



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(дипломный проект)

На тему

**Анализ и обобщение
гидрологических сведений
о реках бассейна р. Кулой**

Исполнитель Березкин Александр Александрович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Угренинов Геннадий Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

2016 г.

Санкт-Петербург
2016

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – определение основных гидрологических характеристик реки Кулой, бассейн которой отличается наличием аazonальных условий, в частности, распространением карста.

Одна из важных задач – выяснение возможности использования стандартных расчётных процедур, рекомендованных Сводом правил СП 33–101–2003, при оценке гидрологических процессов на нетипичном водосборе.

Оценка значимости аazonальных факторов распределения стока в бассейне р. Кулой произведена путем сравнения результатов статистической обработки данных наблюдений на гидрологических постах и расчетов по стандартным схемам.

Однородность условий формирования стока в бассейне р. Кулой оценивалась с применением параметрических критериев Фишера и Стьюдента – Госсета.

Регион реки Кулой выбран для исследования не случайно, так как здесь обнаружены значительные запасы полезных ископаемых. При разработке месторождений требуется надежная гидрологическая информация. Именно оценке её надежности и посвящена данная работа.

1 ФИЗИКО – ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Рельеф и геологическое строение

Рельеф территории, на которой расположен бассейн р. Кулой, весьма однообразен и преимущественно является равнинным (рисунок 1.1 – 1.3). В верхнем течении реки берега различаются по высоте, обычно правый берег выше, а береговой склон круче (рисунок 1.3). В истоке реки рельеф слабоволнистый, отметки колеблются от 100 до 200 м над уровнем моря. Большая часть территории бассейна – низменность (рисунок 1.4). Переход от низменности к участкам с повышенными отметками земной поверхности выражен отчетливо и имеет характер уступа, с разностью отметок до 50 – 100 м.



