



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

Кафедра инженерной гидрологии

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(выпускная квалификационная работа)

На тему Русловые процессы р. Кола в  
районе железнодорожного моста по линии  
г. Санкт-Петербург – г. Мурманск  
Октябрьский железной дороги

Исполнитель Шарков Григорий Алексеевич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.ф.-м.н., доцент  
(ученая степень, ученое звание)

Саноцкая Надежда Александровна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

К.Г.Н., ДОЦЕНТ  
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич  
(фамилия, имя, отчество)

Санкт-Петербург  
2023

12.06.23

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
1 ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА	4
1.1 Природные условия	4
1.2 Геологическое строение и рельеф	5
1.3 Растительный покров	8
1.4 Климат	9
1.5 Температура воздуха	10
1.6 Осадки	11
1.7 Снежный покров	12
1.8 Описание поста	13
2 ВОДНЫЙ РЕЖИМ Р. КОЛА	14
2.1 Гидрометеорологическая изученность	14
2.2 Максимальные расходы воды	16
2.3 Характерные расходы воды	22
3 РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ	27
3.1 Типизация руслового процесса	27
3.2 Спутниковые снимки и описание ситуации на реке	29
3.3 Расчёты деформаций русла в створе мостового перехода	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	48
Приложение А	49
Приложение Б	50
Приложение В	51
Приложение Г	52
Приложение Д	53
Приложение Е	54

## ВВЕДЕНИЕ

В данной работе приведены результаты расчётов общего и местного размывов в створе мостового перехода через реку Кола на 1436 км по линии г. Санкт-Петербург – г. Мурманск Октябрьской железной дороги.

Актуальность данной работы обуславливается уникальностью условий развития деформаций в створе мостового перехода, в виду нестандартного положения несущих опор по отношению к потоку, а также некорректностью выполненных расчётов заглубления фундамента при проектировании трёх несущих опор моста.

Данный мост был построен в 1927 году, а его обрушение произошло 1 июня 2020 года в 14 часов 30 минут. При прохождении паводка, на фоне весеннего половодья, глубина местного размыва у подножия второй несущей опоры, находящейся по центру русла реки, достиг критических для неё отметок, и опора была подкошена потоком с дальнейшим обрушением моста.

При постройке моста были некорректно произведены расчёты данного гидротехнического сооружения, в плане достаточных отметок заглубления фундамента во избежание критических размывов русла, что в последствии вызвало необходимость проводить ремонтно-восстановительные работы. На разрушение моста также повлияли несоблюдение рабочими требований безопасности и нерациональный подход к работам по восстановлению устойчивого состояния гидротехнического сооружения.

Этот мост является единственной железнодорожной магистралью, связывающей порт г. Мурманск с торгово-транспортной сетью России.

На данный момент построен новый мост и налажены транспортные взаимосвязи, даже с увеличенной в сравнении с прежним нагрузкой. Новый мост был построен в кратчайшие сроки – за 105 дней от момента регистрации ЧП.

# 1 ФИЗИКО–ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА

## 1.1 Природные условия

Территория Кольского полуострова находится на самом северо-западе Европейской части бывшего СССР. Его естественные границы - Баренцево и Белое моря - омывают его с трех сторон (севера, востока и юга). Граница на западе совпадает с государственной границей бывшего СССР с Норвегией и Финляндией. На юге граница проходит между государственной границей и Белым морем, по южному водоразделу бассейна реки Нивы [6].

Кольский полуостров имеет площадь 130 000 км<sup>2</sup>, большая часть которой находится за Полярным кругом. Эта территория принадлежит Мурманской области и обслуживается Мурманским УГМС. В данной работе под "Кольским полуостровом" или "Мурманской областью" понимается вся рассматриваемая территория [6].

## 1.2 Геологическое строение и рельеф

Геологию Кольского полуострова характеризует восточная часть Балтийского щита, то есть в основе лежит кристаллический фундамент архейского, протерозойского и частично палеозойского возраста, а покрывают его рыхлые четвертичные отложения. Фундамент представлен метаморфическими и эффузивными комплексами с большим содержанием гранитов. Ядра антиклиналей наиболее часто представляют архейские гранитно-гнейсовые породы [6].

Остатки горных хребтов в виде горстов, сопровождающиеся системами трещин и разломов, разрывов и сбросов, говорят о тектоническом происхождении рельефа данной территории. Для неё характерно практически отсутствие древней коры выветривания, чьи остатки можно увидеть только на отдельных участках на западе полуострова. По исследованиям А.В. Сидоренко, кора выветривания сохранилась в Хибинах, в долине р. Туломы, в Печенгском и Ено-Ковдорском районах. Для примера, на отдельных вершинах бассейна реки Ена кора выветривания присутствует в виде супесчано-суглинистых «рухляков» мощностью до 5-20 м, а иногда до 40 м [6].

Четвертичные отложения представляю собой результат деятельности ледников верхнечетвертичного возраста: основной мореной, песчаными водно-ледниковыми отложениями, такие как зандры, озы, флювиогляцальные дельты; торфяниками, крупнообломочными элювиальными и делювиальными образованиями горных районов, песчано-глинистыми и морскими и озёрными отложениями. Подавляющее большинство – это валунные пески и супеси основной морены [6].

Развитие характерных форм рельефа обуславливается наличием в данном регионе соответствующего комплекса пород. Денудационные равнины слагаются архейскими гранитами и гнейсами. А мелкая пересечённость объясняется ледниково-аккумулятивными формами. Горно-сельговый рельеф, формирующийся в условиях осадочно-эффузивных пород, которые собраны в

складки, сложен коренными породами в определённом направлении. На залегающих горизонтально палеозойских осадочных породах образуются структурные плато, где наблюдаются эрозионные формы рельефа, они располагаются в восточной части полуострова. К молодым горным массивам можно отнести интрузии - Ловозёрские, Хибинские, Чунские, Вольчи, Сальные тундры [6].

В общем плане, кристаллический щит является базисом формирования геологического строения и развития рельефа Кольского полуострова. В его временной изменчивости выделяют два периода:

- а) Доледниковый, в течение которого сформировалась поверхность фундамента с котловинами озёр и крупными возвышенностями [6];
- б) Ледниковый и послеледниковый – периодами, когда главным фактором рельефообразования стала ледниковая эрозия, аккумуляция и последующая деятельность, а также образование послеледниковых водоёмов и морей [6].

На рисунке 1.1 представлена гипсометрическая карта Кольского полуострова.

Современный рельеф территории Кольского полуострова представляет из себя равнину с холмами, чья высота колеблется в интервале 200-300 м над уровнем моря. Тектонические формы рельефа (горы наибольших возвышенностей) есть в центре полуострова (Хибинские, Ловозерские, Сальные, Волчи, Чунские тундры, Монче-тундра). Высоты отдельных возвышенностей достигают 1-1.2 км (гора Часночор – 1191 м, Эбру-чорр – 1115 м, Аллуайв – 1057 м). В горных хребтах можно встретить глубокие впадины (грабены), заполненные озёрами (Имандра, Нот-озеро и др.), чья высотная амплитуда доходит до 500-600 м, и даже 1000 м (Рихтер, 1936 год). В основном, гористая местность является платом, где вершины сглаженные, а склоны вогнуты под большим углом (50-60 градусов) [6].

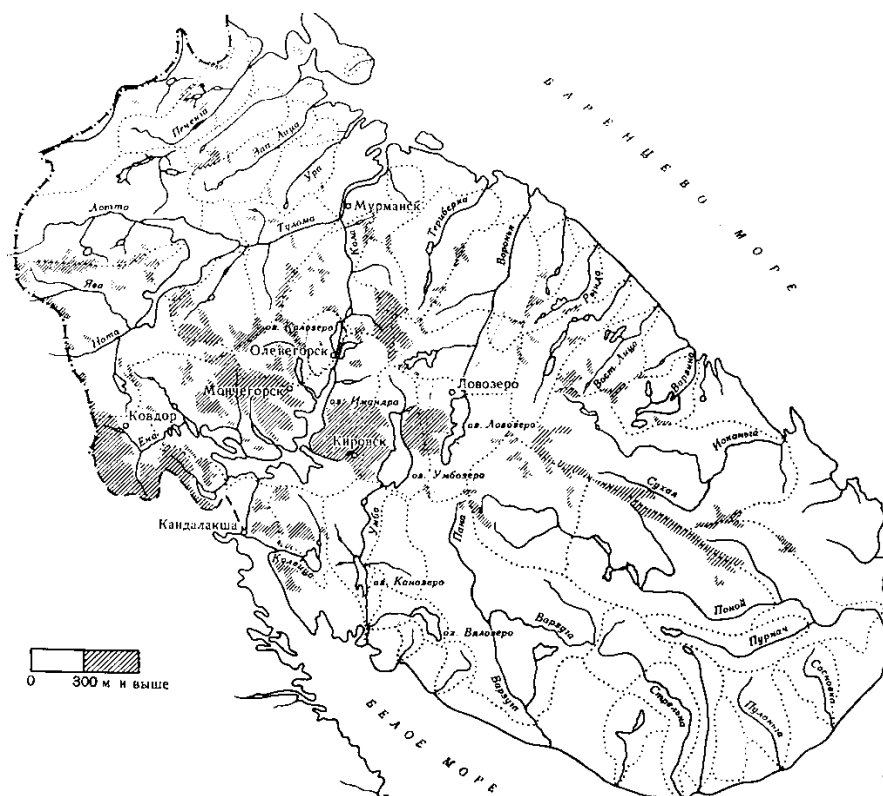


Рисунок 1.1 – Гипсометрическая карта Кольского полуострова [6].

На западе полуострова есть большой площади низменность – Нотозерско-Кольская депрессия, сильно заболочена с низкими холмами. Данная низина вытягивается вдоль Хибинских и ловозерских тундр, а далее переходит в центральный болотный массив, где верховья рек Поной и Варзуги [6].

### 1.3 Растительный покров

На территории Кольского полуострова выделяют две геоботанические зоны – тундровая и таёжная, между которыми простилаются полосы лесотундр. На возвышенностях – тундры. На территории полуострова выделяются четыре преобладающих типа растительности (рисунок 1.2) [6].

В процентном отношении, около 80 % территории занято таёжной зоной и лесотундрой, а остальная территория, при этом значительную площадь таёжной зоны занимают водоёмы [6].

В лесах выделяются три основных вида деревьев (в порядке уменьшения количества) ели, сосны и берёзы. Еловые и сосновые леса по площади пропорциональны друг-другу, причём, ель сосредоточена на востоке, а сосна – на западе и юге, и в обоих присутствуют берёзы [6].

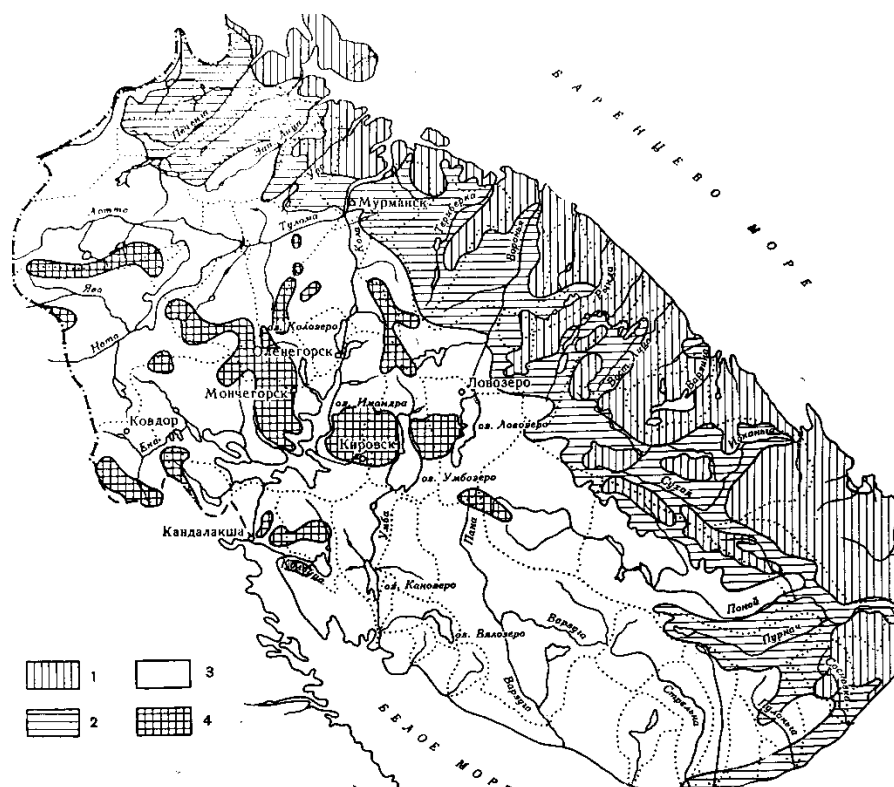


Рисунок 1.2 – Растительность Кольского полуострова; 1 – тундры; 2 – лесотундры; 3 – тайга; 4 – горные тундры [6].



## 1.4 Климат

На местный климат колоссальное влияние оказывает течение Гольфстрим. Из-за него не замерзает Баренцево море, а температура воздуха зимой на побережье примерно такая же, как и на территориях, которые на 10° южнее. Причём, термический режим южного побережья более суровый, чем северного, так как Белое море замерзает. По удалению в глубь полуострова влияние обоих морей исчезает [6].

