
Список использованной литературы 35
Приложение.....36

Введение

В представленной работе рассматривается характер распределения скоростей течения в естественном русле как процесс, составляющими которого являются множество факторов таких как уклон, шероховатость, водный режим реки в определенное время года, антропогенное воздействие и то, как совокупность этих факторов влияет на скорости течения. Предметом исследования является река Согожа в Ярославской области и полученные на гидрологическом посту данные на посту д. Родионка за 1959 год. Так же были проанализированы данные по геоморфологическому, географическому и историкографическому составу местности, по которой протекает река, и на основании найденной информации сформирована физико-географическая характеристика района.

Актуальность работы заключается в исследовании возможности применения на практике эмпирического коэффициента Караушева для расчета скоростей потока по формуле Шези, а также в сопоставлении полученных по итогу его использования данных, с фактическими данными. В перспективе, использование такой методологии расчетов способно позволить получать максимально приближенные к истинным значения расходов воды при отсутствии измеренных показателей за искомый период.

1 Физико-географическая характеристика реки Согожа

1.1 Общая характеристика реки

Река Согожа протекает в северо-западной части Ярославской области и южной части Вологодской области. Её общая длина составляет 129 км, а площадь водосборного бассейна 814 км².[1]

Согожа берет начало в Вологодской области и течет в общем юго-восточном, а затем юго-западном направлении, впадая в Рыбинское водохранилище на Волге в пределах Ярославской области. До создания водохранилища она являлась притоком реки Шексны.

Крупнейший населенный пункт на реке – это город Пошехонье. Он расположен в месте впадения в Согожу левого притока - реки Соги.

Водосборная система реки Согожа принимает множество притоков. Крупнейшими из них являются левые - Сегжа, Ухтома, Сога, и правый - Репа. Бассейн реки густо разветвлен, что подтверждается обширным списком водотоков, впадающих в основное русло и его притоки.



Рисунок 1. Река Согожа у деревни Родионка

1.2 Геологическое строение и история формирования территории

Бассейн реки Согожа расположен в центральной части Восточно-Европейской (Русской) платформы - древнего и устойчивого участка земной коры. Территория относится к восточной части Московской синеклизы - обширного пологого прогиба фундамента платформы. Фундамент сложен кристаллическими породами. Он сформировался около 1,5 млрд лет назад и скрыт под мощным осадочным чехлом.[3]

Осадочный чехол сложен морскими и континентальными отложениями палеозойской, мезозойской и кайнозойской эр. Эти породы сглаживают неровности фундамента, однако тектонические структуры последнего иногда встречаются на поверхности, предопределяя расположение крупных форм рельефа.

Современный рельеф и почвенно-грунтовый покров территории бассейна Согожи сформировались под определяющим влиянием покровных оледенений. Исследования геологических обнажений по берегам Согожи и её притоков (Патры, Бабки) позволяют выявить следы как минимум трёх оледенений: Днепровского, Московского и Окского.

- Днепровское оледенение представлено серовато-коричневыми моренными глинами.
- Московское оледенение красно-коричневыми отложениями.
- Отложения Окского оледенения обнаружены в виде мощных залежей серого песка.

Моренные отложения (валуны, галька, суглинки) сплошной толщей покрывают территорию Пошехонского района, что объясняет обилие камней на полях и в руслах рек. Водно-ледниковые процессы оставили после себя залежи песка и песчано-гравийного материала, которые имеют хозяйственное значение (например, карьер Георгиевское).

Таким образом, геологическое строение бассейна Согожи характеризуется спокойной тектоникой платформы и преобладанием рыхлых четвертичных, преимущественно ледниковых, отложений, которые и формируют ландшафты и почвы региона.

1.3 Рельеф и геоморфологические особенности

Территория бассейна реки Согожа представляет собой холмистую равнину с общим уклоном 1,2‰ в направлении русла реки. Она находится в пределах Молого-Шекснинской низины, одной из крупнейших низменностей региона.[3]

Абсолютные высоты изменяются в пределах от 90 до 160 м над уровнем моря. Относительные превышения между отдельными точками составляют 10-15 м, а перепад высот между междуречьями и дном речных долин достигает 20-25 м.

Долина Согожи глубокая, что отражено в её древнем названии «Согорза» и понятии «Согорье», означающем местность между высоких берегов. Крутизна склонов берегов составляет 30–40°, а в устьях притоков берега часто обрываются под углом 60–70°. На отдельных участках самой Согожи крутизна обрывов превышает 80°.

Основным рельефообразующим агентом был покровный ледник. Он сформировал моренные холмы и гряды, сложенные принесенным материалом. После его отступления, на месте приледниковых водоёмов (в том числе Молого-Шекснинского озера) начала формироваться современная речная сеть. Реки, прорезая перемычки между бывшими озёрными котловинами, соединились в единые системы. Этот процесс обусловил общую равнинность и незначительное падение русел рек региона.

1.4 Климатические условия бассейна

Климат бассейна реки Согожи - умеренно-континентальный, с четко выраженной сезонностью. Он характеризуется умеренно холодной зимой и умеренно теплым летом. Климатические параметры напрямую определяют гидрологический режим реки [3]. Температурный режим реки в летнее время может достигать +20°С, зимой подо льдом она держится около 1°С.

Сочетание холодной зимы с устойчивым снежным покровом и теплого лета с дождями является ключевым фактором, определяющим питание реки, сроки ледостава и половодья.

Регион получает достаточное количество осадков в течение года. Их максимум приходится на летне-осенний период, что накладывается на весеннее снеготаяние. Количество осадков немногим превышает 600 мм, что превышает испоряемость, а значит этот регион является зоной устойчивого увлажнения.

1.5 Гидрология и режим реки

Согожа - классическая равнинная река со спокойным течением и выраженным сезонным режимом [1],[5].

Течение плавное, тихое, усиливается на перекатах. Скорость колеблется от 0,2 м/с в межень до 1,5 м/с в период паводка.

Падение русла незначительно и составляет от 7 до 12 см на километр, что характерно для рек равнинного типа. Общее падение от истока (около 200 м) до устья (около 100 м) составляет примерно 100 м на 129 км.

В верхнем течении, после впадения притока Сегжи, ширина реки составляет около 30 метров. В нижнем течении, подпертая водами Рыбинского водохранилища, она расширяется до 50-200 м.

Дно каменистое, русло сложено наносным слоем крупнозернистого песка, гравия и валунов. Берега часто покрыты осокой. Высота коренных берегов местами достигает 35–40 м.

Весеннее половодье не продолжительное: начинается в апреле и заканчивается в мае. За этот период в реку попадает 60-70% годового стока. Уровень воды в верховьях может подниматься на 8-10 метров, заливая пойму. Длительность половодья - 7-10 дней.

Летне-осенняя межень и паводки: летом устанавливается межень, связанная с усилением испарения. Осенью возможны дождевые паводки, но они случаются редко.

Зимняя межень длится с ноября по март. Это период самого низкого стока (5-10% от годового стока), питание осуществляется преимущественно за счет грунтовых вод.

Ледостав обычно начинается в декабре. Толщина льда к концу зимы достигает 70-80 см. Массовое таяние и ледоход происходят в начале-середине апреля. Таким образом, продолжительность периода с ледовыми явлениями составляет около 4-5 месяцев.

Таблица 1. Характеристики для реки Согожа

Характеристика	Значение
Длина	129 км
Площадь бассейна	814 км^2
Уклон бассейна	1,2 ‰
Залесенность	54%
Заболоченность	1%
Озерность	0%
Скорость течения	0,2-1,5 м/с

1.6. Ландшафты, почвы и экосистемы

Бассейн Согожи расположен в подзоне южной тайги, переходящей к смешанным лесам.[3],[5] Лесистость Ярославской области составляет около 45%.

Террасы и водоразделы покрыты смешанными березово-хвойными лесами с участием ели, сосны, березы и осины. Пойма реки занята кустарниковыми зарослями (ивняк, ольха) и луговой растительностью (злаки, осоки, лютиковые). Весной по берегам обильны первоцветы (калужница, медуница, купальница).

Почвенный покров на территории региона представлен дерново-подзолистыми почвами, которые типичны для хвойных и смешанных лесов в условиях избыточного увлажнения. В поймах формируются более плодородные аллювиальные (пойменные) почвы. На пониженных участках распространены торфяно-болотные почвы.

Фауна представлена типичными для малых рек региона видами. Из беспозвоночных обычны личинки ручейников, поденок, стрекоз, водяные жуки и клопы, двустворчатые моллюски (беззубки). Ихтиофауна включает щуку, окуня, карася. Из млекопитающих встречаются бобр и водяная полевка, из птиц - утки и кулики. Присутствие организмов-индикаторов чистой воды (веснянок, ручейников) свидетельствует об относительно удовлетворительном состоянии водоема на отдельных участках.

1.7 Хозяйственное использование и антропогенное воздействие

Исторически и в настоящее время бассейн Согожи подвергается значительному антропогенному воздействию.

Бассейн Согожи - один из наиболее освоенных в Пошехонском районе. Плотность населения по берегам реки и её притоков является самой высокой

в районе (7-10 чел./км²). Пойменные земли используются для сенокоса и земледелия.

На протяжении последних 30 км Согожа судоходна (подпор от Рыбинского водохранилища). Исторически по реке осуществлялось местное пассажирское сообщение.

В середине XX века по реке и её притокам активно проводился молевой сплав леса, что привело к загрязнению русла и способствовало эрозии берегов.



Рисунок 2. Молевой сплав леса на реках Ярославской области 1952 г.

1.8 Крупнейшее антропогенное изменение

Создание Рыбинского водохранилища, наполнение которого началось в 1941 году, коренным и необратимым образом изменило реку Согожу, особенно её нижнее течение. Это влияние носит комплексный характер, затрагивая гидрологию, экосистему, хозяйственную деятельность и ландшафт. В конце 1950-х годов в Пошехонских реках появилась минога. Это связано со

строительством Волго-Балтийского водного пути и Рыбинского водохранилища: минога переместилась из рек бассейна Северного Ледовитого океана в бассейн Волги.

Была затоплена часть русла реки. До создания водохранилища протяжённость Согожи составляла около 163 км, из которых 34 км скрылись под водой.

Работы ГЭС на водохранилище способствуют зарегулированности на участке Зубарево-Калининский льнозавод. Это обусловлено сильным колебанием уровня воды водохранилища (работой Рыбинской ГЭС: при сбросе воды электростанцией скорость течения усиливается, а при её выключении может полностью прекращаться).



Рисунок 3. Бассейн Рыбинского водохранилища

1.9 Детализация ключевых последствий

Нижнее течение Согожи утратило признаки реки и приобрело черты озёрного залива. Это привело к заилению русла, изменению температурного режима и процесса самоочищения воды.

Научные исследования показывают, что донные отложения в Рыбинском водохранилище, особенно в зоне влияния промышленных стоков, обладают токсичностью для гидробионтов. Эти загрязнения, накопленные за десятилетия, представляют собой «экологическую мину замедленного действия».

К современным экологическим проблемам можно отнести последствия прошлого сплава леса, локальное загрязнение в результате хозяйственной деятельности, а также общие для региона процессы эвтрофикации вод.

Социально-экономическая трансформация заключалась в нанесённом ущербе традиционному укладу (утрата лугов, мельниц). Однако, появилась новая реальность с потенциалом для рекреации и водного туризма, ради которого планируют очищать русло в 2029 г.