Рисунок 1.1 – Общий вид долины р. Кулой



Рисунок 1.2 – Типичный рельеф бассейна р. Кулой



Рисунок 1.3–Рельеф прибрежной местности. Разновысокие берега

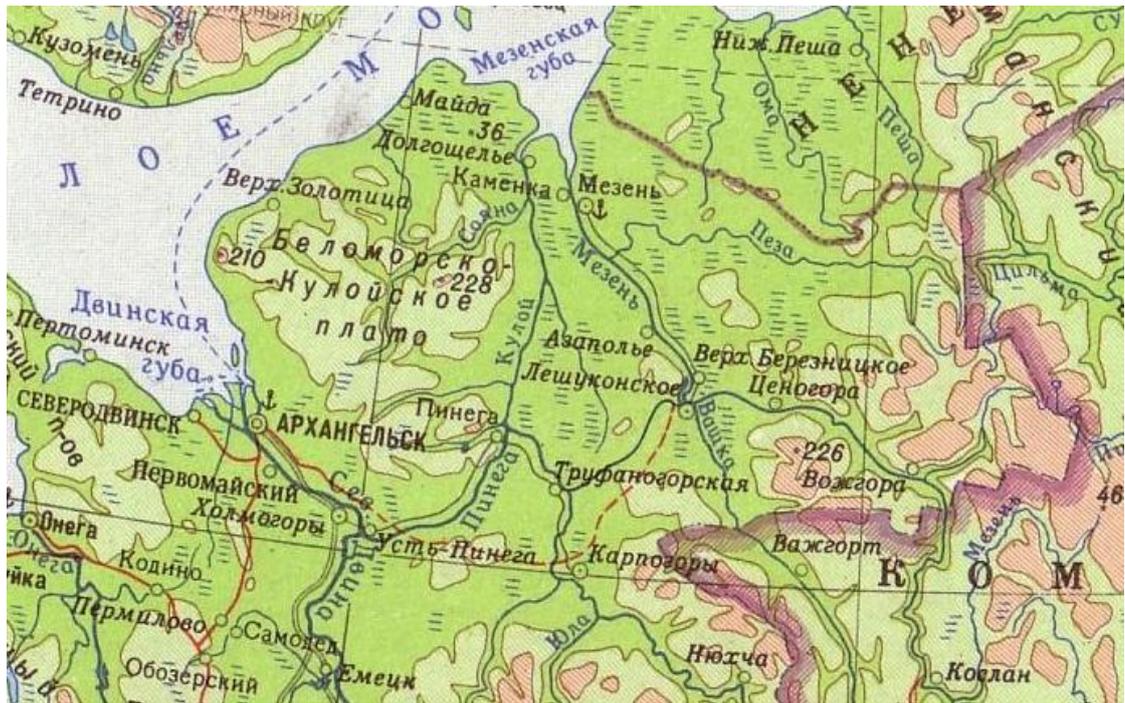


Рисунок 1.4 – Карта бассейна реки Кулой

Геологическое строение характеризуется преобладанием платформенных структур и глубоким залеганием кристаллического фундамента, сформировавшегося в архее и протерозое, перекрытого мощными толщами осадочных отложений. Осадочные отложения в основном относятся к геологическим периодам перми, триаса и юры. Фундамент близок к земной поверхности, преобладают каменноугольные отложения. С известняками каменноугольной системы, сильно трещиноватыми и пещеристыми, связано карстопроявление. Развитие карстовых процессов идёт весьма интенсивно на Кулойско – Беломорском плато. Есть места, где на 1 км^2 приходится до 400 – 500 карстовых воронок и котловин.

Особенности формирования стока карстовой реки Кулой predetermined наличием морских отложений каменноугольного и пермского периодов. Водный режим устьевое участка определяется приливо – отливными течениями Белого моря.

1.2 Климат бассейна р. Кулой

Бассейн реки Кулой расположен между 60 и 65°с.ш., 40 и 45°в.д. Климат здесь суровый: лето короткое и прохладное, зима продолжительная и холодная. Годовая сумма прямой солнечной радиации заметно снижается с юга на север, составляя в среднем 30 дж/м. Сильное влияние на климат оказывает Белое море. Большую неустойчивость погоде придают в течение года частые вторжения арктического воздуха с Северного Ледовитого океана. Наличие озёр и болот способствует большой увлажнённости воздуха.

Относительная влажность воздуха, характеризующая степень его насыщения водяным паром, изменяется в течение года в широких пределах. Наименьших значений влажность достигает в мае – июне (72 – 87%), максимальных – осенью (90%).

Для этой территории, как и для всего Северного края, характерны частые смены температур. Ненастную погоду приносят ветры с Атлантики. Летом с ними связаны похолодания и дожди, а зимой – ослабление морозов и оттепели. Последние обычно держатся недолго, где – то около недели. При этом повышение температуры сопровождается метелями и мокрым снегом, иногда и дождем. Вторжение сухих, остывших над континентом воздушных масс из Сибири, а также воздушных масс из Арктики, приводит к резкому понижению температуры и установлению малооблачной погоды, что часто случается в феврале. При этом температура достигает минус 50 – 60 градусов.

Существенное влияние на распределение температур оказывает Белое море. Зимой на побережье температура выше, чем на остальной территории речного бассейна; летом - ниже.

Зима длится 5 – 6 месяцев, с ноября по март. Нередко минусовая температура бывает в апреле. Средняя за зиму температура минус 15 – 20 градусов.

Устойчивый переход температуры через 0 градусов весной происходит 10 – 15 апреля. Весна, как правило, очень дружная, сопровождается быстрым сходом снега с территории бассейна.

Самый теплый летний месяц – июль. В отдельные дни температура поднимается до +25 – +30 градусов, но нередки летние заморозки.

Осень начинается рано. Уже в конце августа листья на деревьях желтеют, а первый снег выпадает в середине сентября.

Бичом этой территории являются ветры, часто дующие по несколько суток. Зимой обычно дуют юго-восточные ветра, северные бывают редко. В апреле-мае ветра неустойчивы. Летом – чаще повторяемость ветров северного направления. В среднем за год 15 дней ветер имеет скорость более 15 м/с, причем 10 дней из них приходится на зиму.

На теплый период года приходится 65 – 70% годового количества осадков. Зимой осадков выпадает сравнительно немного, но, накапливаясь к весне, они создают достаточно большой запас воды в снеге.