Так как рельеф (подстилающая поверхность) и высота местности в большей степени влияют на климатообразующие факторы, в данной местности наблюдается зональность климата, а именно – в горах падение температуры и увеличение осадков, силы ветра и продолжительности наличия снежного покрова с увеличением высоты [6].

На Кольском полуострове зимы мягкие, а лето прохладное, что объясняется интенсивным ходом циклонов над Норвежским и Баренцевым морями и влиянием атлантических и арктических воздушных масс [6].

Принятой характерностью погоды на территории Кольского полуострова является её резкая изменчивость и крайняя неустойчивость из-за частой смены фронтов и воздушных масс [6].

На побережье зима продолжается с ноября по апрель, а в центральной части – с октября по апрель. Колебания среднемесячной температуры составляют от -2 до -14°C, и при этом наблюдается постоянный снежный покров с мощностью до нескольких десятков сантиметров. Частые метели с порывистыми ветрами, которые чаще всего имеют направление – ЮЗ [6].

Среднее количество осадков за холодный период составляет 100-200 мм, а наибольшие осадки выпадают в центральной части полуострова [6].

Переходными месяцами между сезонами выступают октябрь и май. Тёплый период длится с июня по сентябрь, в котором среднемесячная температура не превышает 14 °C. Часто заметны заморозки или похолодания [6].

## 1.5 Температура воздуха

Среднегодовая температура Кольского полуострова колеблется в интервале от  $-1^{\circ}\text{C}$  до  $2^{\circ}\text{C}$ . Январь и февраль – самые холодные месяцы в году, их средняя температура колеблется в интервале от  $-7^{\circ}\text{C}$  до  $-9^{\circ}\text{C}$  на побережье Баренцева моря, а на остальной части полуострова – от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-14^{\circ}\text{C}$  [6].

Минимумы за многолетний период приходятся на февраль ( $-28-36^{\circ}\text{C}$ ) на побережье Баренцева моря и  $40-50^{\circ}$  ниже нуля на остальной территории. В горной местности минимумы достигают  $-30-32^{\circ}\text{C}$  [6].

Максимумы за многолетний период приходятся на июль ( $30-33^{\circ}\text{C}$ ) на побережье, а в горной местности –  $26-29^{\circ}\text{C}$  [6].

Начало весны приходится на третью декаду апреля, но фиксируются возвраты холодов, даже с выпадением твёрдых осадков [6].

В тёплое время, если вторгаются арктические воздушные массы, температура понижается до заморозков [6].

Понижение температуры начинается в конце августа, а в третьей декаде сентября происходит переход температуры через  $5^{\circ}\text{C}$ , потому заморозки в сентябре приняты нормальным явлением [6].

Осень затяжная с частыми дождями. В середине октября температура переходит через  $0^{\circ}\text{C}$ . С этого же времени может начать устанавливаться снежный покров. Но также могут быть и оттепели [6].

В горах с увеличением высоты все даты весной запаздывают примерно на 2-3 дня на каждые 100 м подъёма, а осенью на столько же опережают [6].

## 1.6 Осадки

Из-за северного расположения полуострова он относится к зоне избыточного увлажнения. Среднегодовое количество осадков достигает 550-600 мм, при наибольших осадках в 1м и более в горной местности [6].

Распределение осадков неравномерно из-за гор и возвышенностей [6].

Наименьшее количество осадков выпадает в марте, в горах – в апреле; наибольшее – в августе, в горах – в сентябре [6].

Вертикальный градиент годового количества осадков составляет 100 мм на 100 м подъёма [6].

Атмосферные осадки характеризуются значительной изменчивостью по годам. Годовые суммы их колеблются в пределах 65-150 % средней многолетней величины, а месячные – от 20 до 300 % [6].

За год выпадает примерно одинаковое количество твёрдых и жидких осадков, от 38 до 49 %; смешанные осадки в виде дождя с мокрым снегом составляют 12-14 % годового количества осадков [6].

## 1.7 Снежный покров

В среднем за многолетний период наблюдений снежный покров устанавливается в начале ноября, а в горной местности с повышением высоты на каждые 100 м покров появляется раньше на 3-4 дня [6].

Разрушение покрова происходит в первой декаде мая, но на каждые 100 м высоты происходит запаздывание на 3-4 дня [6].

Самое раннее появление покрова в горах возможно в августе, а при холодах – и в июле [6].

Наибольшие влагозапасы накапливаются между мартом и апрелем. В этот период высота снега может достигать 60-80 см, и даже доходить до 1 м и более, при максимальной плотности в 0.2-0.26. Запасы воды при этом составляют 120-180 мм в лесах, а в поле – 100-160 мм [6].

В горной местности снегозапасы больше, могут достигать 150-250 см при плотности 0.3-0.4 и выше, влагозапас 300-600 мм [6].

## 1.8 Описание поста

Гидрологический пост р. Кола - 1429-ый км Октябрьской ж. д. под кодом 71104 относится к водохозяйственному участку реки Кола, включая оз. Колозеро - Бассейну рек Кольского полуострова, впадающих в Баренцево море (российская часть бассейнов), Баренцево-беломорский бассейновый округ [1].

Расположен в 8 км от устья реки Кола и описывает водосбор площадью 3780 км<sup>2</sup>. Высота над уровнем моря 23.53 м БС. Принадлежит Мурманскому УГМС, был открыт 18 октября 1927 года, и действует по сей день [1].

Водосбор реки Кола для данного поста представлен на рисунке 1.3.

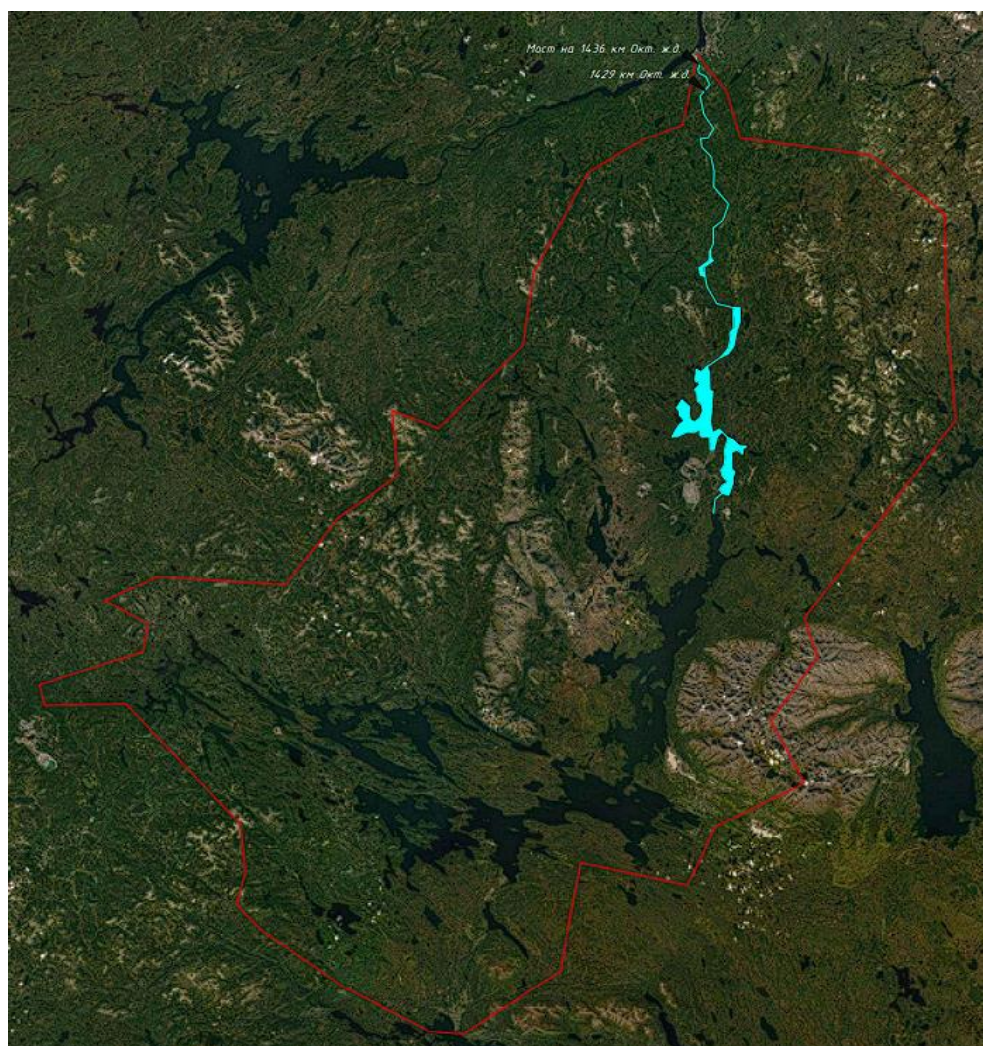


Рисунок 1.3 – Водосбор реки Кола с изображением самой реки истоком реки – озером Колозеро.

## 2 ВОДНЫЙ РЕЖИМ Р. КОЛА

### 2.1 Гидрометеорологическая изученность

Реки Кольского полуострова принадлежат к бассейнам двух морей – Баренцева и Белого, водораздел которых пролегает с запада на восток от границы с Финляндией до Белого моря по Сальным, Хибинским и Ловозерским тундрам, а также по горной гряде Кейвы [6].

Большинство речных долин рек Кольского полуострова узкие и препятствуют развитию меандр в следствие наличия твёрдых кристаллических пород в составе их рельефа. Часто форма долин V-образная или каньонообразная, следуя направлениям горных разломов. Частые стремнины, пороги, водопады чередуются с участками спокойного течения – плёсами. Множество рек текут сквозь водоёмы, которые образовались в горных разломах [6].

Речные поймы редки, но они наиболее развиты в центральной части на равнинных участках, пока в других частях полуострова наблюдается односторонняя прерывистая пойма. Потому, основной тип руслового процесса рек Кольского полуострова – немеандрирующие [6].

В процессе прорезания пути рекой за долгое время сформировались участки с порогами и перекатами. Продольные профили крупных рек, которые впадают непосредственно в море, характеризуются сглаженными изменениями отметок русла в верхнем и среднем течении, и резкими перепадами в нижнем и приустьевом течениях [6].

Все реки, в условиях рельефа Кольского полуострова, делятся на полуравнинные, горные и реки озёрного типа. Полуравнинные протекают по плоским не сильно расчленённым равнинным участкам. Яркие примеры таких рек – Поной, Варзуга, Стрельна. Горные реки – малые, но стремительные водотоки, с большим количеством порогов, истоки которых находится на



возвышенностях. Характерным примером таких является река Малая Белая [6].

Самые распространённые реки Кольского полуострова – озёрного типа. На своём пути они проходят через водоёмы, при этом формируя пороги и водопады. Данный тип рек принимает воду с больших территорий [6].

Основные гидрографические характеристики р. Кола приведены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1 – Основные гидрографические характеристики р. Кола [6]

Средняя высота водосбора, м	220
Средний уклон реки, ‰	2.6
Озёрность, %	6
Заболоченность, %	15
Залесённость, %	55

Водный режим реки характеризуется её средним и максимальным многолетним стоком. Среднегодовой сток показывает, какой объём воды в среднем за год прошёл через данный створ. Максимальный сток характеризует объём половодий и паводков.

Гистограмма внутригодового многолетнего распределения среднемесячного среднего и максимального стока представлена в рисунок 2.1.

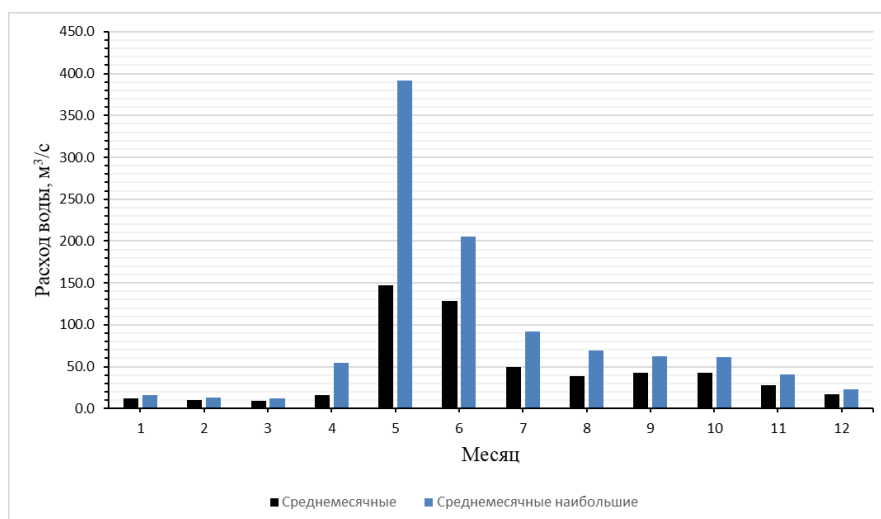


Рисунок 2.1 – Гистограмма внутригодового многолетнего распределения среднемесячного среднего и максимального стока р. Кола – 1429 км

Октябрьской ж. д.

## 2.2 Максимальные расходы воды

На территории Кольского полуострова наблюдения за максимальным стоком велись с 1965 по 1994 год, и возобновились только с 2008. По этой причине в ряде значений максимальных расходов отсутствуют данные с 1995 по 2007 год. При этом, данные с 1965 по 1980 год – это зафиксированные максимумы половодий.