Нижнее течение на протяжении десятков километров превратилось в залив (Согожский залив) водохранилища, течение практически исчезло. Повысился базис эрозии, что замедлило русловые процессы. Под воду ушли прибрежные земли.

.

2 Расчетная часть

2.1 Описание поста

Пост д.Родионка находится в 150м от деревни Родионка, (заброшенной в настоящее время) и в 3 километрах от деревни Андрюшино. Открыт пост в 1956г, отметка нуля поста 104,67 мБс, расстояние от устья реки 60 км., а от истока 69 км., таким образом пост находится на середине всей длины русла. Окружающая территория представляет собой лесополосу по левому берегу течения и посевные площади по правому берегу. Наблюдается значительное меандрирование на участке возле поста. На расстоянии одного километра от поста находится место впадения реки Сегжа в реку Согожа.

2.2 Исходные данные

В качестве исходных данных для расчетов использовались записи измерений расходов воды и промерные глубины из книжки КГ-3М по реке Согожа – пост Родионка за 1959 год.

Были оцифрованы и переведены в формат таблиц EXEL показатели измерений: скоростей потока, средних скоростей в сечении, средних глубин на урезе и глубины на промерных вертикалях, расстояние от постоянного начала и показатель уклона, в количестве 39-ти штук. В последствии, именно по этим данным велась работа и вычислялись искомые параметры и характеристики.

Ниже приведены примеры использованных для последующих расчетов таблиц за несколько календарных дней. Для удобства скоростные вертикали были выделены серым цветом.

Таблица 2. Данные по промерам №23, за 27-е апреля 1959г. р.Согожа – п.Родионка

№23	Расстояние, м	h, м	H, Мбс	v, м/с	$\bar{v}$, м/с	hcp, м	I, ‰
1	40,5	0	109,31		1,09	1,92	0,46
2	42	0,33	108,98				
3	43	0,62	108,69	0,54			
4	44	1,26	108,05	0,74			
5	45	1,72	107,59				
6	46	2,23	107,08	0,97			
7	47	2,25	107,06				
8	48	2,36	106,95	1,16			
9	49	2,43	106,88				
10	50	2,43	106,88	1,19			
11	51	2,31	107				
12	52	2,29	107,02	1,27			
13	53	2,29	107,02				
14	54	2,27	107,04	1,34			
15	55	2,28	107,03				
16	56	2,26	107,05	1,35			
17	57	2,24	107,07				
18	58	2,25	107,06	1,34			
19	59	2,23	107,08				
20	60	2,23	107,08	1,29			
21	61	2,26	107,05				
22	62	2,25	107,06	1,25			
23	63	2,26	107,05				
24	64	2,28	107,03	1,19			
25	65	2,28	107,03				
26	66	2,3	107,01	1,06			
27	67	2,31	107				
28	68	2,31	107	0,88			
29	69	2,32	106,99				
30	70	1,93	107,38	0,47			
31	71	1,26	108,05				
32	72	0,6	108,71				
33	73,2	0	109,31				

Таблица 3. Данные по промерам №27, за 3-е мая 1959г. р.Согожа – п.д.Родионка

№27	Расстояние, м	h, м	H, Мбс	v, м/с	$\bar{v}$, м/с	hcp, м	I,‰
1	41,5	0	109,11		1,08	1,82	0,65
2	42	0,15	108,96				
3	43	0,5	108,61				
4	44	1,06	108,05	0,6			
5	45	1,53	107,58				
6	46	2,03	107,08	0,94			
7	47	2,05	107,06				
8	48	2,16	106,95	1,14			
9	49	2,23	106,88				
10	50	2,23	106,88	1,14			
11	51	2,11	107				
12	52	2,09	107,02	1,23			
13	53	2,09	107,02				
14	54	2,07	107,04	1,26			
15	55	2,08	107,03				
16	56	2,06	107,05	1,28			
17	57	2,04	107,07				
18	58	2,05	107,06	1,3			
19	59	2,03	107,08				
20	60	2,03	107,08	1,31			
21	61	2,06	107,05				
22	62	2,05	107,06	1,25			
23	63	2,06	107,05				
24	64	2,08	107,03	1,19			
25	65	2,08	107,03				
26	66	2,1	107,01	1,06			
27	67	2,11	107				
28	68	2,11	107	0,86			
29	69	2,12	106,99				
30	70	1,73	107,38	0,52			
31	71	1,06	108,05				
32	72,5	0	109,11				

Таблица 4. Данные по промерам №30, за 7-е мая 1959г. р.Согожа - п.д.Родионка

№30	Расстояние, м	h, м	H, Мбс	v, м/с	$\bar{v}$, м/с	hcp, м	I, ‰
1	44	0	108,12		0,76	1,02	0,39
2	45	0,54	107,58	0,3			
3	46	1,03	107,09	0,51			
4	47	1,1	107,02				
5	48	1,18	106,94	0,77			
6	49	1,22	106,9				
7	50	1,21	106,91	0,87			
8	51	1,13	106,99				
9	52	1,11	107,01	0,93			
10	53	1,1	107,02				
11	54	1,12	107	0,87			
12	55	1,08	107,04				
13	56	1,08	107,04	0,87			
14	57	1,06	107,06				
15	58	1,07	107,05	0,87			
16	59	1,04	107,08				
17	60	1,08	107,04	0,81			
18	61	1,05	107,07				
19	62	1,08	107,04	0,83			
20	63	1,08	107,04				
21	64	1,08	107,04	0,76			
22	65	1,1	107,02				
23	66	1,09	107,03	0,62			
24	67	1,11	107,01				
25	68	1,12	107				
26	69	1,06	107,06				
27	69,7	0,74	107,38				
28	70	0,58	107,54				
29	71	0	108,12				

2.3 Профили сечения и их анализ

Для полного анализа характерности изменений на реке, из сборника данных ОГХ были взяты данные ежегодных среднемесячных расходов воды и на их основе составлен гидрограф. Аналогичный гидрограф был построен и за исследуемый период наблюдений.

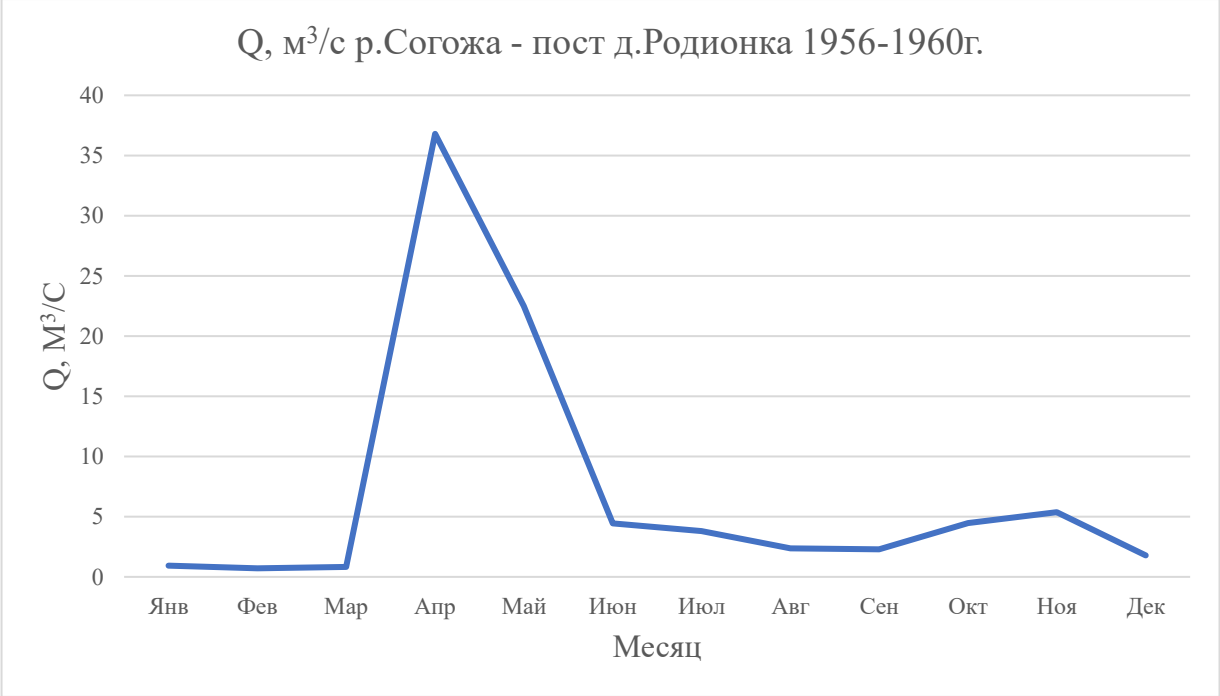


Рисунок 4. Гидрограф по р.Согожа – пост д.Родионка 1956-1960г.

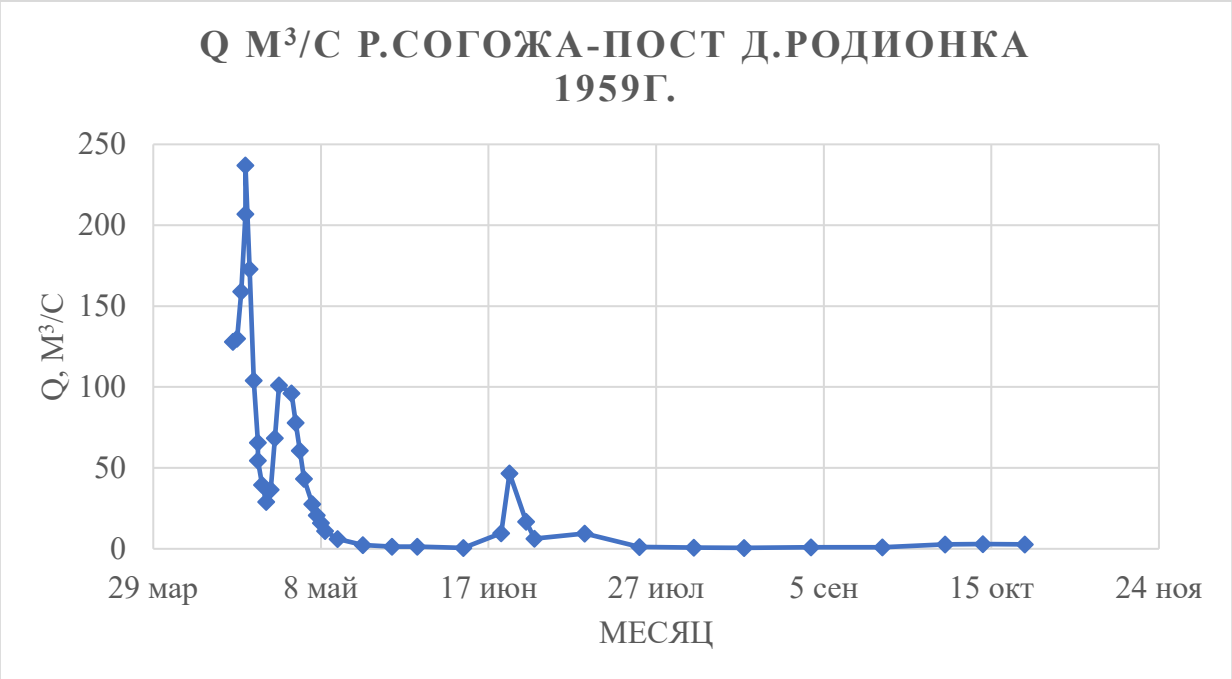


Рисунок 5. Гидрограф по р.Согожа-пост д.Родионка 1959г.