Местным фактором, влияющим на перераспределение осадков, является ветер. Зимой он надувает на занесённых участках толщи снега до 4 – 5 м, а нередко и до 10 м. Зато на открытых территориях полностью его сдувает.

Годовое количество осадков на побережье – 600 мм, в верховьях бассейна 700 – 750 мм.

Для этого района характерны полярные день и ночь. Среднемноголетнее число дней без солнца равняется 150 [2].

1.3 Гидрография

Современная речная сеть формировалась под действием оледенения и наступления моря. Временами под водой оказывалось всё нижнее и среднее течение реки Кулой. Сохранились следы валдайского оледенения низовьев реки.

Пинега и Кулой были единой рекой. Затем водосбор. Пинегистал частью бассейна Северной Двины, а река Кулой создала своё собственное русло [3]. Водоразделом между Кулоем и Северной Двиной является Беломоро – Кулойское плато, а между Кулоем и Мезенью – Двинско – Мезенское плато.

Протяженность реки Кулой от истока до устья составляет 235 км. Площадь водосбора – 19000 км². Кулой относится к средним по величине рекам. Для соединения с р. Пинегой, на месте бывшего русла был прорыт канал, длиной 8 км. В настоящее время канал бездействует. Связь между реками осуществляется лишь в период весеннего половодья.

Реку Кулой питают 15 рек, с длиной водотока больше 10 км, с общей длиной до 1000 км.

Наиболее крупные притоки р. Кулой (рисунок 1.5) это реки: Нёмнюга, Сояна, Кёлда и Сотка. Ширина реки Кулой, составляющая в истоке 1–15 м, постепенно увеличивается к устью до сотен метров [5].

В верхней части бассейна, прилегающей к долине реки, наблюдается карст.

Устьевая область р. Кулой относится к приливному типу, с сильным воздействием приливо-отливных денивеляций. Река является уникальной по степени воздействия прилива. Лишь в Западной Европе имеются аналоги такого устья, например, устья рек Сены и Луары.

Устьевая область объединена с устьем реки Мезени в устьевое взморье, до условной линии мыс Абра́мовский –мыс Половинный. Устьевой участок реки безрукавный, постепенно расширяющийся к устьевому взморью.

Показатель устьевого расширения, составляющий 19, представляет собой отношение ширины русла в устьевом створе к ширине речного русла до устьевого расширения [4].

Такие эрозионные расширения речных русел называют эстуариями. Эстуарии являются результатом сложного развития речного русла в приливных условиях. Форма эстуария находится в относительном равновесии с динамикой

приливной волны. Приливные волны за длительный период действия выработали такую форму ложа эстуария, которая находится в соответствии с объёмом вод, наполняющих эстуарий в прилив и отводимых в море в отлив. При высоких приливах и нагонах с моря, вода в реке даже в летнюю межень поднимается до такой же отметки, как в весеннее половодье.