Таблица 2.2 – Максимальные расходы воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж .  
д [1, 2, 3, 4].

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Макс.
1965													389
1966													667
1967													405
1968													462
1969													588
1970													163
1971													518
1972													580
1973													332
1974													462
1975													690
1976													343
1977													571
1978													545
1979													442
1980													442
1981	13	13.2	9.31	8.3	753	278	217	74	58.7	75.2	31.4	20.1	753
1982	15.3	10.3	10.5	19.1	548	312	123	58.6	55.4	53.1	26.4	18.8	548
1983	15.7	12.8	11.7	17.0	339	124	59	49	43	78.5	33.8	24.8	339
1984	18	12.7	11	17.2	807	137	223	150	43.2	31.7	21.4	13.8	807
1985	11.2	9.59	8.4	10.5	101		43.2	28	72.8	66.8	44.2	22.9	101
1986	15.3	13.2	11.6	20.5	447	161	48	44.1	38.5	69.7	69.7	21.1	447
1987	13.9	10.5	10.9	13.7	511	82.9	101	53	111	39.4	31.2	16.7	511
1988	13.5	11	11.9	12.5	387	148	37.8	129	53.8	55.9	37.8	29.5	387



Продолжение таблицы 2.2

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Макс.
1989	18.2	16.2	14.5	242	430	256	143	88.7	91.4	54.8	52.8	32.7	430
1990	21.7	15.4	17	270	262	138	70.5	50	55.9	54.8	33.4	21.8	270
1991	16.9	15.5	16	35.1	217	197	66.1	46	108	105	40	23.9	217
1992	21	20.8	18.4	30.7	317	135	97	118	84.6	55.9	19.6	18.1	317
1993	15.7	15.6	12.6	21.7	467	206	98.4	45.2	37.8	45.2	19.8	16.4	467
1994	9.5	9.18	8.82	41.4	244	138	58	31.2	30.5	50.9	27.5	20.7	244
1995													
1996													
1997													
1998													
1999													
2000													
2001													
2002													
2003													
2004													
2005													
2006													
2007													
2008	27.3	18	15.1	16.3	195	214	120	82.5	52.1	64.7	49.4	22.9	214
2009	21.1	14.7	10.6	22.2	256	183	58.8	63.5	66	52.1	23.1	16.2	256
2010	10.2	7.67	9.66	23.8	496	87.9	96.3	117	77.2	113	65.2	24.9	496
2011	17.7	13.8	12.8	56.9	398	186	69.6	111	119	85.1	101	43.4	398
2012	23.4	12.4	12.2	36.1	328	183	181	77.2	46.8	105	41.6	24.9	328
2013	14.9	14	12.1	95.6	308	93.5	43.7	25.2	22.2	33.2	31.7	15.2	308
2014	14	10.6	10.7	35.3	580	201	68.4	55.5	33.2	35	38.2	19.6	580
2015	15.4	11.5	10.9	18.5	286	119	63.5	94.9	35.9	42.7	43.7	20	286
2016	14.4	12.8	10.7	91.9	317	105	49.1	70.4	95	50	35.9	25.5	317
2017	22.5	18.3	15.2	13.4	179	479	157	99.2	97.8	53.1	39.7	22.5	479
2018	15.6	12.2	10.3	19.8	333	93.5	55.5	25.2	25.9	24.4	34.7	25.7	333
2019	12.9	9.73	9.33	110	328	173	75.9	37.7	53.2	79.9	32.1	23.7	328
2020	17.7	16.8	15.5	15.3	736	901	73.3	44.7	67.2	90.3	83.4	36.7	901
Средн.	16.5	13.3	12.1	54.4	391	205	92.5	69.2	62.1	61.7	41.1	23.1	434
Наиб.	27.3	20.8	18.4	270	807	901	223	150	119	113	101	43.4	901
Наим.	9.50	7.67	8.40	8.30	101	82.9	37.8	25.2	22.2	24.4	19.6	13.8	101

Хронологический график максимальных расходов воды представлен в рисунке 2.2.

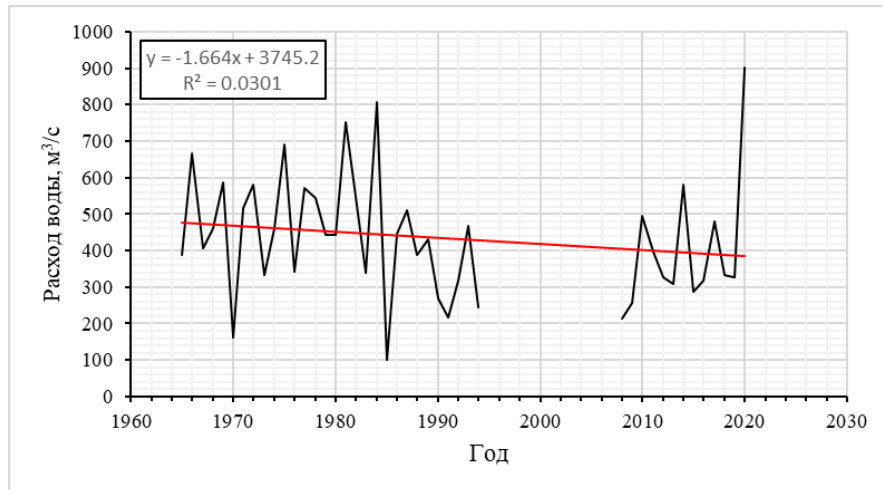


Рисунок 2.2 – Хронологический график максимальных расходов воды.

Для того, чтобы произвести дальнейшие расчёты по деформациям русла реки Кола, необходимо произвести статистическую обработку ряда данных максимальных расходов воды.

Статистическая обработка включает в себя расчёт основных статистических характеристик ряда (количество значений, среднее, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии, отношение коэффициента вариации к коэффициенту асимметрии и их относительные ошибки), а также проверка ряда на наличие тренда и проверить гипотезу об однородности ряда по критериям Фишера и Стьюдента.

Оценка значимости линейного тренда проводится с использованием критерия значимости выборочного коэффициента корреляции ( $R$ ). Тренд считается статистически незначимым, если выполняется условие:

$$\frac{|R|}{\sigma_R} \geq t_{2a},$$

где  $|R|$  – модуль коэффициента корреляции ряда;

$\sigma_R$  – стандартная ошибка коэффициента корреляции;

$t_{2a}$  – статистика Стьюдента при уровне значимости  $2a = 5\%$ .

Результаты оценки значимости линейного тренда ряда среднегодовых расходов реки Кола приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Оценка ряда максимальных расходов воды реки Кола на наличие тренда

Ряд значений	$R$	$\sigma_R$	$R/\sigma_R$	$t_{2\alpha}$	Вывод
Максимальные расходы	0.173	0.150	1.16	2.02	Тренд не значим

Проверка рядов на однородность проводится с использованием критериев Фишера и Стьюдента. Проверка проводится при уровне значимости  $2\alpha = 5\%$ . Гипотеза об однородности рядов не опровергается, если выполняются следующие условия:

$$F^* < F_{2\alpha},$$

$$t^* < t_{2\alpha}.$$

где  $F^*$  и  $t^*$  – эмпирические значения статистик Фишера и Стьюдента, соответственно;

$F_{2\alpha}$  и  $t_{2\alpha}$  – теоретические значения статистик Фишера и Стьюдента, соответственно, при уровне  $2\alpha = 5\%$ .

В работе для проверки однородности рядов была использована надстройка *Microsoft Excel* «Пакет анализа».

Результаты проверки ряда максимальных расходов реки Кола на однородность по критериям Фишера и Стьюдента приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты проверки ряда максимальных расходов реки Кола на однородность по критериям Фишера и Стьюдента

Ряд значений	$t^*$	$t_{2\alpha}$	Вывод	$F^*$	$F_{2\alpha}$	Вывод
Максимальные расходы	2.02	1.08	Не однороден	2.4	1.08	Не однороден

В соответствии с рекомендациями нормативного документа СП 33-101-2003 необходимо рассчитать обеспеченные значения максимальных расходов воды.

Рассчитанные значения основных статистических характеристик приведены в таблице 2.5

Таблица 2.5 – Основные статистические характеристики ряда максимальных расходов воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д.

Река – створ	$n$	$Q_{\text{ср}}, \text{м}^3/\text{с}$	$C_v$	$C_s$	$C_s/C_v$	$\varepsilon_Q, \%$	$\varepsilon_{C_v}, \%$	$\varepsilon_{C_s}, \%$
р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д.	43	440	0.38	0.76	2	5.79	11.54	52.58

Так как ряд является неоднородным, в качестве расчётной была выбрана усечённая кривая обеспеченностей двухпараметрического  $\Gamma$ -распределения.

Расчётные ординаты аналитической кривой приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Ординаты усечённой аналитической кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля максимальных расходов воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д. с использованием двухпараметрического  $\Gamma$ -распределения максимальных расходов воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д.;  $Q_{\text{ср}} = 440$ ,  $C_v = 0.38$ ,  $C_s/C_v = 2$ .

$P, \%$	0.01	0.1	1	5	10	25	50
$k_p$	3.06	2.60	2.09	1.70	1.51	1.22	0.98
$Q_p$	1350	1140	920	748	665	537	432

Эмпирическая и аналитическая кривые максимальных расходов воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д. приведены в Приложении А.

На клетчатке вероятности в ряде значений эмпирических точек наблюдается отклонение наибольших эмпирических значений от аппроксимирующей кривой. В таких случаях для наибольшего члена ряда следует указать границы доверительного интервала ежегодной вероятности превышения (5 и 95 %) в зависимости от количества членов ряда.

Ряд максимальных расходов включает в себя 43 значения, тогда левая и правая границы доверительного интервала имеют обеспеченность 0.14 и 7.2 %,

соответственно (Приложение Б, таблица Б.3 – СП 33-101-2003).

Аналитическая кривая укладывается в данный доверительный интервал.

## 2.3 Характерные расходы воды

Таблица 2.7 – Среднемесячные расходы воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж.  
д [1, 2, 3, 4].

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сред.
1928	9.5	6.5	0.9	7.3	84.2	135	43.1	22.1	22.9	21.1	15.1	11.6	31.6
1929	8.5	5.8	4.65	4.35	184	161	52.8	43.8	43.1	64.5	33	14.9	51.7
1930	9.7	5.95	3.81	5.31	175	70	20.6	21.7	29.4	44.6	40	17.8	37.0
1931	12.4	8.7	7.3	15.9	128	163	54.4	67.7	56.4	35.8	22.6	17.4	49.1
1932	16.1	1	13.6	15.5	62.8	165	96.9	77.1	81.1	72.9	33.9	19.6	54.6
1933	17	14.3	13.3	12.5	60.1	186	40.1	38.2	24.5	24.6	17.4	13.4	38.5
1934	10.4	8.67	7.47	6.4	196	60.5	45.7	21.4	28.7	23.6	28.8	15.7	37.8
1935	13	12	11.7	13	72.3	231	39.6	36.6	21.3	30.2	26	13.7	43.4
1936	13.7	14.1	12	13.8	130	27.6	15.6	26.3	55.9	33.3	40.7	17.9	33.4
1937	12.4	9.87	10.4	27.3	61.6	42.3	17.3	9.57	18.1	26.1	17.7	10.4	21.9
1938	7.57	6.43	6.4	7.91	83.6	134	58.6	38	25.1	20.8	18.7	13.3	35.0
1939	8.6	7.56	6.78	7.62	67.3	134	34.9	32.4	23.8	23.1	19	13.2	31.5
1940	11.8	9.21	8.21	7.46	154	54.9	65.6	84.3	58.5	28	17.6	14.2	42.8
1941	14.3	12.6	11.5	9.99	34.5	193	37.7	19	24.6	34	15.6	11.1	34.8
1942	9.77	9	7.59	10.4	104	226	25	19.3	46.8	42	15.8	11.2	43.9
1943	9.35	9.02	8.02	8.19	190	104	31.7	61.4	53.4	75.9	25.1	20.1	49.7
1944	17	13.8	11.1	12.1	136	190	32.9	35.7	54.2	31.5	20	12.5	47.2
1945	10.6	9.76	7.22	7.48	61	144	38.8	15.6	22.2	30.2	17.7	9.31	31.2
1946	6.89	6.38	5.3	4.98	79.5	113	29.4	30.7	35.1	22.5	20.9	15.3	30.8
1947	8.65	4.95	4.04	10.4	128	87.3	42.1	30.9	27.9	37.1	31	16.2	35.7
1948	11.5	10.5	11.6	22.9	221	93	24.2	22.5	47.8	68	35	28.4	49.7
1949	20.6	15.3	12.7	24.6	217	115	54.3	51.5	41.5	78.1	56.5	16.4	58.6
1950	9.21	9.48	8.75	33.7	104	53.1	31.2	14	36.8	44.7	18.5	13.2	31.4
1951	8.93	7.94	7.2	16.2	79.2	110	97.3	36.6	39	34.1	21.5	15.5	39.5
1952	13.9	10.1	8.41	9.85	104	153	32.3	63.3	46.4	33.5	14.2	12.2	41.8
1953	11.1	9.69	9.68	16.4	228	84.8	17.8	25.8	32.5	22.8	21.5	13.9	41.2
1954	7.09	6.13	5.14	7.72	128	68.5	61.7	37.7	57.3	58.5	24	17.9	40.0
1955	13	11.7	10.4	8.85	123	174	60.5	27.2	24.2	26.4	19.5	12	42.6
1956	6.68	6.04	5.26	5.08	126	94.9	22.2	20.2	28.5	52.9	15.6	10.4	32.8
1957	8.64	8.17	7.93	12.4	191	174	56.7	24.2	52.5	37.9	39.4	18.9	52.6
1958	11.7	8.22	7.97	8.61	41	249	118	41.6	32.3	37.9	27.2	15.6	49.9
1959	10.9	10.2	10	10.2	178	40.8	28.3	32	81.5	75.7	36.3	12.3	43.9
1960	7.85	7.05	6.72	61.4	83	46.6	16.3	11.7	19.5	14.3	9.37	8.12	24.3
1961	7.88	7.18	8.55	8.58	57.3	259	44.6	24.3	36.7	31.1	31	12.9	44.1
1962	11	8.43	5.36	11.6	144	85.2	43.1	54.3	46	27.7	30.9	18.3	40.5
1963	13.5	10.4	5.81	7.63	230	77.2	43.6	31.2	51.6	62	31	20	48.7