На рисунке 4 видно, что весеннее половодье начинается в конце марта, и идет на спад в июне. В июле половодье уже не наблюдается, но и летне-осенняя межень еще не прослеживается.

На рисунке 5 видно, что в 1959 г. на реке Согожа у половодья было 2 пика: первый основной пик пришелся на 20 апреля, когда расход достиг 237 $м^3/с$, и второй пик половодья, который объясняется большим количеством осадков и колебанием температур, пришелся на 28 апреля, когда расход составил 101 $м^3/с$.

Также, на рисунке 5 можно увидеть непродолжительный паводок в конце июня, который продлился 7 дней. Максимальный расход в этот период был 22 июня и составил 46,7 $м^3/с$.

Следующим этапом в работе стало построение в формате EXEL профилей сечения для каждого створа и их анализ на основе сопоставления на едином графике.

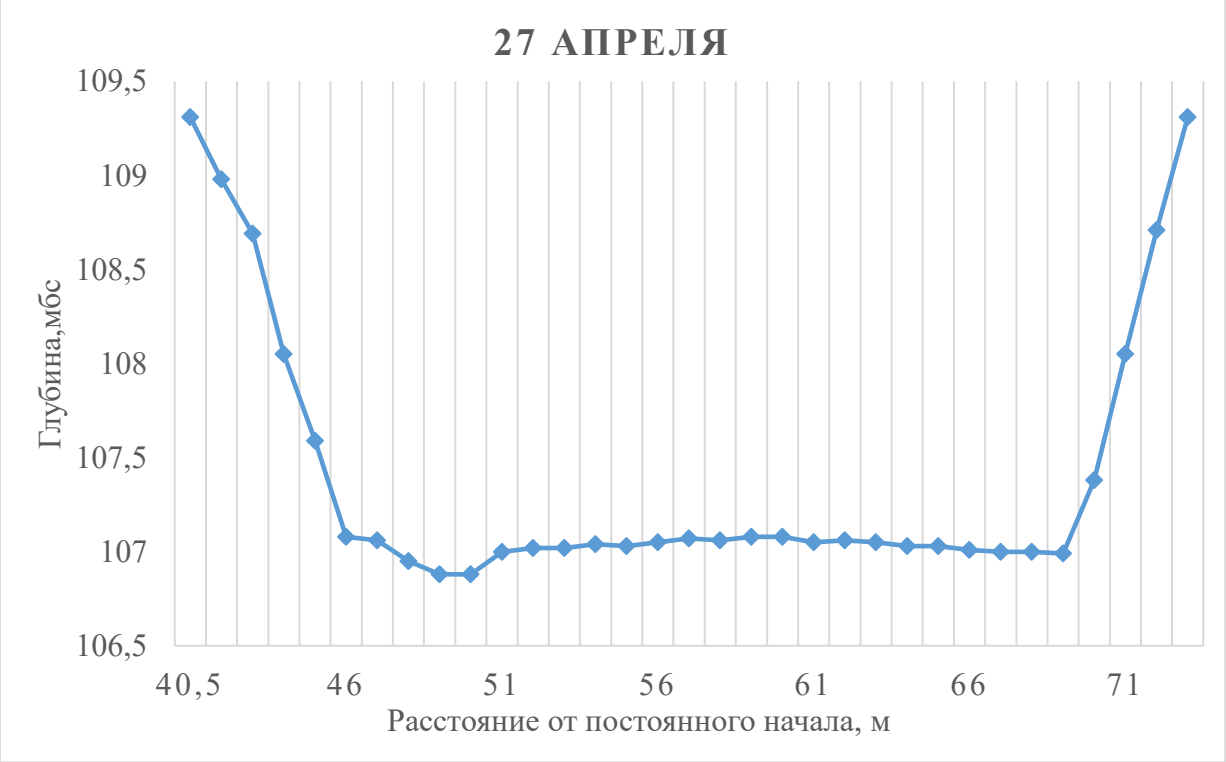


Рисунок 6. Профиль поперечного сечения за 27 апреля на р. Согожа – д. Родионка

На рисунке 4 изображен профиль, сделанный в один из первых дней наблюдений, на нем можно наблюдать пик второй головы половодья. По этому профилю с точностью можно определить тип долины реки – корытообразный, что еще раз напоминает о происхождении речной долины.

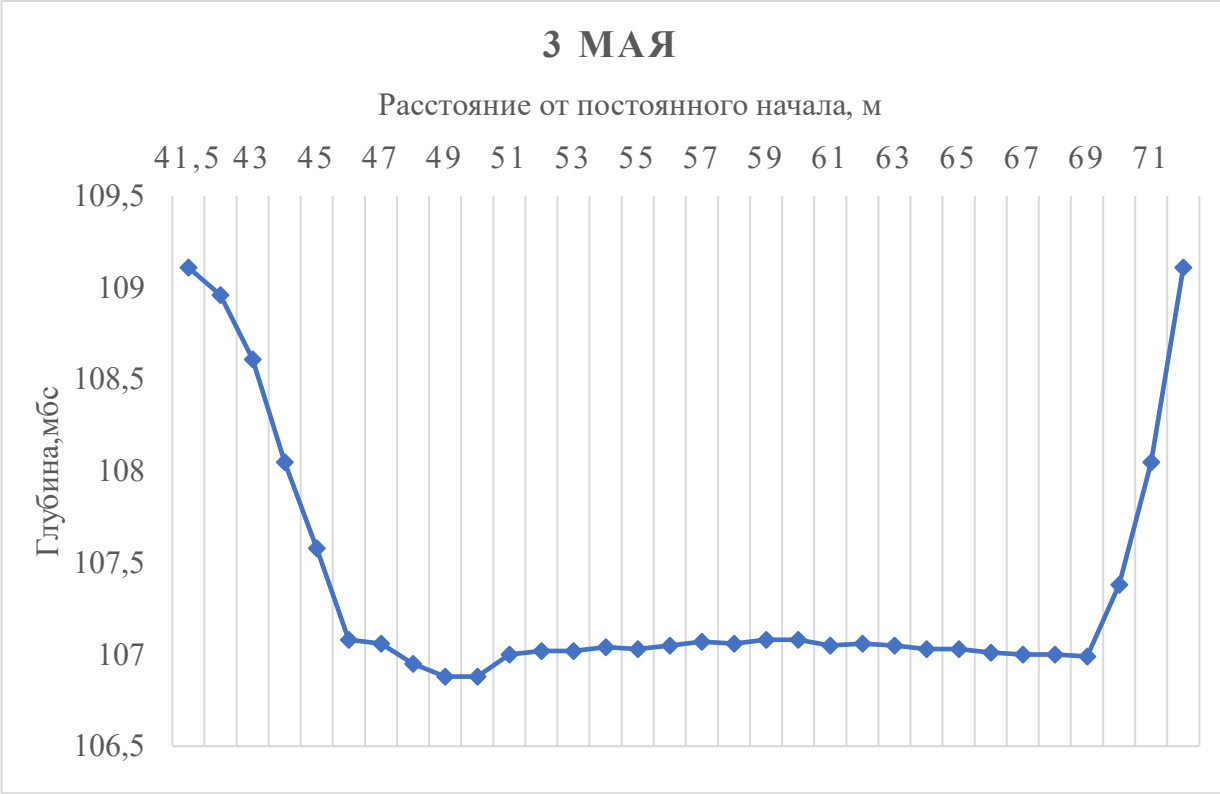


Рисунок 7. Профиль поперечного сечения за 3-е мая на р. Согожа – п. Родионка

На рисунке 5 изображен профиль продольного сечения русла в период времени, когда период половодья почти закончился. В сравнении с предыдущим профилем можно увидеть разницу между максимальными глубинами воды и небольшое изменение формы дна у левого берега, что дает представление о неравномерности размыва грунтов несмотря на отсутствие возле промерного створа каких-либо морфоформ.

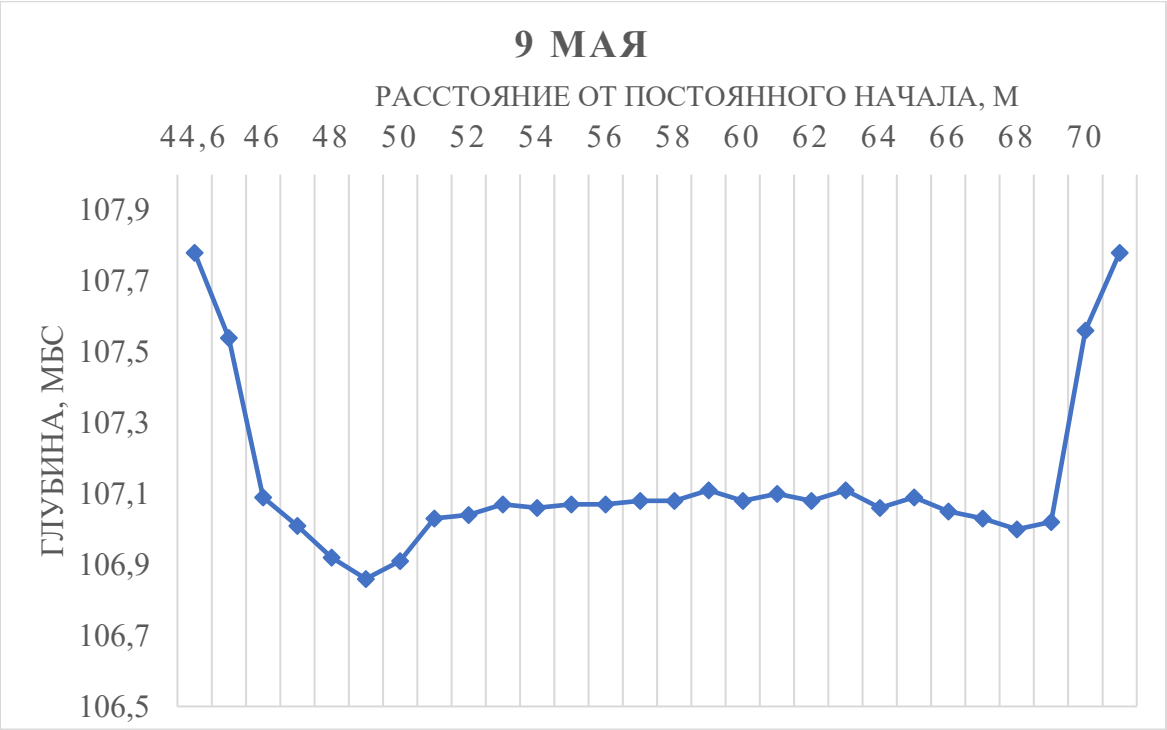


Рисунок 8. Профиль поперечного сечения за 9-е мая на р. Согожа – п. Родионка

На рисунке 8 можно наблюдать профиль поперечного сечения русла в конечный период спада половодья. На профиле очень заметны изменения рельефа дна и, в частности, сильный размыв у левого берега. Разница в глубинах воды с пиковым значением составляет около двух метров, что с учетом довольно короткого промежутка времени, за который произошел спад уровня воды, дает возможность судить об остальных характеристиках реки.