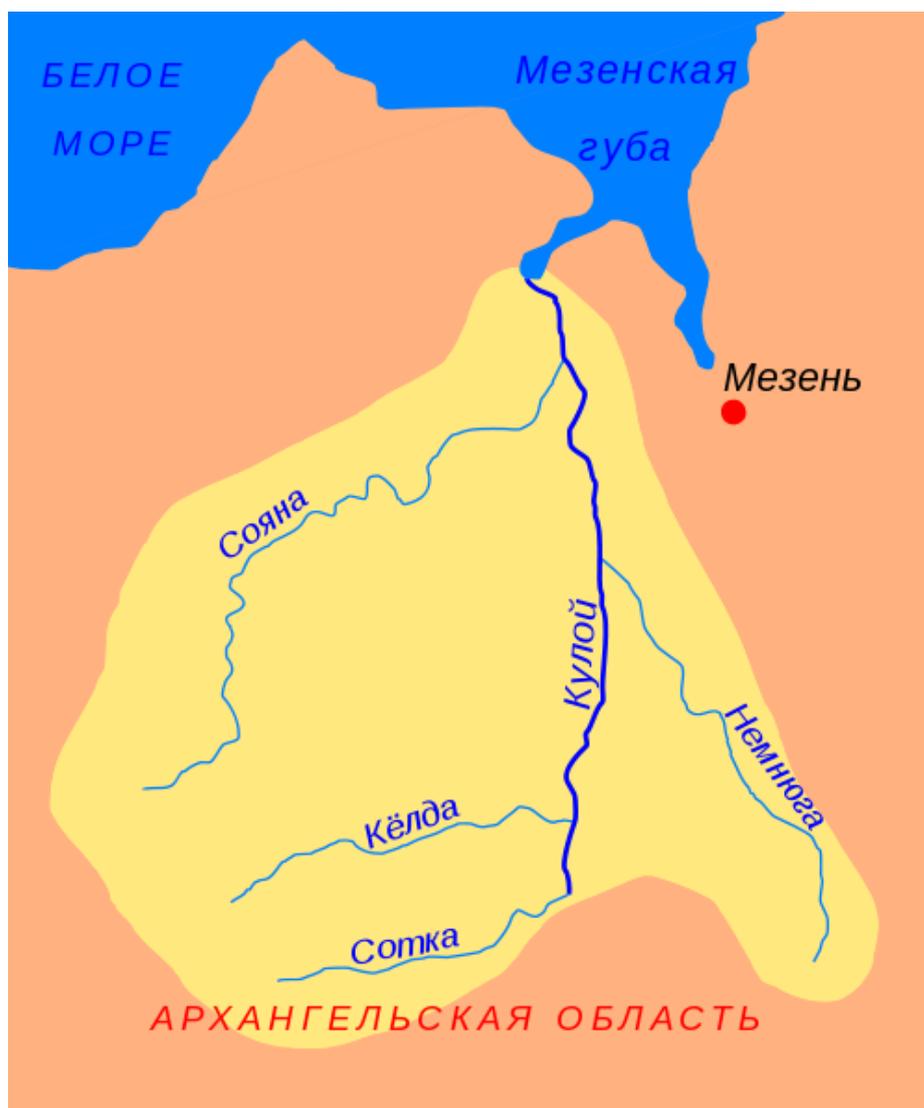


Рисунок 1.5 – Схема бассейна р. Кулой

1.4 Гидрологическая изученность

Река Кулой впадает в Белое море. Общая длина водотока 235 км, площадь водосбора 19000 км². Кулой имеет приблизительно 160 притоков, большей частью – длиной меньше 10 км. Количество озёр на водосборе – 4954.

Река имеет 3 левых и 2 правых значительных притока (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Основные сведения о р. Кулой и его притоках

Река, каким притоком является	Расстояние от устья, км	Длина водотока, км	Площадь водосбора, км ²	Притоки с длиной <10 км		Озёра	
				количество	суммарная длина, км	количество	площадь зеркала, км ²
канал Кулой	235	8	–	3	3	–	–
р. Сотка, лев.	235	115	827	44	106	264	8,88
р. Кёлда, лев.	213	104	2090	20	40	533	41,7
р. Полта, лев.	206	168	1700	16	40	456	23,4
р. Олма, прав.	186	28	732	8	10	337	10,4
р. Тойма, прав.	167	23	–	6	10	110	1,93
р. Етуга, лев.	152	88	433	10	33	334	10,5
р. Лока, лев.	119	157	1390	85	196	307	13,1
р. Немнюга, прав.	117	201	3630	73	198	560	21,6
р. Корба, лев. (приток р. Немнюга)	66	123	790	63	124	88	3,55
р. Сояна	54	140	5880	96	270	692	58,6
р. Кепина, лев. (приток р. Сояна)	140	75	–	44	116	136	9,02
р. Котуга, прав. (приток р. Сояна)	140	15	–	7	23	304	36,3
руч. Павручей, пр	40	14	–	2	4	2	0,23

Продолжение таблицы 1.1

Река, каким притоком является	Расстояние от устья, км	Длина водотока, км	Площадь водосбора, км ²	Притоки с длиной <10 км		Озёра	
				количество	суммарная длина, км	количество	площадь зеркала, км ²
руч. Залюзный, лв	30	11	–	9	8	30	1,30
руч. Оленица, лв	26	10	–	–	–	18	0,74
р. Поча, лв	22	66	146	16	34	205	9,92
р. Грязновка, лв	16	25	–	8	29	32	0,72
руч. Большая речка, лв	2	10	–	1	2	11	0,42

На весь бассейн реки приходится 9 режимных гидрологических постов, из которых один пост на Рыбзаводезакрыт (таблица 1.2).