Продолжение таблицы 2.7

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сред.
1964	17.9	11.6	8.84	8.55	216	132	40	21	65.5	56.5	31	16.7	52.1
1965	9.59	7.85	7.52	23.9	78.2	199	69.8	63.4	56.4	54.4	37.8	16.2	52.0
1966	11.2	9.45	8.79	8.79	165	69.5	59.5	30.3	41.8	61.8	36	18.2	43.4
1967	13	14.4	11.3	19.9	164	112	39.9	31.2	26.6	42.3	73.6	21.7	47.5
1968	15.7	11.8	9.41	7.84	41.6	190	37.3	57.7	30	36.6	25.6	21.2	40.4
1969	12.8	8.61	7.73	7.83	33	255	53.8	26.2	48.3	47.5	18.5	10.9	44.2
1970	10.1	11.2	9.85	9.32	81.5	78.4	22.8	13.4	32.1	60.3	19.8	13.7	30.2
1971	10.1	8.96	7.38	7.89	55.1	184	59.9	52.4	171	59.8	29.4	20.1	55.5
1972	14.3	11.4	10.9	11.8	132	125	27.1	22.4	49.4	47.4	23.8	18.7	41.2
1973	14.8	12.2	11	10.7	146	99.4	34.9	16.4	22	22.7	23.1	16.6	35.8
1974	14.2	13.1	12.3	14.9	104	217	43.9	64.9	81.1	69.2	25.1	18.1	56.5
1975	16.1	14.5	13	14.2	259	114	98.6	63.8	47.2	63.8	39.5	22.2	63.8
1976	17.4	14.2	11.8	14.1	173	64.2	46.8	28.3	29.3	25.8	16.9	14	38.0
1977	10	8.86	8.77	9.28	183	157	80.7	51.6	38.9	31.1	32	19	52.5
1978	13.9	12	10.4	10.5	150	116	55	44.5	70.2	57.1	34.3	15.1	49.1
1979	13.4	10.5	7.24	9.33	217	107	30.8	33.3	37.2	39	17	13.4	44.6
1980	12.9	10	9.36	9.56	89.9	175	24.4	19	22.5	28.2	16.8	14.4	36.0
1981	12.8	11	7.57	7.25	167	198	108	48.8	45.4	54.8	25.1	17.7	58.6
1982	13.4	8.69	8.78	12.2	217	191	91.5	39.8	46.3	35.2	22.7	17.2	58.6
1983	14.1	11.5	11.1	41.4	169	86.5	32	30.6	32.2	57.2	32.2	20.6	44.9
1984	14.6	12.1	10.5	11.1	283	59.9	141	60.3	33.9	25.8	18.2	12.7	56.9
1985	10.5	8.94	8.06	8.99	47.5	120	23.9	19	41.4	57.1	34.8	19.2	33.3
1986	14.4	12.2	11.2	12.5	176	86.3	31.8	28.3	29.3	50.1	35.4	17.5	42.1
1987	11.3	10.3	10.8	11	137	54.2	63	37.6	64.8	30.4	29.9	14.5	39.6
1988	12.3	10.5	11.4	11.7	132	81.1	25.7	60	38.6	46	32.4	23.3	40.4
1989	16.9	15	14.1	37.6	263	118	88.1	54.5	54.2	35.3	36.5	27.1	63.4
1990	17.8	14.9	15.8	67	135	77.1	50.2	39.1	29.7	37	25.3	18.7	44.0
1991	16.1	15	14.4	25.9	108	119	44.5	28.6	68.9	63.1	30.3	22.7	46.4
1992	18.1	20.1	18	15.9	186	71.7	70	72.3	63.1	38	18.2	17	50.7
1993	15.2	14.6	11.5	11.4	214	147	60.7	32.7	28.3	26.8	18.1	12.2	49.4
1994	9.21	8.9	8.72	14.7	128	91.8	33.6	26.6	26.8	25.2	24.2	17.8	34.6
1995													
1996													
1997													
1998													
1999													
2000													
2001													
2002													
2003													
2004													

Продолжение таблицы 2.7

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сред.
2005													
2006													
2007													
2008	20.4	16.3	13.9	13.5	123	159	94.7	53.3	40.3	46.2	31.3	20.9	52.7
2009	18.7	11.6	9.15	14.0	191	114	47.8	47.1	47.2	29.6	19.3	13.3	46.8
2010	8.13	6.89	7.93	17.2	251	57.8	70.1	95.6	42.0	76.0	38.5	20.7	57.6
2011	15.5	13.1	11.5	19.5	218	126	47.9	64.1	82.8	64.9	64.1	32.4	63.3
2012	18.6	11.1	11.1	17.6	176	109	107	53.3	27.8	61.2	31.7	19.6	53.6
2013	14.0	13.1	11.0	35.6	191	61.3	25.4	17.2	17.0	26.2	19.6	13.9	37.1
2014	11.1	10.1	10.4	12.5	322	137	40.2	34.2	25.0	23.4	26.9	16.3	55.7
2015	12.1	10.9	10.1	14.6	181	101	40.3	45.3	30.4	38.4	26.6	16.7	43.9
2016	10.3	11.5	10.0	41.7	187	78.2	40.6	56.6	69.4	37.6	23.9	20.9	49.0
2017	19.4	15.5	14.0	12.0	117	288	102	50.7	58.2	46.1	31.7	17.8	64.4
2018	13.1	11.0	10.0	14.5	218	69.9	23.7	19.8	20.6	20.6	25.6	18.7	38.8
2019	11.4	8.37	8.25	66.7	173	125	46.9	34.7	28.7	56.3	26.8	20.4	50.6
2020	16.2	15.9	14.4	12.6	355	426	47.2	28.7	36.5	51.0	58.5	21.5	90.3
Сред.	12.7	10.5	9.53	15.7	147	128	50.0	38.4	42.8	42.4	27.7	16.7	45.2
Наиб.	20.6	20.1	18.0	67.0	355	426	141	95.6	171	78.1	73.6	32.4	90.3
Наим.	6.68	1.00	0.90	4.35	33.0	27.6	15.6	9.57	17.0	14.3	9.37	8.12	21.9

Хронологический график среднегодовых расходов воды представлен в рисунке 2.3.

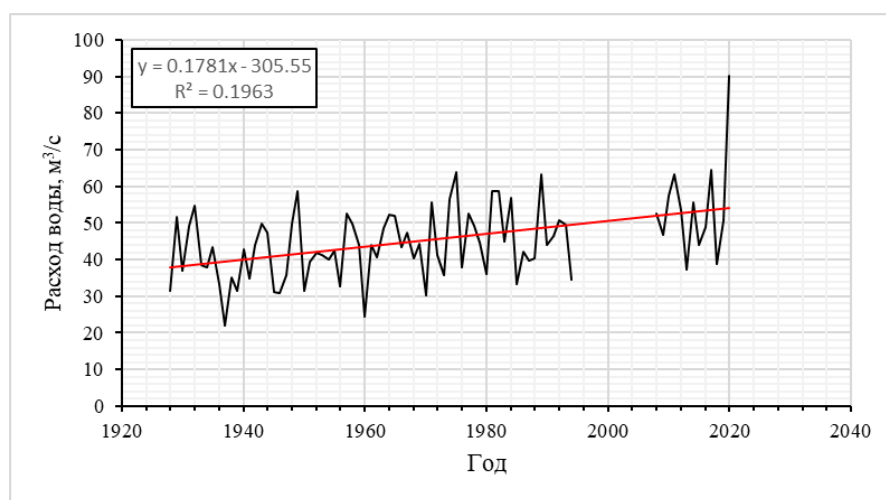


Рисунок 2.3 – Хронологический график среднегодовых расходов воды р. Кола – ст. 1429 км Октябрьской ж. д.



Результаты оценка значимости линейного тренда ряда среднегодовых расходов реки Кола приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Оценка ряда максимальных расходов воды реки Кола на наличие тренда

Ряд значений	$R$	$\sigma_R$	$R/\sigma_R$	$t_{2a}$	Вывод
Среднегодовые расходы	0.443	0.09	4.9	1.99	Тренд значим

Результаты проверки ряда среднегодовых расходов реки Кола на однородность по критериям Фишера и Стьюдента приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты проверки ряда среднегодовых расходов реки Кола на однородность по критериям Фишера и Стьюдента

Ряд значений	$t^*$	$t_{2a}$	Вывод	$F^*$	$F_{2a}$	Вывод
Максимальные расходы	1.99	-3.96	Не однороден	1.88	1.83	Не однороден

Рассчитанные значения основных статистических характеристик приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Основные статистические характеристики ряда среднегодовых расходов воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д.

Река – створ	$n$	$Q_{cp}, \text{ м}^3/\text{с}$	$C_v$	$C_s$	$C_s/C_v$	$\varepsilon_Q, \%$	$\varepsilon_{C_v}, \%$	$\varepsilon_{C_s}, \%$
р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д.	80	45.2	0.24	0.90	4	2.64	8.12	31.35

Расчётные ординаты аналитической кривой приведены в таблице 2.11

Таблица 2.11 – Ординаты аналитической кривой обеспеченностей Крицкого-Менкеля среднегодовых расходов воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д.  $Q_{cp} = 45.4$ ,  $C_v = 0.24$ ,  $C_s/C_v = 4$ .

$P, \%$	0.01	0.1	1	5	10	25	50	75	90	95	99	99.9
$k_p$	2.54	2.12	1.71	1.43	1.31	1.13	0.97	0.83	0.73	0.68	0.59	0.51
$Q_p$	115	95.6	77.3	64.7	59.0	51.2	43.6	37.6	33.1	30.7	26.8	23.2

Эмпирическая и аналитическая кривые среднегодовых расходов воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д. приведены в Приложении Б.

На клетчатке вероятности в ряде значений эмпирических точек наблюдается выброс максимального расхода. В таких случаях для наибольшего члена ряда следует указать границы доверительного интервала ежегодной вероятности превышения (5 и 95 %) в зависимости от количества членов ряда.

Ряд среднегодовых расходов включает в себя 80 значений, тогда левая и правая границы доверительного интервала имеют обеспеченность 0.07 и 3.7 % соответственно (Приложение Б, таблица Б.3 – СП 33-101-2003).

Аналитическая кривая укладывается в данный доверительный интервал.

## 3 РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

### 3.1 Типизация руслового процесса

Русловой процесс – комплексное взаимное влияние друг на друга рельефа, его особенностей и геологического строения, и потока воды в реке. Структура русла реки является формирующим параметром для скоростного поля потока, а оно в свою очередь формирует условия для развития или затухания деформаций русла. Иными словами, русловой процесс – это изменения в морфологическом строении русла и поймы, происходящие под действием текущей воды.

Русловой процесс имеет дискретность по своему проявлению. Согласно типизации ГГИ русловой процесс делится на 7 типов:

- а) ленточнорядовой;
- б) побочневый;
- в) ограниченное меандрирование;
- г) свободное меандрирование;
- д) незавершённое меандрирование;
- е) пойменная многорукавность;
- ж) осередковый тип, или русловая многорукавность [9].

Наглядное изображение перечисленных типов руслового процесса представлены на рисунке 3.1.