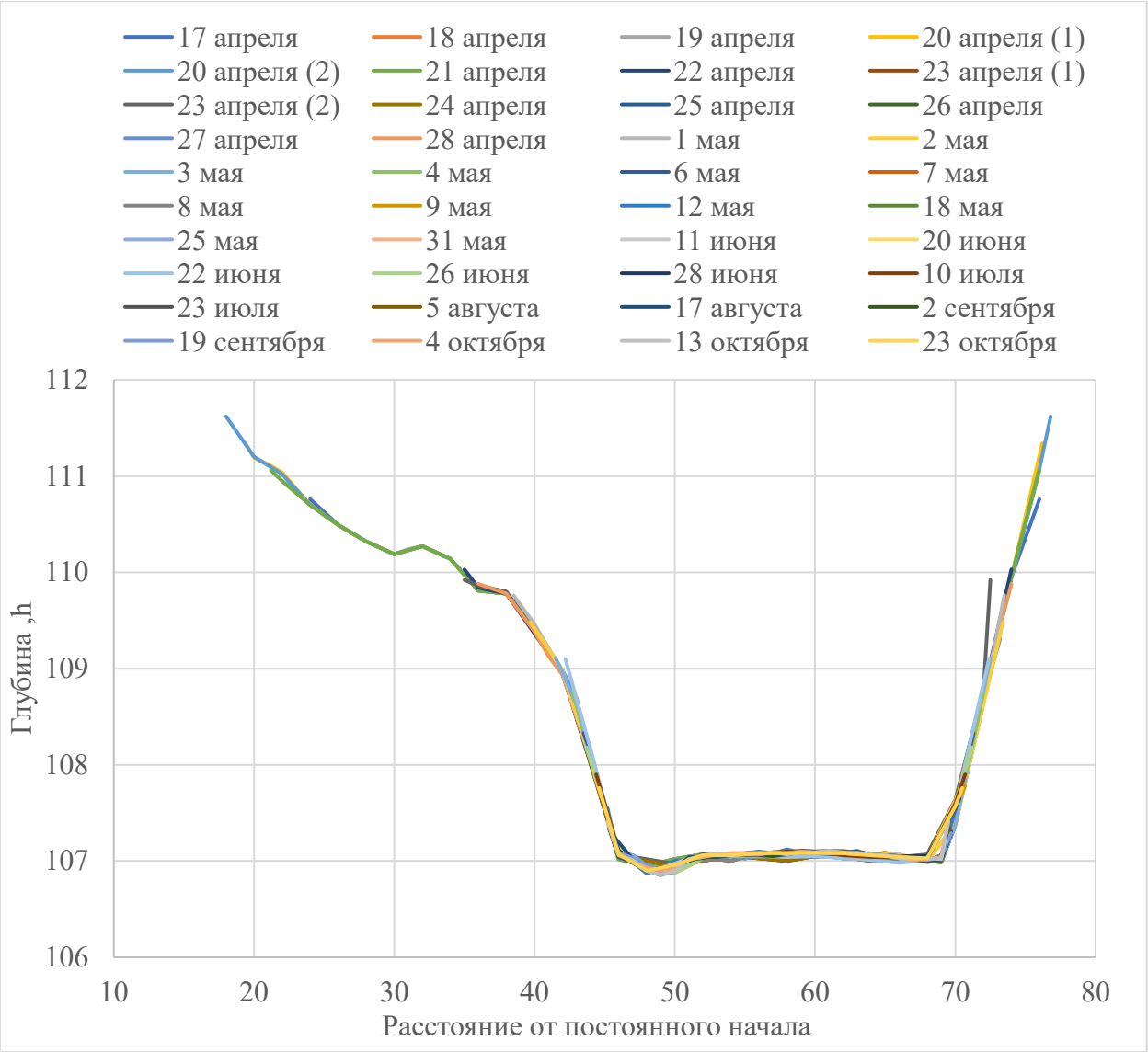


Рисунок 9. Общий график профилей сечения на р. Согожа – п. Родионка

Общий график профилей (рисунок 9) дает максимально полную картину изменений уровня воды и формы русла за наблюдаемый период. Хорошо прослеживается момент затопления пойменной террасы в пик половодья и незначительное изменения рельефа дна. Бровка этой террасы находится на высоте 110 мБС. Разница значений минимальной и максимальной средней глубины за наблюдаемый период составила 2,64 м.

Форма русла – корытообразное, режим реки установившийся. Дно находится на отметке 107 мБС. Площадь поперечного сечения меняется по большей части только от глубины, поэтому для удобства в последующей работе была построена зависимость Q=f(H) (рисунок 10).

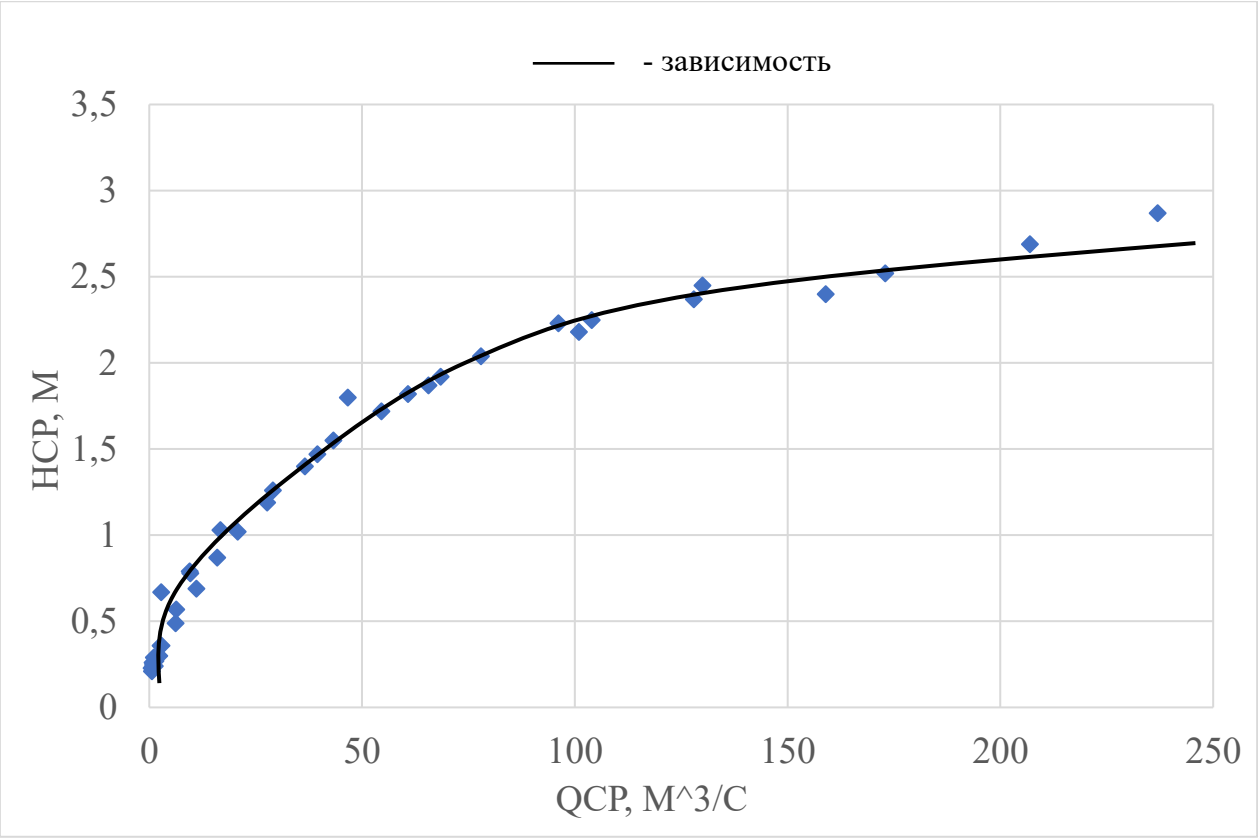


Рисунок 10. Зависимость Q=f(H) на реке Согожа – п. Родионка за 1959 г.

3 Расчет коэффициента Караушева

3.1 Формула Шези и коэффициент Караушева

Формула Шези – это зависимость, которая связывает среднюю скорость потока с геометрией сечения и уклоном дна при установившемся равномерном турбулентном движении жидкости в безнапорном потоке. Формула Шези приемлема для отдельной вертикали при условии равномерного течения, но обычно формула используется для всего сечения:

$$v_i = C_i \cdot \sqrt{h_i \cdot I} \quad (1)$$

где v_i – средняя скорость на вертикали; C_i – коэффициент Шези; h_i – глубина вертикали.

Раскрывая C_i по формуле Маннинга-Павловского ($C = \frac{h^{1/6}}{n}$), формула Шези приобретает следующий вид:

$$v_i = C_i \cdot \sqrt{h_i \cdot I} = \frac{h_i^{2/3} \cdot i^{1/2}}{n_i} \quad (2)$$

Коэффициент Караушева - безразмерный гидравлический коэффициент, который характеризует неравномерность распределения касательных напряжений по смоченному периметру русла и, как следствие, неравномерность распределения продольных скоростей течения.

Он является дополнением для формулы Шези, так как используется на каждой скоростной вертикали для уточнения расчетов.

Формула для расчета коэффициента Караушева:

$$k = \frac{I^{\frac{1}{2}}}{n_i} \quad (3)$$

где I – уклон; n – шероховатость дна.

Формула коэффициента Караушева для естественного русла при наличии измеренного уклона:

$$k = \frac{\bar{v}}{\bar{h}^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

где $\bar{v}$ – средняя скорость потока в сечении; $\bar{h}$ - средняя глубина в сечении.

Формула для расчета скорости через коэффициент Караушева:

$$\bar{v}_i = \mathrm{k} \cdot {h_i}^{2/3} \quad (5)$$

В ходе расчетов показателей по данным с поста д. Родионка, было выявлено два сценария практического использования формулы Караушева - при наличии измеренного уклона и при отсутствии оного.

Тогда, если имеется поперечный профиль русла, а также параметры n_i и I, то по формуле (5) рассчитывается распределение по ширине русла средних по вертикали скоростей течения, а затем по формулам рассчитываются скорости течения на любых глубинах на разных вертикалях.

Таким образом, формула коэффициента Караушева для естественного русла при наличии измеренного уклона имеет вид:

$$k = \frac{\bar{v}}{\bar{h}^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

Формула для расчета средней скорости потока с учетом коэффициента Караушева:

$$\bar{v}_{\text{расч}} = k \cdot \bar{h}^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Так как в исходных данных не во все дни измерялся уклон, значит необходимо вывести формулу для расчета коэффициента Караушева, которая не учитывает этот параметр. Это можно сделать при помощи совокупности формул (2), (3) и (6):

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \cdot \bar{h}^{\frac{1}{6}} \cdot \bar{h}^{\frac{1}{2}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Если сложить все преобразования, то формула Караушева для естественного русла при отсутствии измеренного уклона имеет следующий вид:

$$k = \frac{\bar{v}}{\bar{h}^{\frac{2}{3}}} \quad (9)$$

Формула расчета средней скорости потока с учетом коэффициента Караушева:

$$\bar{v}_{\text{расч}} = k \cdot \bar{h}^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

3.2 Расчет коэффициента Караушева по всем имеющимся данным и поиск зависимости

При анализе данных из книжки КГ-3М за 1959 р. Согожа-пост д. Родионка было выявлено, что в 32-х из 39-ти дней данные по измерениям уклона отсутствуют. В большинстве случаев отсутствие измерений сопровождалось записью о наличии на реке в этот день редкого или среднего лесосплава. Хотя прямой корреляции между этими фактами не выявлено, можно предположить, что результат при использовании Коэффициента Караушева для расчетов в такие дни будет недостаточно точным. Все расчеты были структурированы в общую таблицу (таблица 5).