Самый старый гидрологический пост на р. Кулой действует в деревне Кулой. Открыт в 1926 г., расположен в 150 м выше деревни, в 4,5 км ниже впадения р. Кёлды. Прилегающая к долине реки местность имеет карстовые черты. Долина реки у поста трапецеидальная, выше – ящикообразная, шириной 4-6 км.

Склоны долины реки крутые, правый – высотой 12–15 м, сложен гипсовыми отложениями, левый – песчаный, заросший хвойным лесом. Пойма левобережная, шириной 3,5–4,0 км, сильно изрезана озёрами, старицами, поросла кустарником и мхом, прирусловая часть луговая. При уровне 152 см начинает действовать система озёр и проток.

Русло реки прямолинейное, песчаное, деформирующееся. Левый берег песчаный, высотой 2,5–3,0 м. Выше гидрологического поста имеются выходы ключей карстового происхождения, влияющие на термический и ледовый режим реки.

Вскрытие реки происходит, как правило, без ледохода. Лёд тает на месте задолго до массового ледохода на соседних реках, сопровождается резким падением уровня воды, с сохранением остаточных заберегов.

Гидрологический пост в д. Кулой расположен на правом берегу реки.

Для составления общей гидрологической характеристики необходимо учитывать сток крупных притоков.

Река Немнюга – д. Совполье. Гидрологического пост расположен в 1 км ниже деревни.

Таблица 1.2 – Гидрологические посты на р. Кулой и её притоках

№ пункта	Река – пункт	Площадь водосбора	Отметка нуля графика, м БС	Открыт	Закрыт	Расстояние от устья, км
1	р. Сотка – уроч. Разитина	784	16,71	01.11.79	–	19
2	р. Кёлда – д. Кёлда	1850	42,91	15.06.82	–	34
3	р. Келина– г. м. ст. Келино	1240	56,72	20.10.47	–	2,5
4	р. Котуга – г. м. ст. Келино	1700	58,75	01.09.66	–	3,6
5	р. Олма – д. Кулой	726	40,94	18.04.83	–	5,0
6	р. Немнюга – д. Совполье	2880	6,21	01.08.58	–	35
7	р. Сояна – д. Сояна	5570	2,45	26.09.66	–	20
8	р. Сояна - Рыбзавод	4870	–	19.09.56	1966	30
9	р. Кулой – д. Кулой	3040	11,05	18.08.26	–	209

Прилегающая к долине реки местность –значительно заболоченная, залесённая равнина. Долина реки трапецеидальная, шириной около 0,7 км. Склоны долины крутые, высотой 12 – 15 м. Пойма левобережная, шириной 490 м, поросла лесом, прибрежная часть луговая, затопляется при уровне 600 см. Русло реки прямолинейное, песчаное, деформирующееся. Берега крутые, правым является склон долины, левым – задернованный участок поймы, высотой до 6 м.



Рисунок 1.6 – Гидрологический пост. Постоянная рейка

Река Сояна –д. Сояна. Пост расположен на правом берегу, оборудован металлическими сваями.

Прилегающая к долине реки местность – заболоченная равнина. Долина реки трапецеидальная, шириной до 8 км. Склоны долины высотой 25 – 30 м, пологие, сложены песчаными грунтами, поросли хвойным лесом. Пойма двухсторонняя: левобережная – неровная, заболоченная, поросшая лесом и кустарником, начинает затопляться при уровне 650 см, правобережная луговая, затопляется при уровне 680 см.

Русло реки прямолинейное, песчано-каменистое, устойчивое, у правого берега зарастает водной растительностью. Берега задернованы, высотой 5-6 м, устойчивые. В период весеннего половодья наблюдается подпор уровня от р. Кулой. Подпор прослеживается также при сизигийном приливе[5].