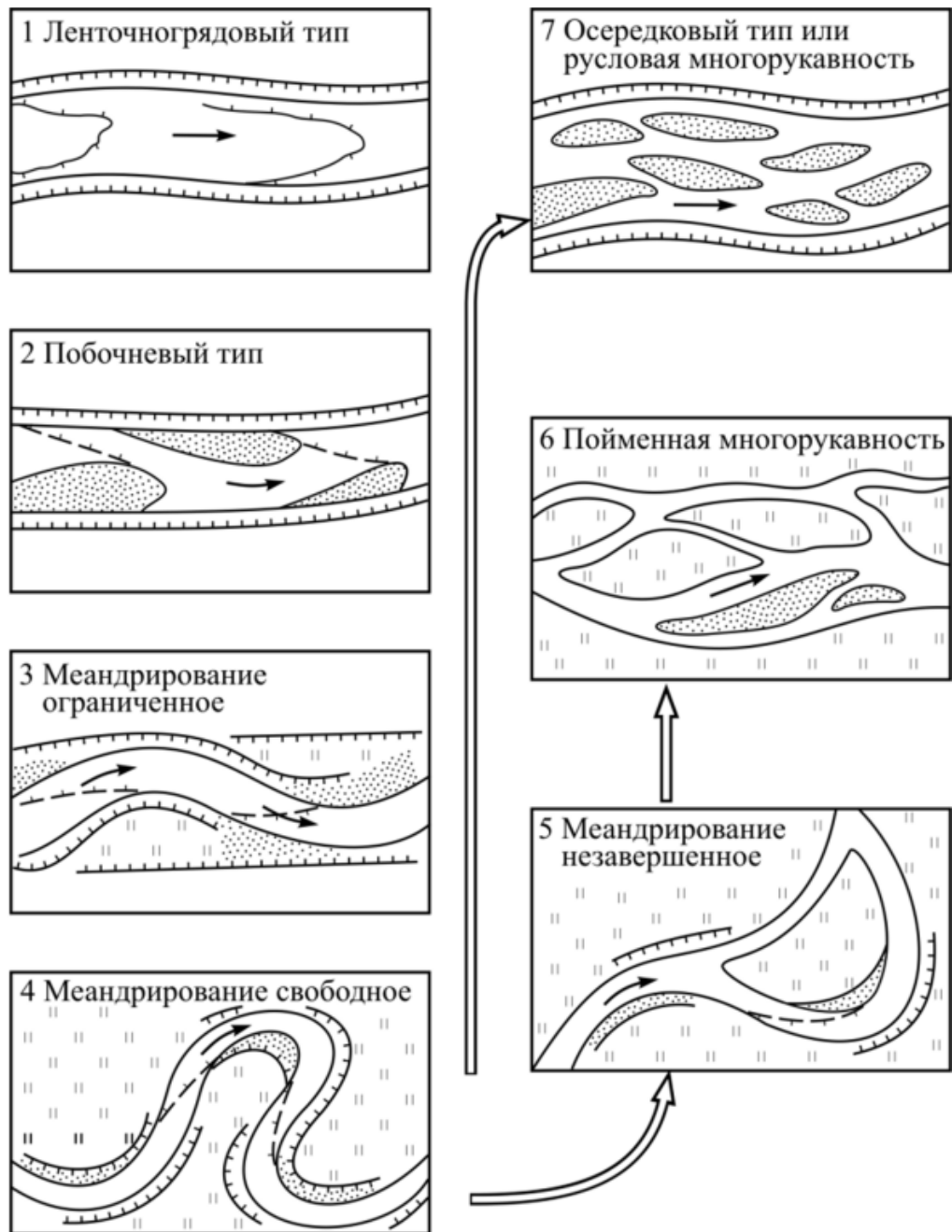


Рисунок 3.1 – Классификация руслового процесса по ГГИ.

### 3.2 Спутниковые снимки и описание ситуации на реке

На рисунке 3.2 представлена карта распределения типов руслового процесса на территории Кольского полуострова.

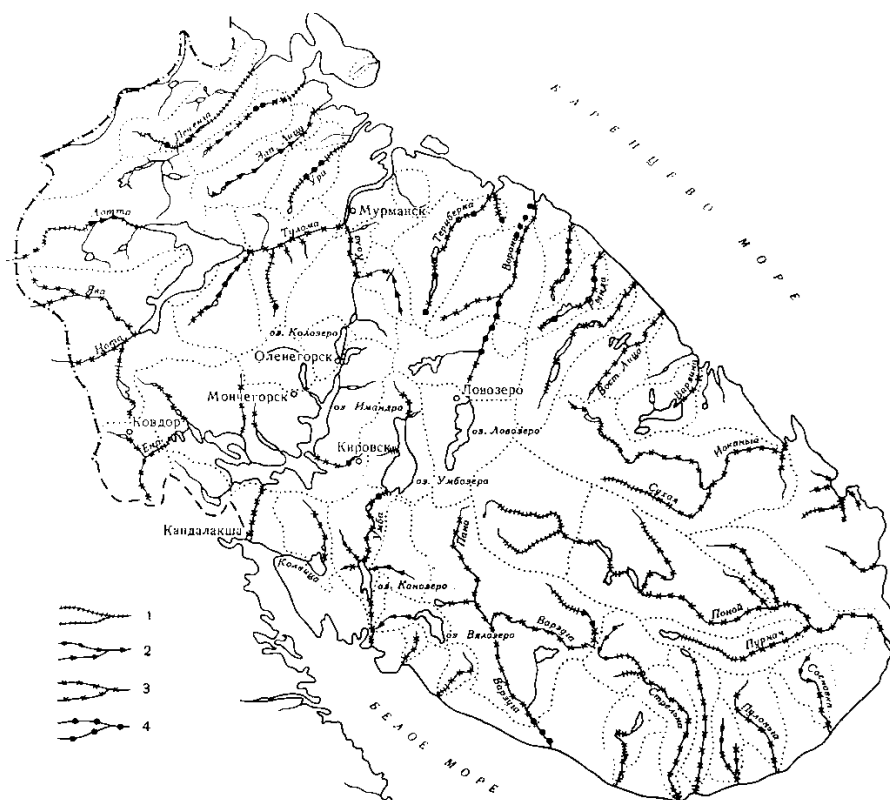


Рисунок 3.2 – Распределение типов руслового процесса на территории Кольского полуострова; 1 – свободное меандрирование; 2 – ограниченное меандрирование; 3 – немеандрирующее русло; 4 – русловая многорукавность [6].

Река берёт начало из оз. Колозеро. Через 4 км она впадает в оз. Пулозеро, на 23-ем км впадает в оз. Мурдозеро, а уже за городом Кола впадает в Кольский залив Баренцева моря.

Морфометрические характеристики реки Кола представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Морфометрические характеристики р. Кола

Длина реки $L$ , км	83
Коэффициент извилистости $K_{изв}$	1.33
Площадь водосбора $F$ , км <sup>2</sup>	3780
Средняя ширина водосбора $B$ , км	45.54
Густота речной сети $D$ , км <sup>-1</sup>	0.093

Спутниковый снимок реки Кола, помеченной красной линией, от озера Колозеро до устья представлен на рисунке 3.3

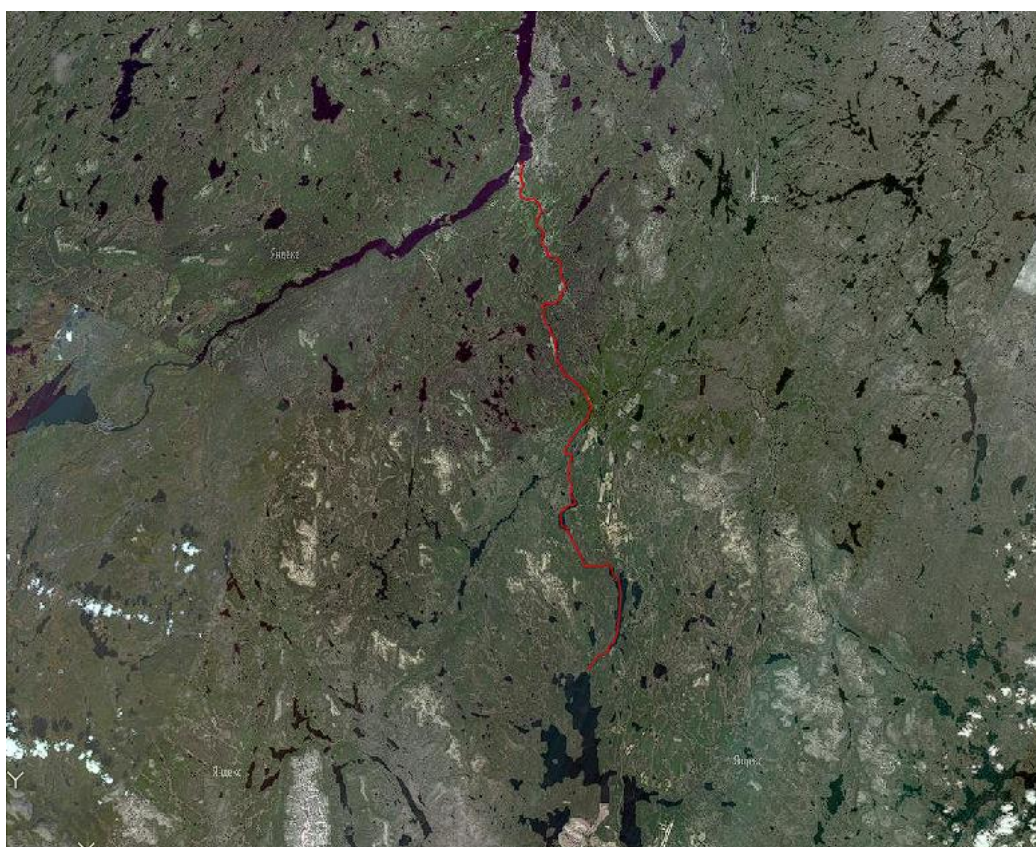


Рисунок 3.2 – Спутниковый снимок реки Кола, помеченной красной линией, от озера Колозеро до устья.



Поскольку река протекает по ложбинообразной долине, сложенной высокими холмами из кристаллического фундамента, русло не меандрирует, а основные деформации происходят в самом русле под влиянием потока воды на протяжении долгого времени.

Спутниковый снимок более крупного масштаба с изображением русла реки Кола выше и ниже по течению мостового перехода представлен на рисунке 3.4.

На рисунке 3.4 отчетливо видны пороги длиной в 100-500 м, чередующиеся с участками спокойного течения. Очевидна взаимосвязь наличия порогов с изгибом русла, так как они есть на участках, где река совершает поворот (или сужение, ниже моста по течению). Ниже моста практически не наблюдается спокойных участков течения вплоть до устья.



Рисунок 3.4 – Спутниковый снимок более крупного масштаба с изображением русла реки Кола выше и ниже по течению мостового перехода.



Рисунок 3.5 – План мостового перехода.

На рисунке 3.5 представлен спутниковый снимок мостового перехода после возведения нового моста, не имеющего несущих опор в русле реки. Кроме того, обновлены струенаправляющие дамбы на правом берегу, они имеют больший угол относительно потока, чем прежние. Они обеспечивают устойчивость к размыву правого берега и сохранению целостности грунта у несущих опор моста.

Вблизи створе моста наблюдается сужение потока, и сильные пороги примерно за 50 метров до расчётного створа.

Обрушение моста произошло 1 июня 2020 года, когда расход составил 715 м<sup>3</sup>/с, максимальный за 2020 год – 868 м<sup>3</sup>/с (4 июня).

По году, в который произошло обрушение моста, построен гидрограф (рисунок 3.6).



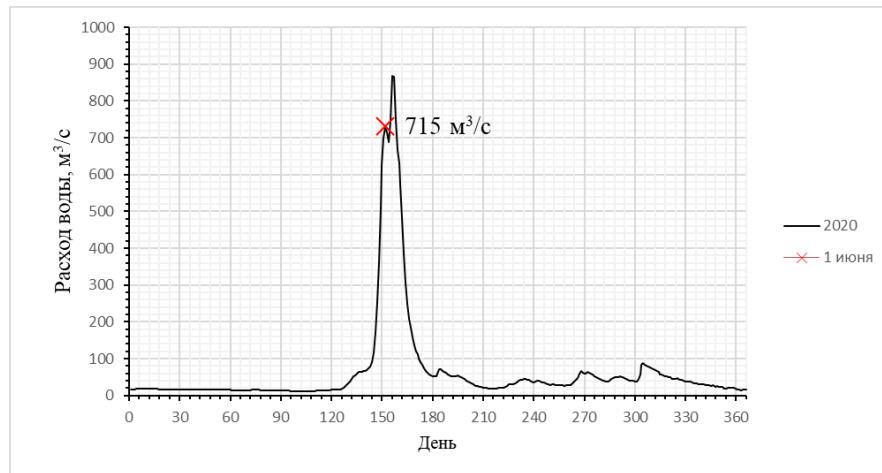


Рисунок 3.6 – Гидрограф р. Кола – ст.1429 км Окт. ж.д. за 2020 год

По рисунку 3.6 видно, что причиной обрушения стал проходящий во время весеннего половодья паводок. Данный год выделяется из общего ряда своим большим стоком.

### 3.2 Расчёты деформаций русла в створе мостового перехода

При наличии мостового перехода с расположением несущих опор в сечении подмостового русла, в данном месте локально меняется режим реки. Так как опоры моста занимают своим телом некоторое пространство, поток воды вынужден тем или иным способом проходить в прежнем объёме через створ изменённого русла. Следовательно, при одинаковом объёме и уменьшенной площади живого сечения повышаются скорости потока, и, как следствие, усиливается размывающая способность потока – русло деформируется и меняются его высотные отметки. При этом формируются локальные вихри у подножия опор, усиливающие деформации русла вокруг них – формируются «воронки размыва». Эти процессы называются «общий и местный размыв».

Причём, местный размыв возникает именно при вмешательстве инородного тела в русло реки, создавая потоку препятствие (это может быть как опора моста, так и валун или т.п. тела), а общий размыв возникает и просто при пропуске больших расходов воды. По этим причинам общий размыв является фоном местного размыва.

Для расчётов местного и общего размыва необходимо иметь данные промерных съёмок в рассматриваемом створе, а также иметь обеспеченные расходы и уровни воды в зависимости от класса сооружения. Особенностью расчётов размывов для данного участка подмостового русла является нестандартное расположение опор моста в плане, а именно положение створа имеет угол в  $45^\circ$  по отношению к руслу реки, а сами опоры расположены вдоль движения потока и встречают его лобной частью.