Таблица 5. Сводная таблица различных характеристик потока для реки Согожа - п. Родионка за 1959 г.

№	Дата	принятые данные из книжки					I, ‰	k	vcp, м/с	Состояние русла
		Qcp, $м^3/с$	hcp, м	B, м	Vcp, м/с	F, $м^2$				
11	17.апр	128	2,37	51,5	1,05	122		0,59	1,05	рлдн
12	18.апр	130	2,45	53,8	0,98	132		0,54	0,98	рлдн
13	19.апр	159	2,40	52,6	1,26	126		0,70	1,26	рлдх
14	20.апр	207	2,69	56,8	1,35	153	0,29	1,30	1,35	свободное
15	20.апр	237	2,87	58,8	1,4	169	0,42	1,07	1,40	свободное
16	21.апр	173	2,52	54,8	1,25	138		0,68	1,25	свободное
17	22.апр	104	2,25	39	1,18	87,9	0,39	1,10	1,18	свободное
18	23.апр	65,6	1,87	32,5	1,08	60,9		0,71	1,08	свободное
19	23.апр	54,6	1,72	30,9	1,03	53,2		0,72	1,03	лесосплав
20	24.апр	39,5	1,47	29	0,93	42,7	0,45	1,07	0,93	редкий лесосплав
21	25.апр	29,1	1,26	28,2	0,82	35,5		0,70	0,82	редкий лесосплав
22	26.апр	36,6	1,4	29,1	0,9	40,7		0,72	0,90	редкий лесосплав
23	27.апр	68,5	1,92	32,7	1,09	62,8	0,46	1,04	1,09	редкий лесосплав
24	28.апр	101	2,18	38	1,22	82,8		0,73	1,22	ср. лесосплав
25	01.май	96,2	2,23	35	1,23	78		0,72	1,23	лесосплав
26	02.май	78	2,04	33,7	1,14	68,6		0,71	1,14	редкий лесосплав
27	03.май	60,8	1,82	31	1,08	56,4	0,65	0,90	1,08	лесосплав
28	04.май	43,3	1,55	29,3	0,95	45,5		0,71	0,95	свободное
29	06.май	27,7	1,19	27,8	0,83	33,2		0,74	0,83	свободное
30	07.май	20,8	1,02	27	0,76	27,5	0,39	1,20	0,76	свободное
31	08.май	16	0,87	26,4	0,7	23		0,77	0,70	свободное

Продолжение таблицы 5. Сводная таблица различных характеристик потока для реки Согожа - п. Родионка за 1959 г.

№	Дата	принятые данные из книжки					I, ‰	k	vcp, м/с	Состояние русла
		Qcp, $м^3/с$	hcp, м	B, м	Vcp, м/с	F, $м^2$				
32	09.май	11,1	0,69	26,1	0,62	18		0,79	0,62	свободное
33	12.май	6,18	0,49	24,8	0,51	12,2	-	0,82	0,51	чисто
34	18.май	2,36	0,3	24,3	0,32	7,32	-	0,71	0,32	чисто
35	25.май	1,31	0,24	24	0,23	5,77	-	0,60	0,23	трава
36	31.май	1,44	0,27	24,1	0,22	6,61	-	0,53	0,22	трава
37	11.июн	0,63	0,21	23,9	0,13	5,03	-	0,37	0,13	трава
38	20.июн	9,64	0,78	26,4	0,47	20,5	-	0,55	0,47	трава
39	22.июн	46,7	1,8	31	0,84	55,7	-	0,57	0,84	трава
40	26.июн	16,7	1,03	27,5	0,59	28,4	-	0,58	0,59	трава
41	28.июн	6,39	0,57	25,5	0,44	14,5	-	0,64	0,44	трава
42	10.июл	9,52	0,79	26,3	0,46	20,7	-	0,54	0,46	трава
43	23.июл	1,08	0,29	24,3	0,15	7,05	-	0,34	0,15	трава
44	05.авг	0,79	0,26	24,2	0,13	6,26	-	0,32	0,13	трава
45	17.авг	0,6	0,23	24,2	0,11	5,5	-	0,29	0,11	чисто
46	02.сен	0,96	0,25	24,2	0,16	6,13	-	0,40	0,16	чисто
47	19.сен	0,93	0,24	24,2	0,16	5,79	-	0,41	0,16	чисто
48	04.окт	2,67	0,36	24,3	0,31	8,73	-	0,61	0,31	трава
49	13.окт	2,86	0,36	24,3	0,33	8,75	-	0,65	0,33	трава
50	23.окт	2,79	0,67	25,9	0,16	17,3	-	0,21	0,16	забереги и сало

Всего было выбрано 6 переменных для поиска зависимости: $\bar{Q}$=f(k), $\bar{h}$=f(k), B=f(k), F=f(k), $\bar{v}$=f(k) и I=f(k). В каждом графике между точками была проведена линия тренда и, для проверки взаимосвязи между переменными, был найден коэффициент корреляции.

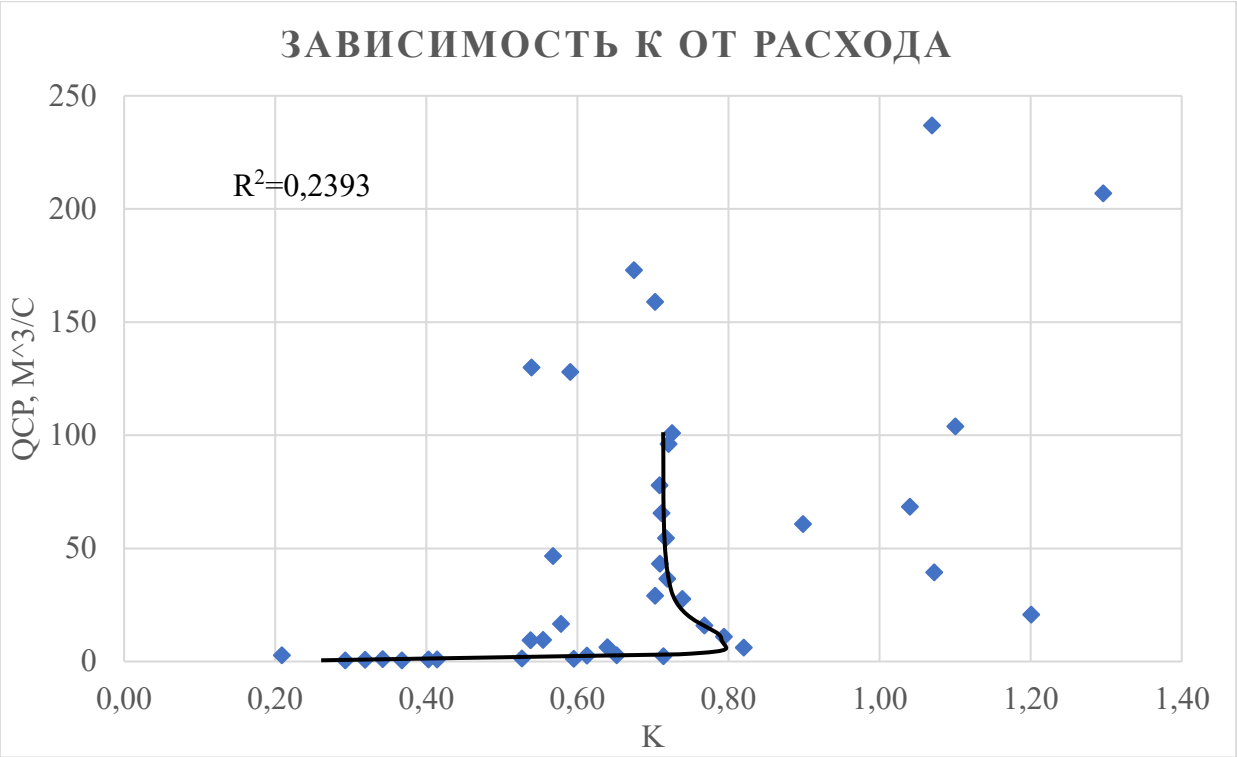


Рисунок 11. График зависимости k от расхода Q за весь период наблюдений

На рисунке 11 изображен график зависимости расхода воды от коэффициента Караушева. На графике можно заметить большое количество точек в середине графика, а также в левой части у оси k. Эти точки образуют неоднозначный график зависимости, который похож на параболу с выгнутой правой частью.

Также, есть большое количество точек, которые отклоняются от прослеживаемой зависимости по различным причинам: влияние лесосплава, изменчивость и непредсказуемость во время весеннего половодья или паводка.

Исходя из получившегося значения коэффициента корреляции (R^2=0,24) следует вывод об отсутствии зависимости между переменными. Необходимый диапазон для фиксации зависимости от 0,7 до 1.

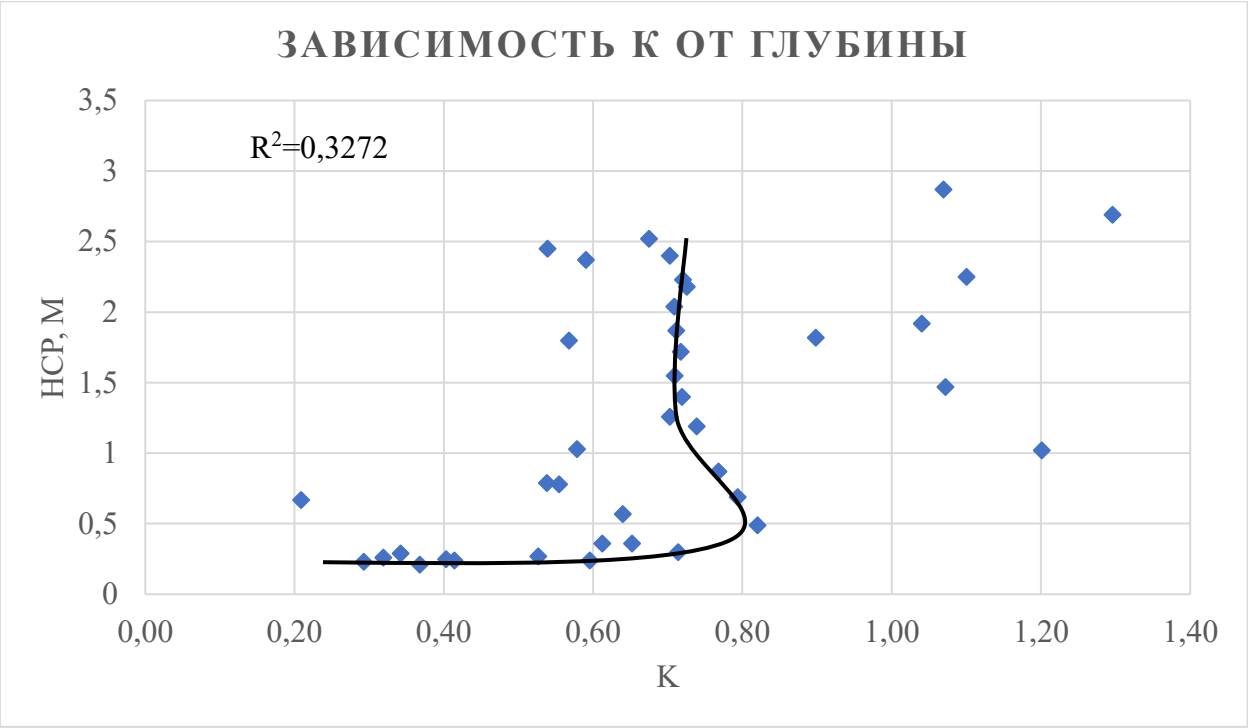


Рисунок 12. График зависимости k от глубины h за весь период наблюдений

На рисунке 12 ситуация повторяется: на графике большое количество точек в середине графика, а также в левой части у оси k. Эти точки образуют неоднозначный график зависимости, который похож на параболу с выгнутой правой частью.