На реке Кулой велись изыскательские работы (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Краткие сведения об изыскательных работах на р. Кулой

Река	Участок	Время обследования	Характеристика проведенных исследований	Организация, проводившая работу
р. Кулой	на всем протяжении	1925 – 26 гг.	маршрутно – глазомерная съёмка	СУВВП
	то же	1927 г.	рекогносцированное обследование	
	от шлюза дос.Домощелья	1927 г.	планово – высотная съёмка (М 1:10000), гидрометрические работы	Гипроводтранс
	на всем протяжении	1929 г.	изыскания для выявления возможностей лесосплава	СПС
	на протяжении 15 км от устья	1929 – 30 гг.	планово – высотная съёмка (М 1:10000)	Сев.порт
	устье на всем протяжении	1943 г.	гидрометрическое обследование по программе ГУМС	Сев. УГМС

1.5 Сведения об уровненом режиме

Как видно из ниже приведенной таблицы 5.1, средний за весь период наблюдений уровень в створе гидрологического поста р. Кулой – д. Кулой 79 см; р. Немнюга- д. Совполье – 125см; р. Сбяна- д. Сбяна – 194 см.

На р. Кулой в створе деревни Кулой высший уровень наблюдался в мае 1929 г. Лето 1937 г. и осень 1938 г. характеризуются почти полным отсутствием стока. Для реки Немнюги и реки Сбяны таким же маловодным был 1980 г.

Таблица 1.4 – Характерные уровни

Период	Средина уровня, см	Высшие			Низшие летне – осенней межени			Низшие зимней межени		
		Уровни	Дата		Уровни, см	Дата		Уровни, см	Дата	
			первая	последняя		первая	последняя		первая	последняя
гидрологический пост р. Кулой – д. Кулой										
1926 – 1988 гг.	70	466	17.05. 1929 г.		-2	29.10	04.11. 1937 г.	-12	19.04. 1938 г.	25.04. 1938 г.
гидрологический пост р. Немнюга – д. Совполье										
1958 – 1986 гг.	125	706	18.05. 1964 г.		48	22.08.	31.08. 1964г.	56	24.10. 1980 г.	
					48	19.08.	22.08. 1960 г.			
гидрологический пост р. Сояна – д. Сояна										
1966 – 1988 гг.	194	800	06.05. 1979 г.		130	31.07.	06.10. 1980 г.	135	24.10. 1980 г.	25.10. 1980 г.
					130	03.08.	26.06. 1986 г.			

1.6 Сведения о жидком стоке

1.6.1 Сток талых вод

Весеннее половодье является определяющей фазой водного режима рек Северного края. В период половодья проходит в среднем 40 – 60% годового стока. В годы с маловодной весной доля весеннего стока может составлять 30-40%, а с многоводный год – увеличиваться до 70 – 80%. Обычно половодье проходит в виде одной чётко выраженной волны стока, на спаде несколько

сглаженной (в начале спада) и осложнённой дополнительными пиками к концу половодья [5].

Весеннее половодье начинается на рассматриваемой территории в среднем в конце апреля – начале мая. В годы с ранней или поздней весной сроки могут сдвигаться относительно средних дат на 20 – 30 дней. Наиболее раннее половодье наблюдалось на р. Кулой в 1948 г., а наиболее позднее 20 мая 1941 г. (Приложение А).

Максимум весеннего половодья проходит, как правило, во вторую декаду мая. Средняя продолжительность половодья составляет 48 дней. Заканчивается половодье обычно в середине июня. Наибольшие расходы воды за половодье, являются одновременно и наибольшими за год.

Зависимость максимального стока от площади водосбора выражена на территории Северного края менее резко, чем в более южных районах. Коэффициент редукции максимального стока по площади равняется 0,17. Степень изменчивости максимального расхода воды, характеризуемая коэффициентом вариации, составляет 0,3 – 0,7.

Сток весеннего половодья реки Кулой и её притоков сравнительно невысок, что связано с закарстованностью бассейна. Наибольший слой стока отмечен в 1952 г. – 255 мм на р. Кулой, в 1964 г. – 185 мм на р. Немнюге, в 1981 г. – 129 мм на р. Сояна.