Продольный чертёж с видом сверху представлен в Приложении В.

Данные по промерным съёмкам приведены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2 – Используемые исходные данные промерных съёмов  
подмостового сечения русла [11]

№ вертикали	Пометка	Расстояние от левобережного фундамента, м	Глубина от уреза берега	Высотная отметка, м БС
1	2	3	4	5
Л.б.	Урез	0	0.00	14.50
1		5	0.25	14.25
2		10	0.50	14.00
3		15	0.95	13.55
4		20	1.20	13.30
5	Опора 1	25	1.22	13.28
6		30	1.30	13.20
7		35	1.50	13.00
8		40	1.90	12.60
9		45	2.04	12.46
10	Опора 2	50	2.10	12.40
11		57	2.82	11.68
12		64	2.70	11.80
13		71	2.30	12.20
14		78	2.22	12.28
15	Опора 3	85	1.67	12.84
16		92	1.11	13.39
17		99	0.56	13.95
П.б.	Урез	106	0.00	14.50

Данные в таблице 3.2 характеризуют изменение глубин русла по диагонали (в створе моста). Если принять, что проекция этих высот на вертикальную плоскость, перпендикулярную потоку, достоверно описывает русло реки, то можно произвести расчёт обеспеченных уровней по расходам воды. Сделать это можно, умножив расстояние от постоянного начала на значение  $\cos 45^\circ$ .

Спроецированные промеры приведены в таблице 3.3.

Для расчёта обеспеченных уровней была использована программа *Profile*. По ней построена кривая  $Q = f(H)$  (Приложение Г).

Значения обеспеченных расходов и уровней воды приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.3 – Промерные данные спроецированного створа

№ вертикали	Пометка	Расстояние от левобережного фундамента, м	Глубина от уреза берега	Высотная отметка, м БС
1	2	3	4	5
Л.б.	Урез	0.00	0.00	14.50
1		3.54	0.25	14.25
2		7.07	0.50	14.00
3		10.61	0.95	13.55
4		14.14	1.20	13.30
5	Опора 1	17.68	1.22	13.28
6		21.21	1.30	13.20
7		24.75	1.50	13.00
8		28.28	1.90	12.60
9		31.82	2.04	12.46
10	Опора 2	35.36	2.10	12.40
11		40.31	2.82	11.68
12		45.25	2.70	11.80
13		50.20	2.30	12.20
14		55.15	2.22	12.28
15	Опора 3	60.10	1.67	12.84
16		65.05	1.11	13.39
17		70.00	0.56	13.95
П.б.	Урез	74.95	0.00	14.50

Таблица 3.4 – Сводная таблица обеспеченных расходов и уровней воды р. Кола в спроецированном створе для вероятности превышения 0.33 и 1 %, а также в день обрушения моста (01.06.20)

Наименование	Обозначение	Измеритель	Величина
1	2	3	4
Расчётная обеспеченность	$P$	%	0.33/1
$Q$ макс	$Q$ 0.33 %	м <sup>3</sup> /с	1070
	$Q$ 1 %	м <sup>3</sup> /с	920
	$Q$ 01.06.20	м <sup>3</sup> /с	715
УВВ	УВВ 0.33 %	м БС	17.93
	УВВ 1 %	м БС	17.5
	УВВ 01.06.20	м БС	16.87

Расчёт глубин общего размыва начинается с определения среднего по всей площади живого сечения единичного расхода воды для каждой вероятности превышения. В данном случае – для вероятности 0.33 и 1 %, а также для расхода воды в день обрушения (01.06.20).

Средний единичный расход рассчитывается по формуле (1):

$$q = \frac{Q_{P\%}}{L_M}, \quad (1)$$

где  $L_M \approx 75$  – ширина отверстия моста, м.

Тогда, по формуле (1):

$$q_{0.33\%} = \frac{1040}{75} = 14.28 \text{ м}^2/\text{с};$$

$$q_{1\%} = \frac{924}{75} = 12.27 \text{ м}^2/\text{с};$$

$$q_{01.06.20} = \frac{730}{75} = 9.54 \text{ м}^2/\text{с}.$$

Для створа подмостового сечения русла считается средняя глубина потока после размыва  $h_{пр}$  по формуле (2):

$$H_{пр} = 0.93 \cdot \left( \frac{q}{\beta d^{0.4} \sqrt{g}} \right)^{0.77}, \quad (2)$$

где  $\beta$  – безразмерный коэффициент Лиштвана, зависящий от вероятности превышения паводка  $P$ ;

$d$  – средний диаметр частиц, определяемый по гранулометрическому составу взятой пробы грунта, м;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

За неимением данных по гранулометрическому составу проб из подмостового русла реки, за средний диаметр частиц взято значение 400 мм из технического отчёта от 2008 года [8].

Таблица 3.5 – Значения коэффициента Лиштвана [5]

$P, \%$	0.33	1	2	3	5	10
$\beta$	1.07	1	0.97	0.94	0.91	0.86

Расход воды 01.06.2020 имеет обеспеченность примерно 6 %.

По данной таблице  $\beta_{0.33\%} = 1.07$ ,  $\beta_{1\%} = 1$  и  $\beta_{01.06.20} = 0.9$ .

Тогда, по формуле (2):

$$H_{\text{пр},0.33\%} = 0.93 \cdot \left( \frac{13.88}{1.07 \cdot 0.4^{0.4} \cdot \sqrt{9.81}} \right)^{0.77} = 3.27 \text{ м};$$

$$H_{\text{пр},1\%} = 0.93 \cdot \left( \frac{12.33}{1 \cdot 0.4^{0.4} \cdot \sqrt{9.81}} \right)^{0.77} = 3.07 \text{ м};$$

$$H_{\text{пр},01.06.20} = 0.93 \cdot \left( \frac{9.74}{0.9 \cdot 0.4^{0.4} \cdot \sqrt{9.81}} \right)^{0.77} = 2.74 \text{ м};$$

Глубина общего размыва на каждой вертикали считается по формуле (3):

$$h_{\text{пр}} = h_{\text{др}i} \cdot \left( \frac{H_{\text{пр}}}{H_{\text{др}}} \right), \quad (3)$$

где  $h_{\text{др}}$  – глубина до размыва, м;

$H_{\text{пр}}$  – средняя глубина потока после размыва, м;

$H_{\text{др}}$  – средняя глубина потока до размыва, м.

Средняя глубина потока до размыва считается по формуле (4):

$$H_{\text{др}} = \frac{w_i - w_{\text{опор}i}}{B_i}, \quad (4)$$

где  $w_i$  – площадь живого сечения потока в спроецированном створе при данном уровне, м<sup>2</sup>;

$w_{\text{опор}i}$  – суммарная площадь проекций тел мостовых опор при данном уровне, м<sup>2</sup>;

$B_i$  – ширина потока при обеспеченном уровне, м.

Поскольку в продольном профиле моста левый и правый берег реки представляет собой вертикальную стенку, то изменение площади живого сечения характеризуется прибавкой в уровне воды:

$$w_i = B_i \cdot \Delta H - w_{\text{опор}i},$$

где  $\Delta H$  – прибавка в уровне воды, отсчитываемая от отметки урезом берегов, м.

Рассчитанная площадь живого сечения до отметки урезом берегов в спроецированном створе составляет 113.48 м<sup>2</sup>.

Рассчитанные значения площади живого сечения потока при обеспеченных уровнях приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Рассчитанные значения площади живого сечения потока при обеспеченных уровнях

Обеспеченность, %	Прибавка уровня, м	Приращение площади, м <sup>2</sup>	Спроецированная сумма площадей тел мостовых опор, м <sup>2</sup>	Площадь живого сечения, м <sup>2</sup>
1	2	3	6	7
0.33 %	3.43	257.09	42.43	328.15
1 %	3.01	225.61	36.13	302.96
01.06.20	2.37	177.64	34.58	256.55

Глубина потока до размыва на каждой вертикали считается по формуле (5):

$$h_{др\ i} = H_{P\ \%} - H_{дна\ i}, \quad (5)$$

где  $H_{P\ \%}$  – отметка уровня воды, м;

$H_{дна\ i}$  – отметка дна русла до размыва, м.

В соответствии с п.16 СНиП 2.05.03-84 расчётная линия общего размыва строится по глубинам с запасом в увеличенную на 15 % разницу глубин до и после размыва (6):

$$h_{расч\ i} = h_{др\ i} + 1.15 \cdot (h_{пр} - h_{др\ i}). \quad (6)$$

Также, для каждой глубины общего размыва считается средняя скорость на данной вертикали по формуле (7):

$$V_i = \frac{q_i}{h_{расч\ i}}, \quad (7)$$

где  $q_i$  – единичный расход на данной вертикали.

Рассчитанные глубины общего размыва и средние скорости на вертикалях при отметке уровня воды обеспеченностью 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020, приведены в таблицах 3.7, 3.8 и 3.9, соответственно.

Таблица 3.7 – Рассчитанные глубины общего размыва и средние скорости на вертикалях при уровне обеспеченностью 0.33 %

№ вертикали	$q_i$	$h_{др}$	$h_{пр}$	$h_{расч}$	$V_i$
1	2	3	4	5	6
Л.б.	10.39	3.43	2.56	4.43	2.35
1	12.64	3.68	2.75	4.75	2.66
2	13.76	3.93	2.93	5.08	2.71
3	15.85	4.38	3.27	5.66	2.80
4	17.03	4.63	3.46	5.98	2.85
5	17.13	4.65	3.47	6.00	2.85
6	17.51	4.73	3.53	6.11	2.87
7	18.48	4.93	3.68	6.37	2.90
8	20.45	5.33	3.98	6.88	2.97
9	21.15	5.47	4.08	7.06	2.99
10	21.46	5.53	4.13	7.14	3.00
11	25.16	6.25	4.67	8.07	3.12
12	24.53	6.13	4.58	7.92	3.10
13	22.47	5.73	4.28	7.40	3.04
14	22.06	5.65	4.22	7.30	3.02
15	19.29	5.10	3.80	6.58	2.93
16	16.60	4.54	3.39	5.86	2.83
17	14.01	3.99	2.98	5.15	2.72
П.б.	11.53	3.43	2.56	4.43	2.60

Таблица 3.8 – Рассчитанные глубины общего размыва и средние скорости на вертикалях при уровне обеспеченностью 1 %

№ вертикали	$q_i$	$h_{др}$	$h_{пр}$	$h_{расч}$	$V_i$
1	2	3	4	5	6
Л.б.	8.37	3.01	2.28	3.85	2.18
1	9.28	3.26	2.47	4.17	2.23
2	10.22	3.51	2.66	4.49	2.28
3	11.95	3.96	3.00	5.06	2.36
4	12.94	4.21	3.19	5.38	2.41
5	13.02	4.23	3.21	5.41	2.41
6	13.34	4.31	3.27	5.51	2.42
7	14.15	4.51	3.42	5.76	2.46
8	15.81	4.91	3.72	6.27	2.52



Продолжение таблицы 3.8

№ вертикали	$q_i$	$h_{др}$	$h_{пр}$	$h_{расч}$	$V_i$
1	2	3	4	5	6
9	16.39	5.05	3.83	6.45	2.54
10	16.65	5.11	3.88	6.53	2.55
11	19.76	5.83	4.42	7.45	2.65
12	19.23	5.71	4.33	7.30	2.64
13	17.50	5.31	4.03	6.79	2.58
14	17.16	5.23	3.97	6.68	2.57
15	14.83	4.68	3.55	5.97	2.48
16	12.58	4.12	3.12	5.26	2.39
17	10.43	3.57	2.70	4.56	2.29
П.б.	8.37	3.01	2.28	3.85	2.18

Таблица 3.9 – Рассчитанные глубины общего размыва и средние скорости на вертикалях при уровне 01.06.2020

№ вертикали	$q_i$	$h_{др}$	$h_{пр}$	$h_{расч}$	$V_i$
1	2	3	4	5	6
Л.б.	5.92	2.37	1.90	2.92	2.03
1	6.74	2.62	2.10	3.22	2.09
2	7.59	2.87	2.30	3.53	2.15
3	9.17	3.32	2.66	4.08	2.25
4	10.08	3.57	2.86	4.39	2.29
5	10.15	3.59	2.87	4.42	2.30
6	10.44	3.67	2.94	4.51	2.31
7	11.19	3.87	3.10	4.76	2.35
8	12.72	4.27	3.42	5.25	2.42
9	13.26	4.41	3.53	5.42	2.44
10	13.50	4.47	3.58	5.50	2.45
11	16.39	5.19	4.15	6.38	2.57
12	15.90	5.07	4.06	6.24	2.55
13	14.29	4.67	3.74	5.74	2.49
14	13.97	4.59	3.67	5.65	2.47
15	11.81	4.04	3.23	4.96	2.38
16	9.75	3.48	2.78	4.28	2.28
17	7.78	2.93	2.34	3.60	2.16
П.б.	5.92	2.37	1.90	2.92	2.03

Глубина местного размыва рассчитывается по гидравлическим характеристикам потока после общего размыва, и откладывается от расчётных отметок дна после общего размыва.