По аналогии с предыдущим графиком, корреляция между параметрами не прослеживается (R^2=0,33), большое количество точек также сильно откланяются.

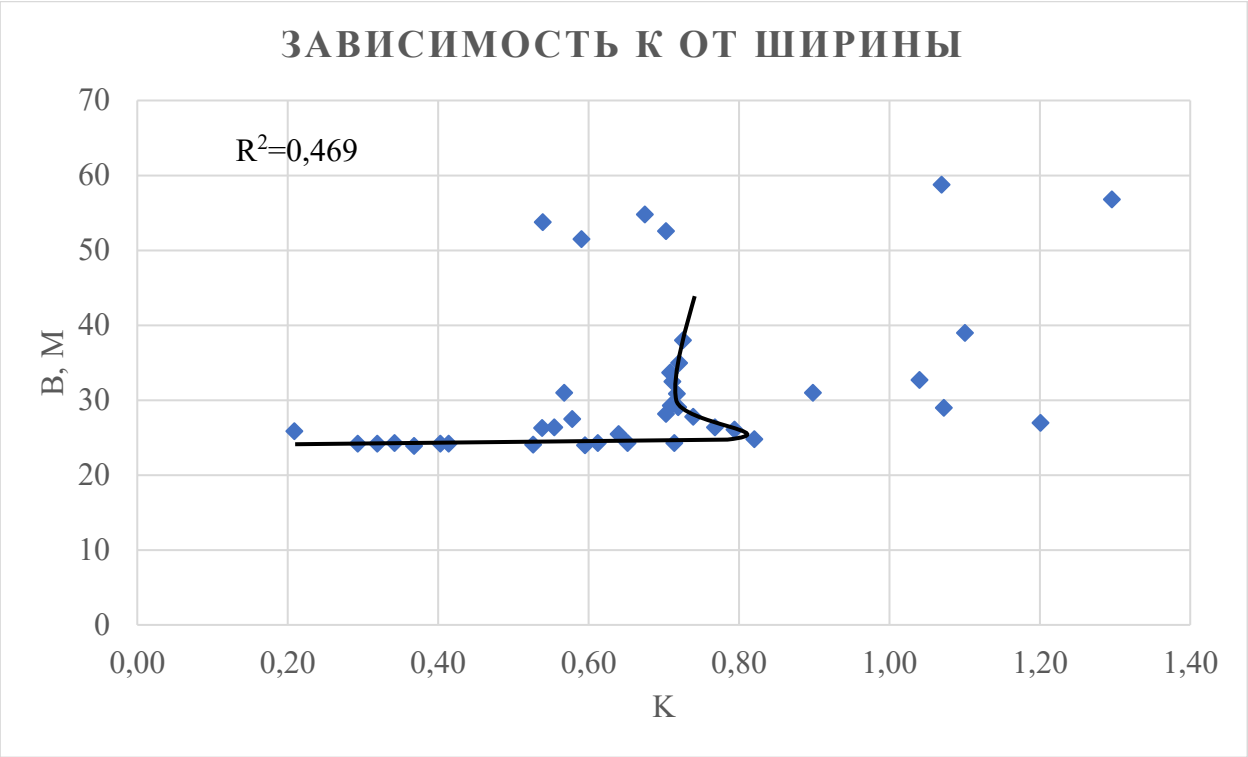


Рисунок 13. График зависимости k от ширины B за весь период наблюдений

На рисунке 13 сохраняется график зависимости в виде параболы с выгнутой правой частью, но в этом случае это не так явно прослеживается. Больше точек лежат вблизи графика, в отличии от предыдущих зависимостей, но все равно большое количество точек выкалывается из общей картины. Коэффициент корреляции равен 0,47, что является большим показателем из уже перечисленных.

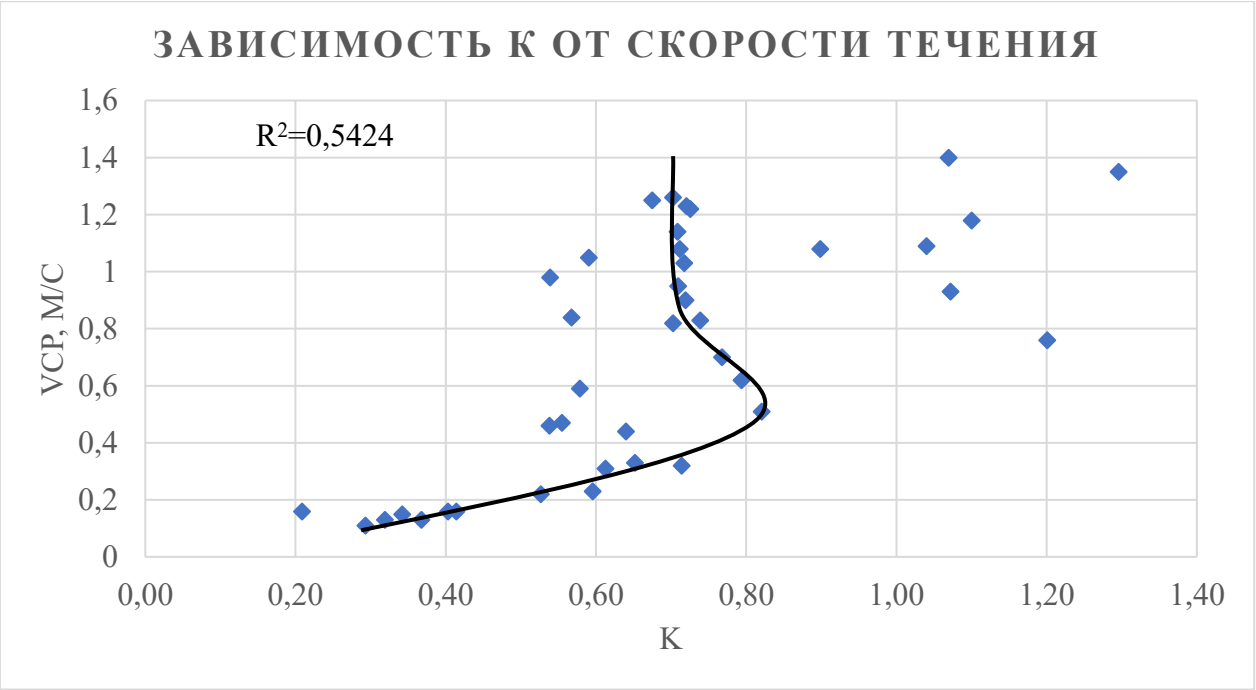


Рисунок 14. График зависимости между k и скоростью течения v за весь период наблюдений

На рисунке 14 представлен график зависимости между коэффициентом Караушева и скоростью течения. На нем, в отличии от предыдущих отмечается улучшение зависимости переменных (R^2=0,54), но все еще недостаточно для установления факта наличия корреляционной зависимости.

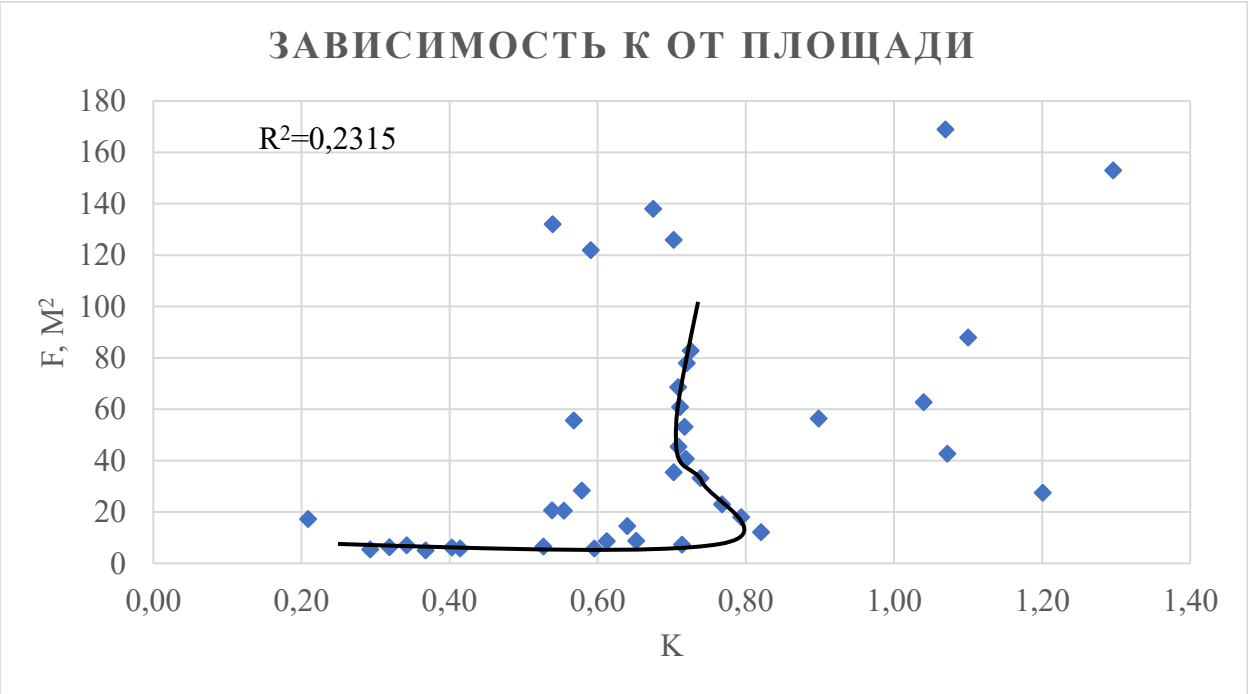


Рисунок 15. График зависимости k от площади F за весь период наблюдений

На рисунке 15 также прослеживается зависимость в виде параболы с выгнутой правой частью.

Для всех этих графиков зависимость можно описать так: при увеличении параметра увеличивается коэффициент Караушева, но присутствует 2 точки перегиба, которые создают неточности. Большое количество точек сильно отклоняются от прослеживаемой зависимости, из-за чего нельзя однозначно выявить соотношение между параметрами.

Для дней с отсутствием измеренного уклона применялась расчетная формула (9), учитывающая только среднюю скорость и среднюю глубину. Полученные по ней значения так же были занесены в таблицы для нахождения зависимости, но ни в одном случае и ни с одной переменной она не была зафиксирована.

3.3 Расчет коэффициента Караушева при наличии измеренного уклона и проверка зависимости

При анализе записей в книжке КГ-3М по посту п.Родионка - р.Согожа за 1959 г. было выявлено, что из 39-ти дней, когда проводились измерения, уклон измерялся только в 7-ми.

Таблица 6. Сводная таблица различных характеристик потока при измеренном уклоне для реки Согожа - п. Родионка за 1959 г.

№	Дата	принятые данные из книжки					I, ‰	k	vcp, м/с	Состояние русла
		Qcp, $м^3/с$	hcp, м	B, м	Vcp, м/с	F, $м^2$				
14	20.апр	207	2,69	56,8	1,35	153	0,29	1,3	1,35	свободное
15	20.апр	237	2,87	58,8	1,4	169	0,42	1,07	1,4	свободное
17	22.апр	104	2,25	39	1,18	87,9	0,39	1,1	1,18	свободное
20	24.апр	39,5	1,47	29	0,93	42,7	0,45	1,07	0,93	редкий лес.
23	27.апр	68,5	1,92	32,7	1,09	62,8	0,46	1,04	1,09	редкий лес.
27	3.мая	60,8	1,82	31	1,08	56,4	0,65	0,9	1,08	лесосплав
30	7.мая	20,8	1,02	27	0,76	27,5	0,39	1,2	0,76	свободное

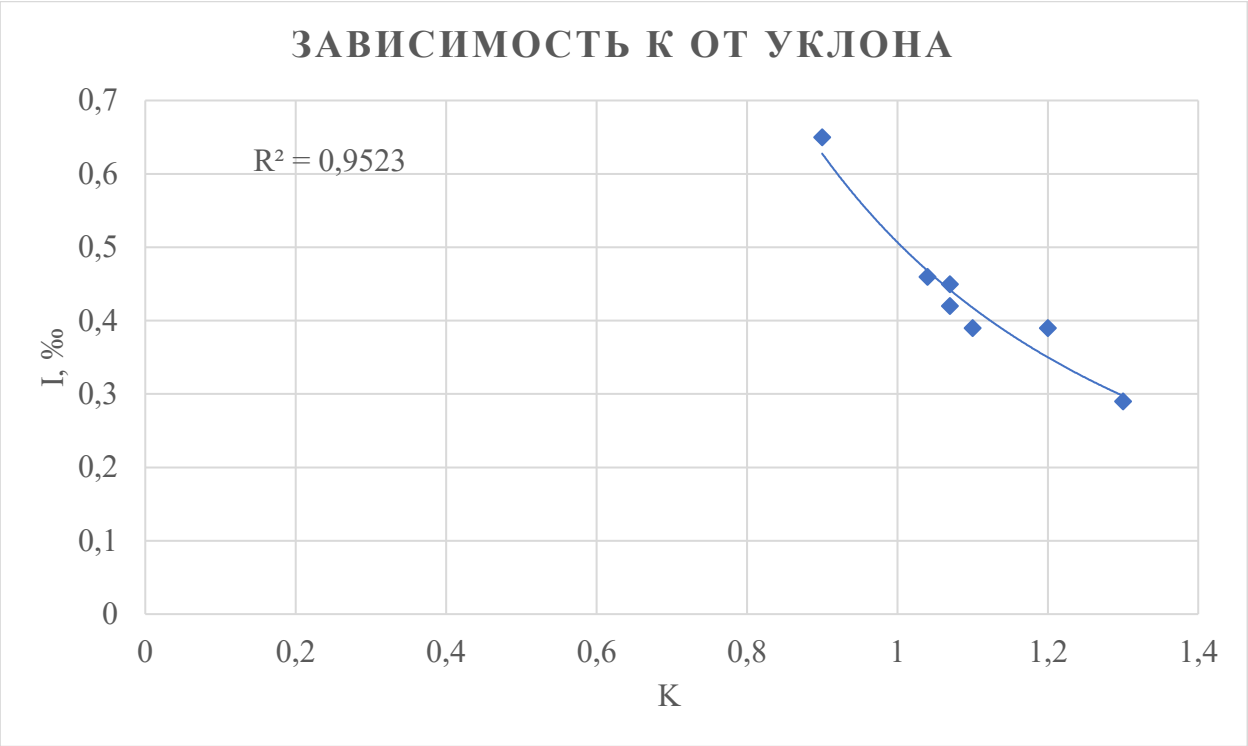


Рисунок 16. График зависимости k от уклона I

На рисунке 16 наблюдается характерная зависимость между переменными. Коэффициент корреляции равен 0,95, что является самым высоким показателем среди представленных графиков. Он показывает отличную зависимость между переменными.

Однако, 7 измерений недостаточно для построения графиков и поиска зависимостей, поэтому было принято решение методом интерполяции вычислить значения уклонов между известными данными, чтоб получить больший ряд данных. Всего таким способом было восстановлено 10 измерений, что увеличило количество точек до 17.

Интерес такой методологии заключается в потенциальной возможности решить одну из самых важных проблем работоспособности коэффициента Караушева в исследуемых целях, а именно его требовательность к большому объему данных и непрерывности их фиксации.

Таблица 7. Сводная таблица различных характеристик потока при измеренном и интерполированном уклоне для реки Согожа - п. Родионка за 1959 г.

№	Дата	принятые данные из книжки					I, ‰	k	vcp, м/с	Состояние русла
		Qcp, $м^3/с$	hcp, м	B, м	Vcp, м/с	F, $м^2$				
14	20.апр	207	2,69	56,8	1,35	153	0,29	1,30	1,35	свободное
15	20.апр	237	2,87	58,8	1,4	169	0,42	1,07	1,40	свободное
16	21.апр	173	2,52	54,8	1,25	138	0,41	1,06	1,25	свободное
17	22.апр	104	2,25	39	1,18	87,9	0,39	1,10	1,18	свободное
18	23.апр	65,6	1,87	32,5	1,08	60,9	0,41	1,11	1,08	свободное
19	23.апр	54,6	1,72	30,9	1,03	53,2	0,43	1,09	1,03	лесосплав
20	24.апр	39,5	1,47	29	0,93	42,7	0,45	1,07	0,93	редкий лесосплав
21	25.апр	29,1	1,26	28,2	0,82	35,5	0,45	1,05	0,82	редкий лесосплав
22	26.апр	36,6	1,4	29,1	0,9	40,7	0,46	1,06	0,90	редкий лесосплав
23	27.апр	68,5	1,92	32,7	1,09	62,8	0,46	1,04	1,09	редкий лесосплав
24	28.апр	101	2,18	38	1,22	82,8	0,51	1,02	1,22	ср. лесосплав
25	01.май	96,2	2,23	35	1,23	78	0,56	0,97	1,23	лесосплав
26	02.май	78	2,04	33,7	1,14	68,6	0,60	0,91	1,14	редкий лесосплав
27	03.май	60,8	1,82	31	1,08	56,4	0,65	0,90	1,08	лесосплав
28	04.май	43,3	1,55	29,3	0,95	45,5	0,56	0,95	0,95	свободное
29	06.май	27,7	1,19	27,8	0,83	33,2	0,48	1,07	0,83	свободное
30	07.май	20,8	1,02	27	0,76	27,5	0,39	1,20	0,76	свободное

Для проверки надежности такого способа восстановления данных был построен график зависимости I=f(k) (рисунок 17).

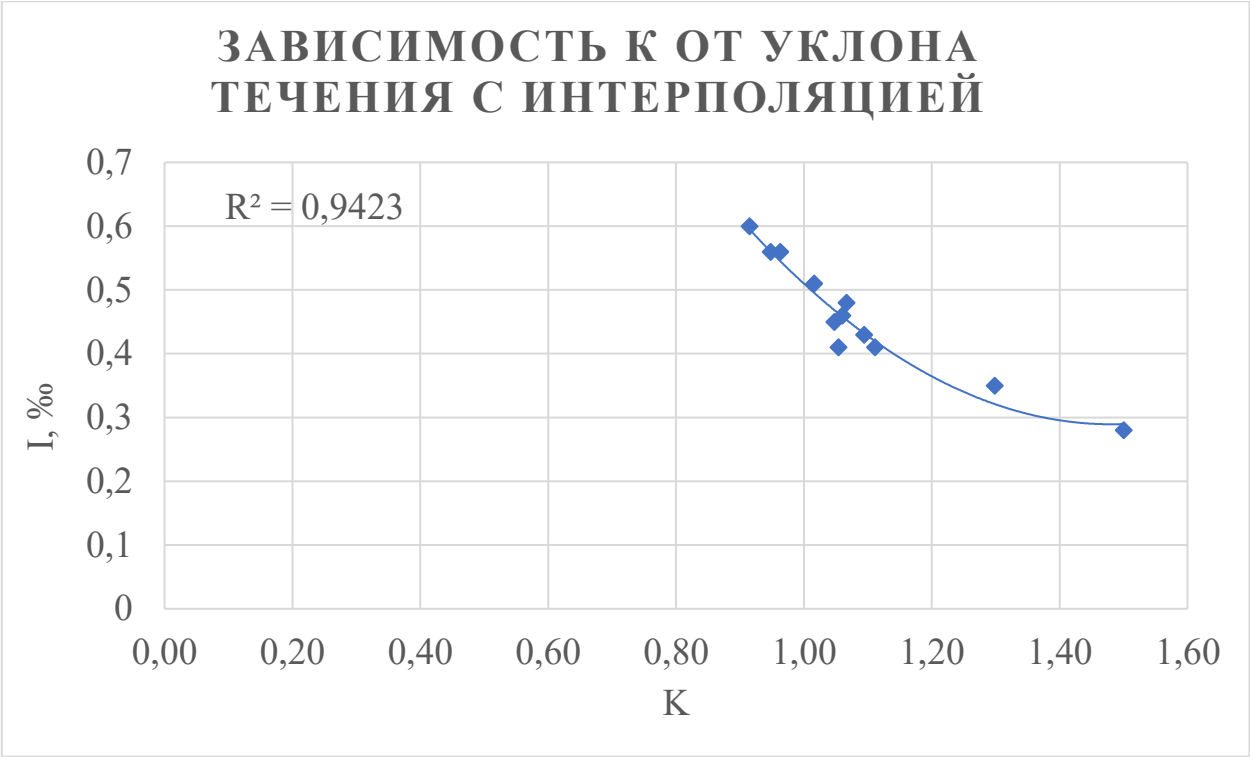


Рисунок 17. График зависимости k от уклона I с восстановленными данными

На рисунке 17 видно, что дни, за которые был получен уклон с помощью метода интерполяции, отлично ложатся в ряд с днями, где уклон был измерен. Значение коэффициента корреляции сопоставимо с тем, которое было получено выше, из чего можно сделать вывод о целесообразности применения интерполяции для дней с пропущенными измерениями уклона.

3.4 Вывод из анализа применения коэффициента Караушева k

Проведя анализ получившихся в ходе расчетов результатов, получаются следующие итоги: в случае использования коэффициента Караушева, рассчитанного по формуле (6), прослеживается явная зависимость между значением уклона и последующей точностью расчета средней скорости с использованием коэффициента k. При этом становиться совершенно ясно, что при отсутствии данных об уклоне за определенный день, когда проводились измерения, мы не можем установить четкую зависимость между какими-либо иными переменными и коэффициентом k, однако в тех днях, которые находятся в промежутке между днями с измерениями уместно использование пространственной интерполяции.