Поскольку принятый средний диаметр частиц дна равен 400 мм, можно предположить, что состав русла реки, в виду столь большого значения диаметра, однороден и представляет собой скопление валунов и гальки с наличием невымытого песка ниже отметок фактической глубины реки в данном створе.

Глубина местного размыва в однородном несвязном грунте на каждой вертикали рассчитывается по формуле (8):

$$h_i = 0.77 \cdot h_{др i}^{0.4} \left( \frac{V_i}{(gwh_{др i})^{0.33}} \right)^{0.5} F(b), \quad (8)$$

где  $V_i$  – средняя скорость на данной вертикали, м/с;

$w$  – гидравлическая крупность несвязных грунтов, определяемая по зависимости от средней крупности частиц, м/с;

$F(b)$  – параметр, учитывающий геометрию опоры моста.

Гидравлическая крупность частиц наносов в диапазоне от 0.1 до 400 мм определяется по известной зависимости от их среднего диаметра по графику в Приложении Е.

По данной зависимости гидравлическая крупность составляет 2 м/с.

Параметр, учитывающий геометрию опоры моста, рассчитывается по формуле (9).

$$F(b) = \sum_{i=1}^n b_j^{0.6} \cdot M_j \cdot K_j \cdot f_j, \quad (9)$$

где  $b_j$  – ширина поперечного сечения каждого из имеющихся характерных элементов мостовой опоры в проекции на плоскость расчётного створа, которая выше отметки дна, м;

$M_j$  и  $K_j$  – коэффициент формы и косины опоры по отношению к потоку;

$f_j$  – весовой коэффициент, приходящий на каждую характерную часть мостовой опоры.

Геометрические параметры мостовых опор получены из чертежа в Приложении В и сведены в таблицу 3.10.

В теле отремонтированных опор есть две характерных для её геометрии ширины – верхняя часть, на которую ложатся пролёты моста, и уровень соединения тела опоры с её массивным фундаментом. Ширина частей опор составляет 3.42 и 4.8 м, соответственно.

Коэффициент формы опоры определён по табличным значениям из таблицы 10.12, п.9, СНиП 02.05.03-84. Лобовая часть опор имеет округлую форму, потому коэффициент формы равен 0.85.

Коэффициент косины определяется по рисунку 10.9, п.10.5, СНиП 02.05.03-84. Так как поток направлен параллельно продольной оси опоры, то коэффициент косины равен 1.

Весовой коэффициент каждого элемента опоры рассчитывается по формуле (10):

$$f_j = A_j \cdot \left(\frac{H_j}{H}\right)^{\varphi_j} - A_{j-1} \cdot \left(\frac{H_{j-1}}{H}\right)^{\varphi_{j-1}}, \quad (10)$$

где  $A$  и  $\varphi$  – коэффициент и показатель степени, принимаемые в зависимости от относительной высоты до верха каждого  $\frac{H_j}{H}$  и  $(j - 1)$ -го элемента при

$$\frac{H_j}{H} \geq 0.3 \quad A = 1, \varphi = 0.33, \text{ а при } \frac{H_j}{H} \leq 0.3 \quad A = 2.23, \varphi = 1;$$

$H_j$  – разница между отметками дна и верхней частью характерного элемента опоры;

$H$  – разница между отметками дна и поверхности воды.

Счёт характерных элементов опоры начинается от дна и до поверхности потока, где  $H_j = H$ .

Таблица 3.10 – Сводная таблица параметров геометрии опоры

Ширина нижней части опоры $b_1$ , м	4.8
Ширина верхней части опоры $b_2$ , м	3.42
Коэффициент формы опоры, $M_1$	0.85
Коэффициент формы опоры, $M_2$	0.85
Коэффициент косины опоры, $K_1$	1
Коэффициент косины опоры, $K_2$	1
Весовой коэффициент нижней части опоры, $f_1$	0.72
Весовой коэффициент верхней части опоры, $f_2$	0.28

Тогда, по формуле (9):

$$F(b) = \sum_{i=1}^2 3.42^{0.6} \cdot 0.85 \cdot 1 \cdot 0.72 + 4.8^{0.6} \cdot 0.85 \cdot 1 \cdot 0.28 = 2.07.$$

Рассчитанные значения глубин местного размыва для уровней с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020, приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Рассчитанные значения глубин местного размыва для уровней с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020

№ опоры	0.33 %	1 %	01.06.20
1	2	3	4
1	2.51	2.25	2.09
2	2.68	2.42	2.28
3	2.81	2.34	2.19

Если при полученной глубине местного размыва вскрывается мощный фундамент опоры, размеры которого превышают геометрию тела опоры, то рассчитывается поправочное значение для глубины местного размыва по формуле (10), вычитается из рассчитанной глубины местного размыва:

$$\delta_{\phi} = Ш_{\phi} \cdot m_0, \quad (10)$$

где  $Ш_{\phi}$  – суммарная ширина ступеней фундамента, начиная от ближайшей из них, располагающейся выше отметки общего размыва;

$m_0$  – коэффициент естественного заложения откоса.

По чертежу в Приложении В суммарная ширина ступеней фундамента составляет 0.45 м.

Коэффициент естественного заложения откоса определяется по табличным значениям таблица 10.11, п.10.5, СНиП 02.05.03-84. При крупности 400 мм он составляет 1.25.

Тогда, по формуле (10):

$$\delta_{\phi} = 0.45 \cdot 1.25 = 0.56 \text{ м}$$

Рассчитанные значения глубин местного размыва для уровней с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020 с учётом поправки на обнажение фундамента приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Рассчитанные значения глубин местного размыва для уровней с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020 с учётом поправки на обнажение фундамента

№ опоры	0.33 %	1 %	01.06.20
1	2	3	4
1	1.94	1.68	1.53
2	2.12	1.85	1.71
3	2.25	1.77	1.63

Координаты расчётной линии общего и местного размывов при уровнях с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020, в створе мостового перехода приведены в сводной таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Координаты расчётной линии общего и местного размывов при уровнях с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020, в створе мостового перехода

№ верт.	Пометка	L, м	H, м БС	Общий размыв			Местный размыв		
				0.33 %	1 %	01.06	0.33 %	1 %	01.06
Л.б.	Урез	0	14.50	13.50	13.66	13.95			
1		5	14.25	13.18	13.34	13.65			
2		10	14.00	12.85	13.02	13.34			
3		15	13.55	12.27	12.45	12.79			
4		20	13.30	11.95	12.13	12.48	11.95	12.13	12.48
5	Опора 1	25	13.28	11.93	12.10	12.45	9.98	10.42	10.92
6		30	13.20	11.82	12.00	12.36	11.82	12.00	12.36
7		35	13.00	11.56	11.75	12.11			
8		40	12.60	11.05	11.24	11.62			
9		45	12.46	10.87	11.06	11.45	10.87	11.06	11.45
10	Опора 2	50	12.40	10.79	10.98	11.37	8.67	9.13	9.66
11		57	11.68	9.86	10.06	10.49	9.86	10.06	10.49
12		64	11.80	10.01	10.21	10.63			
13		71	12.20	10.53	10.72	11.13			
14		78	12.28	10.63	10.83	11.22	10.63	10.83	11.22
15	Опора 3	85	12.84	11.35	11.54	11.91	9.10	9.76	10.28
16		92	13.39	12.07	12.25	12.59	12.07	12.25	12.59
17		99	13.95	12.78	12.95	13.27			
П.б.	Урез	106	14.50	13.50	13.66	13.95			

По координатным данным построены профили общего и местного размывов при уровнях с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020, в створе мостового перехода (Приложение Е).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных расчётов по данным промерных съёмов русла реки Кола 2012 года и подсчёту обеспеченных отметок уровня воды в створе мостового перехода Октябрьской железной дороги по маршруту г. Санкт-Петербург – г. Мурманск для уровней воды с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также при фактическом уровне в день обрушения центральной несущей мостовой опоры, были получены высотные отметки русла после общего и местного размывов.

По полученным результатам можно сделать вывод, что центральная (вторая) несущая опора заглублена недостаточно, поскольку в день обрушения воронка размыва опустилась ниже отметки ложа фундамента. Поток вымыл грунт из-под фундамента, и это спровоцировало перекося несущей опоры под давящей силой водного потока в направлении его течения, а в дальнейшем и обрушение моста.

Оценивая запас по устойчивости несущей опоры №1 и №3, можно сказать, что из рассматриваемых случаев они смогли бы выдержать расход в 715 м<sup>3</sup>/с (обеспеченность 6 %), если центральная несущая опора была заглублена хотя бы до отметки 9 м БС. Расход большей обеспеченности, при данных параметрах фактического русла в створе мостового перехода, несущие сооружения уже выдержать не в состоянии. Устойчивость несущих опор при больших расходах в предыдущие годы объясняется иными параметрами фактического русла, то есть в процессе многолетних деформаций при прохождении половодий и паводков отметки опустились до критических для устойчивости несущих опор значений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

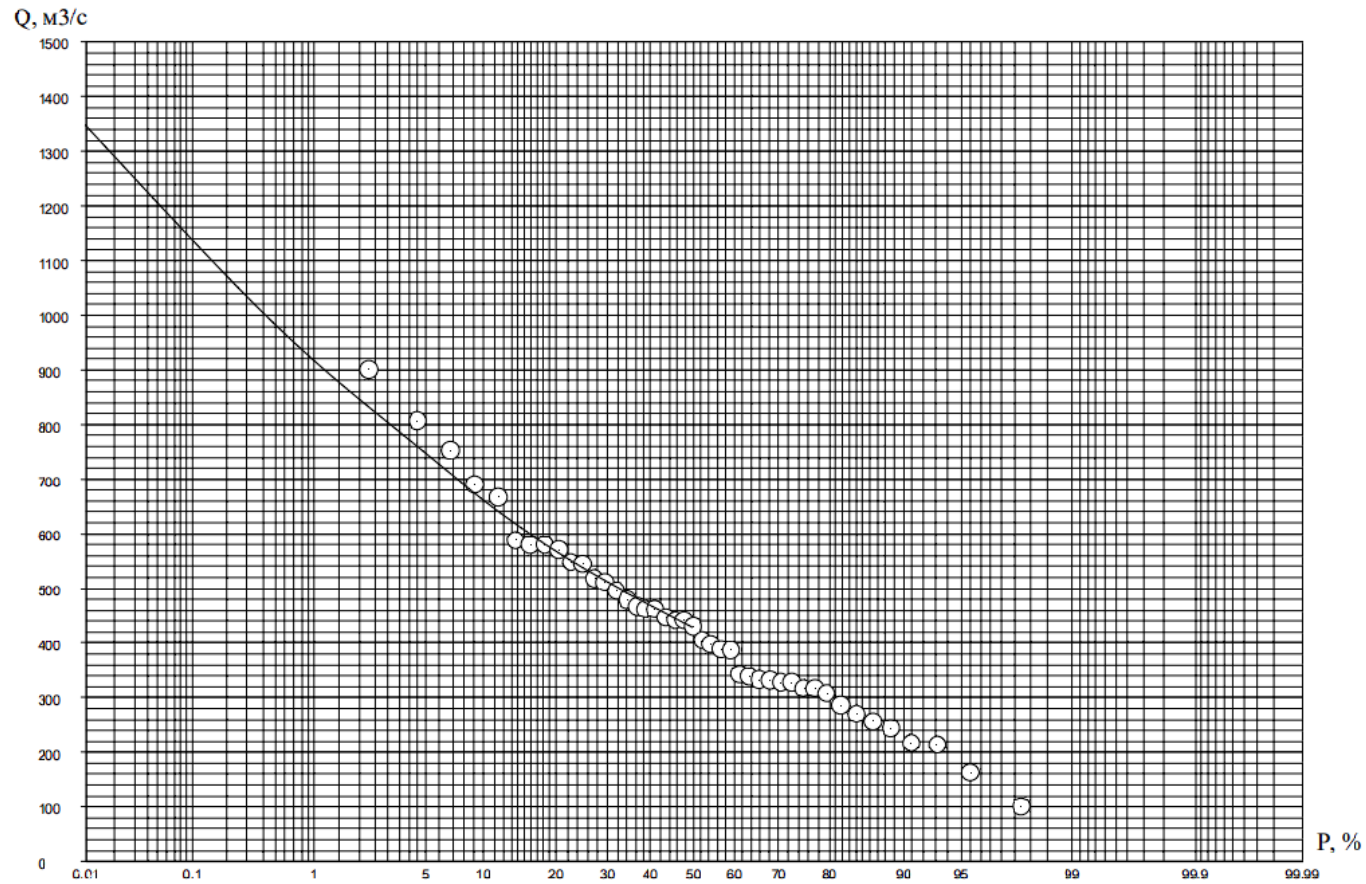
1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=139>. Дата обращения: 13.10.2022;
2. Гидрологические ежегодники (1981-1994 гг.). Т. 1. В. 6. Кольский полуостров. Ленинград; Гидрометиздат;
3. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. В. 6. Бассейны рек Кольский полуострова – Ленинград: Гидрометиздат, 1985;
4. Основные гидрологические характеристики. Т. 1. Кольский полуостров. Ленинград: Гидрометиздат, 1965;
5. Пособие к СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы» (ПМП-91). Москва: ЦНИИС –1992;
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 1. Кольский полуостров. Ленинград : Гидрометиздат, 1970;
7. СП 33-101-2003 – Москва: ГОССТРОИ, 2004;
8. Технический отчёт об инженерно-гидрометеорологических изысканиях. Т. 2. СПб: Ленгипротранспуть, 2008;
9. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб: Нестор-История, 2011;
10. Яндекс.Карты. [Электронный ресурс]. URL: [https://yandex.ru/maps/10897/murmansk-oblast/geo/reka\\_kola/140993259/?from=tabbar&l=sat%2Cskl&ll=33.177129%2C68.610243&source=serp\\_navig&z=9](https://yandex.ru/maps/10897/murmansk-oblast/geo/reka_kola/140993259/?from=tabbar&l=sat%2Cskl&ll=33.177129%2C68.610243&source=serp_navig&z=9). Дата обращения: 15.06.2023;
11. Отчёт №676 о водолазном обследовании опор моста через реку Северная Кола на 1436 км участка Санкт-Петербург – Мурманск, Октябрьской железной дороги. Москва: Центр обследования и диагностики инженерных сооружений, 2012.