4 Вывод

Изначальной целью работы было выяснить возможность практического применения коэффициента Караушева k для расчета средней скорости потока в естественном русле.

После произведенных расчетов и анализа данных и зависимостей можно выделить несколько ключевых аспектов, влияющих на пригодность метода с использованием коэффициента k: Первым стоит отметить крайнюю необходимость в наличии полного спектра данных по изучаемому объекту за длительный период времени. Хотя в главе 3 можно отметить наличие зависимостей, что несомненно является успехом при проверке эмпирического коэффициента, все же для большей части дней, имевшихся выборке использование метода невозможно за отсутствием полных данных. Вторым фактором хотелось бы отметить значительное влияние на точность расчетов антропогенных факторов таких как лесосплав, ведь использование коэффициента подразумевает продолжительное стабильное состояние естественного русла, так как отсутствие оного ведет уменьшению точности и количества данных, от которых напрямую зависит работоспособность методики.

Обобщая все вышесказанное, можно сделать вывод что метод расчета с использованием Коэффициента Караушева применим на практике, но лишь при стечении ряда факторов.

Список использованной литературы

1. Гидрологическая книжка КГ-3М “река Согожа – пост деревня Родионка за 1959г.”

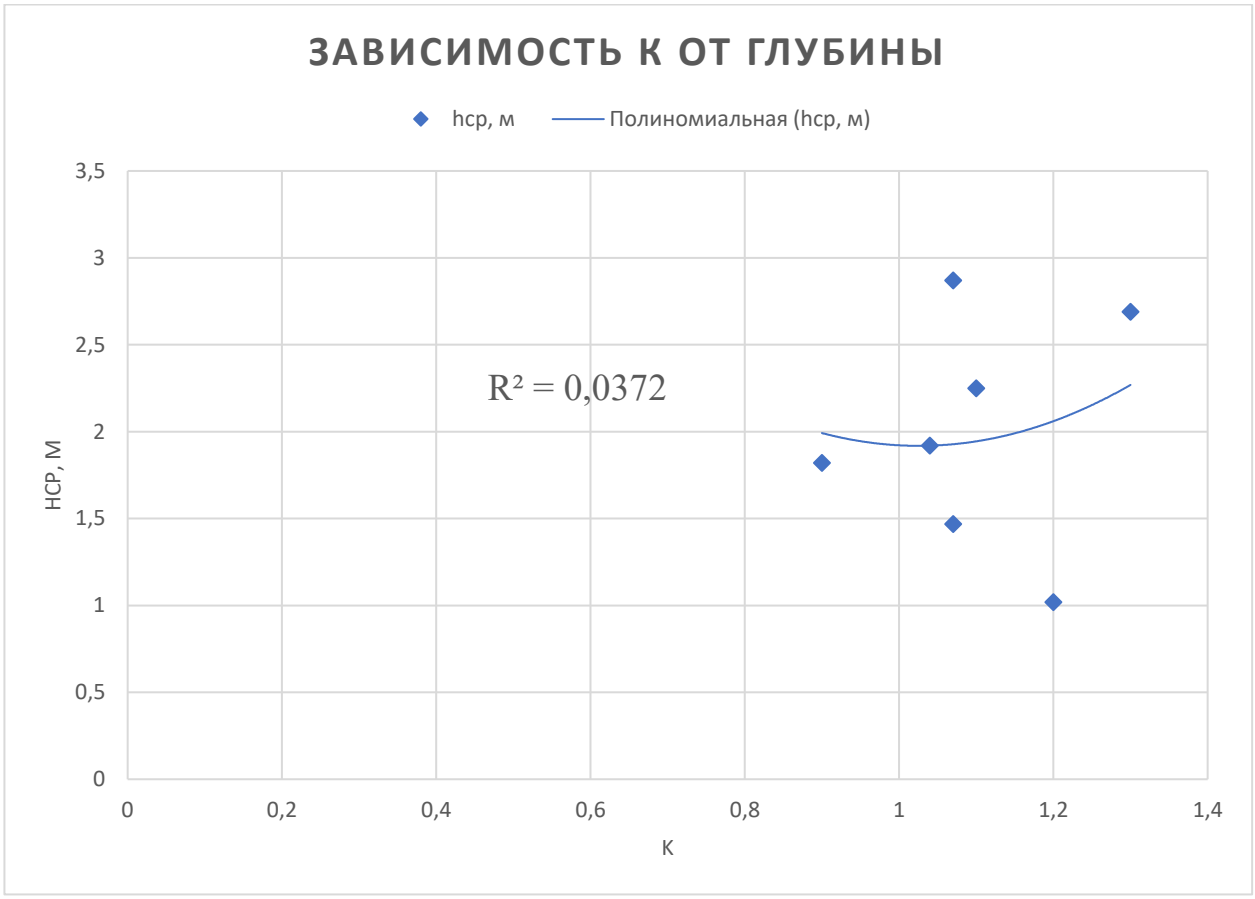
2. Гидрологический ежегодник “Бассейн реки Волга том II 1956-1966г.”

3. Сборник “Русловые процессы” – Барышников Н.Б. 2007г.

Приложение



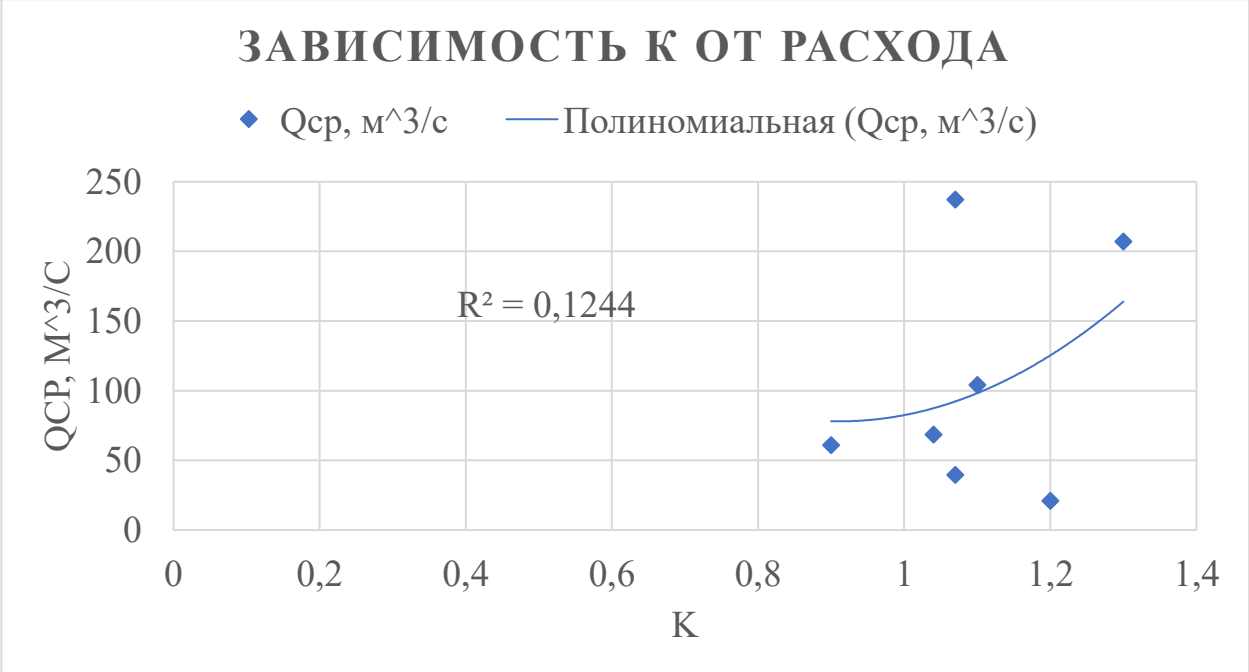
Приложение 1. Гидрограф по многолетним среднемесячным данным измеренного уровня воды на р.Согожа-п.д.Родионка



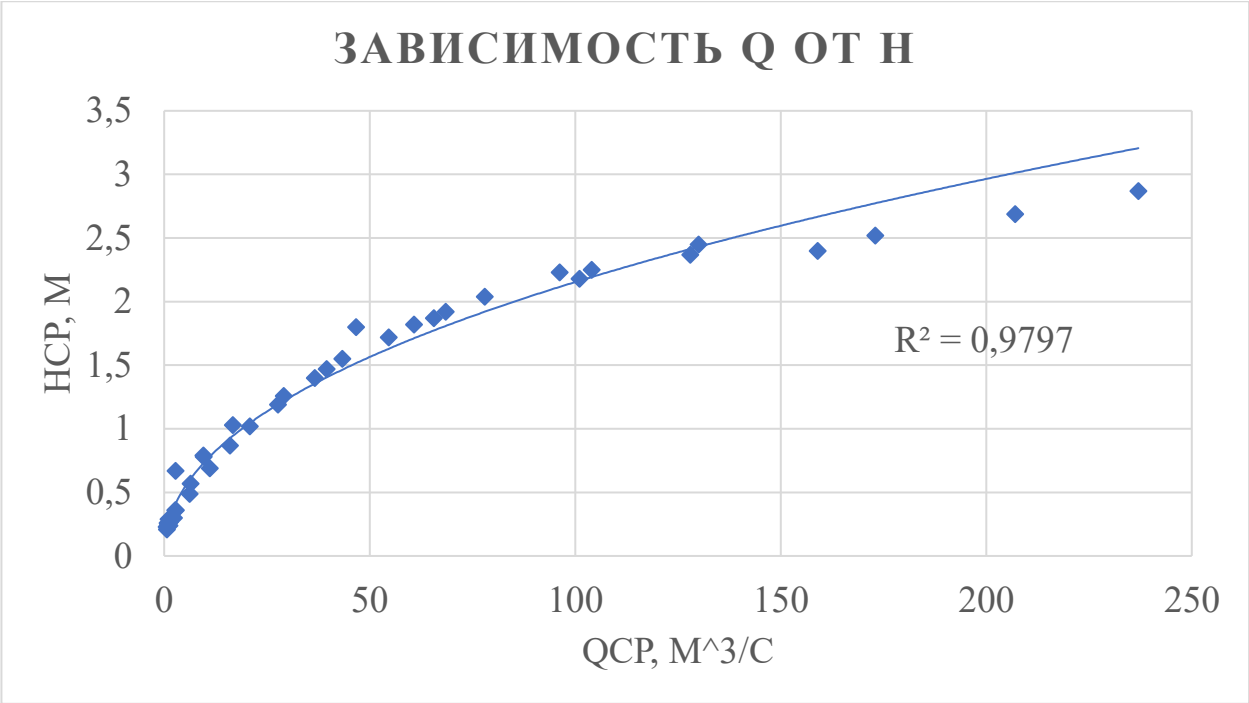
Приложение 2 зависимость k от глубины за дни с наличием уклона и расчетом k по формуле (6)



Приложение 3 зависимость k от скорости течения за дни с наличием уклона и расчетом k по формуле (6)



Приложение 4 зависимость k от расхода за дни с наличием уклона и расчетом k по формуле (6)



Приложение 5 Зависимость Q от H