## Приложение А

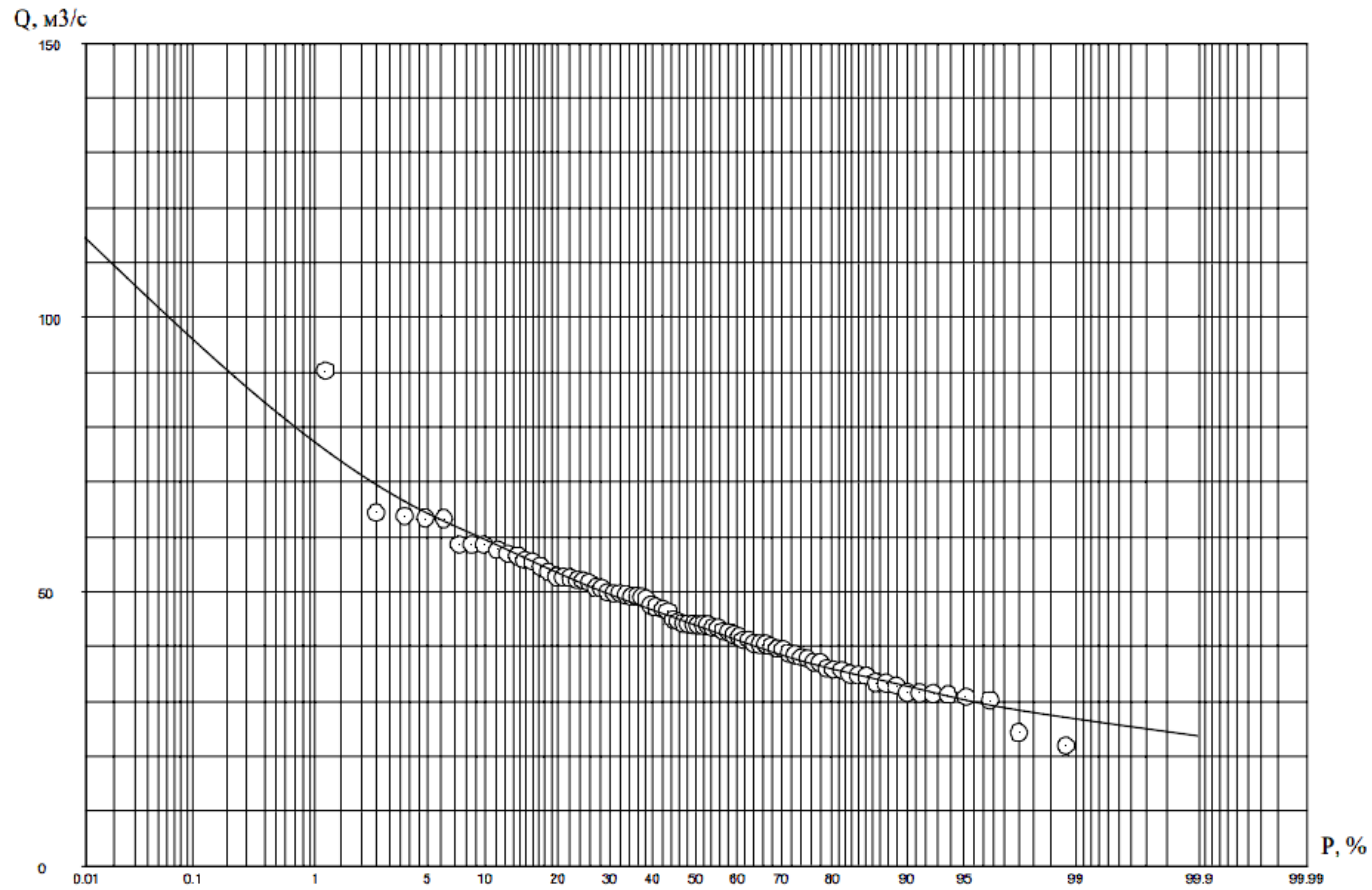
Эмпирическая и усечённая аналитическая кривая обеспеченностей максимальных расходов воды р. Кола – 1429 км Октябрьской ж. д. Крицкого-Менкеля, построенная с использованием двухпараметрического Г-распределения;  $Q_{cp} = 440$ ,

$$C_v = 0.38, C_s/C_v = 2.$$



## Приложение Б

Эмпирическая и аналитическая кривая обеспеченностей Крицкого-Менкеля среднегодовых расходов воды р. Кола –  
1429 км Октябрьской ж. д.;  $Q_{cp} = 45.4$ ,  $C_v = 0.24$ ,  $C_s/C_v = 4$ .

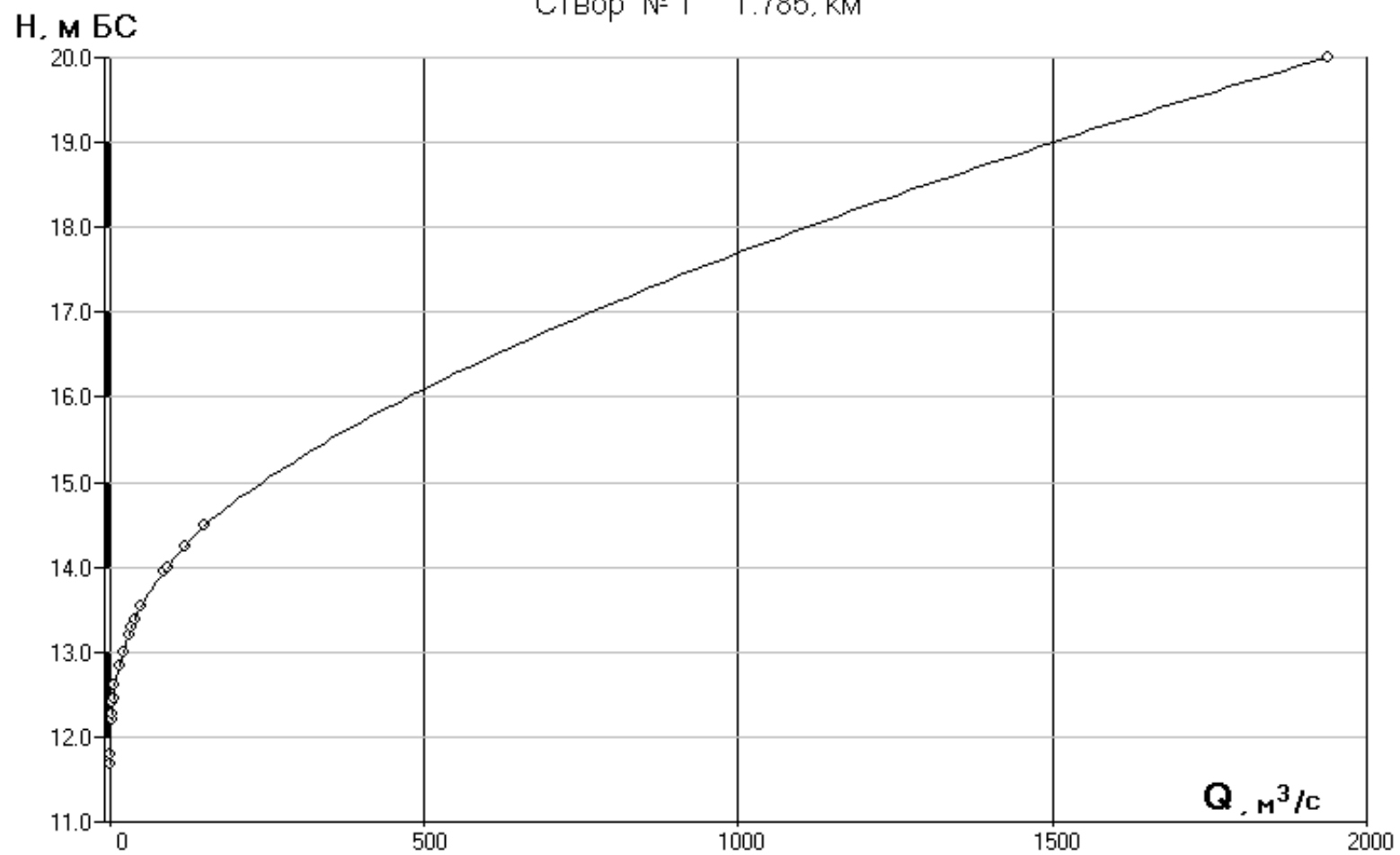




Приложение Г

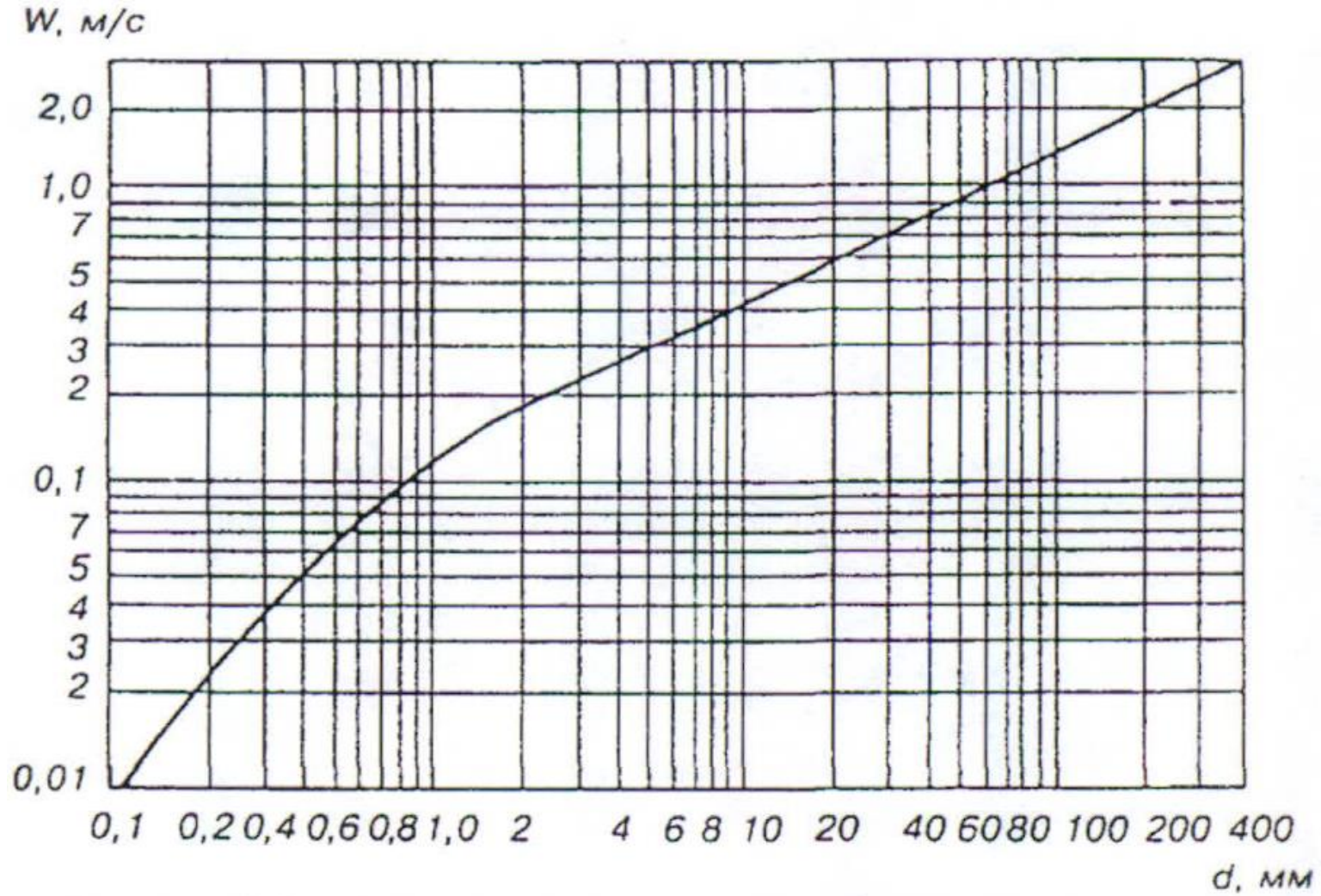
Кривая  $Q = f(H)$  для спроецированного створа

Створ № 1 1.785, км



Приложение Д

График зависимости гидравлической крупности несвязных грунтов от средней крупности частиц грунта



Поперечный профиль общего и местного размывов при уровнях с вероятностью превышения 0.33 и 1 %, а также 01.06.2020, в створе мостового перехода р. Кола