За последние годы самые многоводные половодья наблюдались в 1952 г., 1964 г., 1981 г. Наименьший весенний сток отмечен в 1960 г. и 1967 г. (Приложение А). Измерениями расходов освещён диапазон изменения водности от 97% до 3 %.

Основным фактором, определяющим величину весеннего стока, являются снегозапасы и их колебания от года к году. Запас воды в снеге к началу снеготаяния в среднем составляет 180 мм.

Помимо снегозапасов на величину весеннего стока оказывают влияние жидкие осадки, выпадающие в период снеготаяния и после схода снежного

покрова. Слой дождевых осадков, выпавших в период снеготаяния, в среднем составляет 20 – 30 мм, в отдельные годы достигая 40 – 70 мм.

Дождевые осадки, выпадающие после схода снежного покрова, увеличивают суммарный объём стока за половодье в среднем на 10 – 30%. Иногда дождевые осадки в этот период отсутствуют, но в отдельные годы величины дождевого стока в период половодья составляют 40 – 50%.

1.6.2 Дождевые паводки

Дождевые паводки на территории Северного края наблюдаются в период с мая по ноябрь, причём количество их изменяется в разные годы от 1 – 2 до 3 – 4. По величине максимального расхода и слоя стока дождевые паводки в несколько раз меньше снеговых, но в отдельные годы с низким весенним половодьем дождевые максимумы на малых реках превышают снеговые [5].

Дождевые паводки проходят на разных реках неодновременно, но в отдельных случаях охватывают обширные районы.

Для реки характерны паводки, вызываемые дождями значительной продолжительности (5 – 10 суток и более). Величины суточных максимальных осадков достигают 50 – 70 мм.

Величина максимальных расходов воды за паводок и объём паводочного стока зависят от слоя осадков за дождь и его интенсивности, но также – от предшествующей дождю увлажнённости бассейна.

В некоторые годы большие дожди в течение летнего периода не приводят к образованию стока, а дожди, выпадающие весной или осенью и равные по своей интенсивности летним ливням, вызывают более высокие паводки.

Наибольшие в году дождевые паводки наблюдаются обычно в июне – июле и в октябре. Связано это не только со значительным количеством осадков, выпадающих в эти периоды, но и с повышенной увлажненностью

почво-грунтов после прохождения весеннего половодья (в июне) или после серии обложных дождей (в октябре) (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Наибольшие в году единичные дождевые паводки

Год	Предпаводочный расход и дата		Наибольший расход и дата		Дата окончания паводка	Продолжительность слоя стока, мм			Слой за весь паводок, мм	Слой стока до пика паводка, мм
	Q , м ³ /с	Дата	Q , м ³ /с	Дата		Подъёма	Спада	Общая		
р. Кулой – д. Кулой										
1980	4,6	18.09	7,46	27.09	7.10	9	11	20	3,70	2,08
1981	20,1	6.09	84,4	10.09	20.09	4	10	14	28,0	7,36
1982	11,2	18.09	16,7	21.09	27.09	3	6	9	4,59	1,71
1984	36,3	27.08	78,1	30.08	3.09	3	4	7	14,7	5,10
1985	34,1	4.10	40,1	9.10	23.10	5	4	9	8,64	4,50
ср.	24,9	-	53,7	-	-	5	8	15	16,3	8,23
<i>max</i> Год	5,65	9.06	140	15.06	21.06	16	19	33	63,9	42,0
д	1969	1960	1960	1969	1969	1960	1962	1962	1960	1960
<i>min</i> Год	4,6	24.10	7,46	6.11	25.11	1963	1970,	1984	3,7	2,08
	1980	1970	1980	1962	1962		1976,		1980	1980
							1984			
р. Сояна – д. Сояна										
1967	66,2	27.10	99,8	3.11	14.11	6	12	18	23,5	7,9
1968	39,0	29.07	57,7	1.08	6.08	3	5	8	6,2	23
1969	44,5	14.07	67,2	18.07	31.07	4	13	17	14,8	34
1970	74,5	26.09	91,6	1.10	6.10	5	5	10	13,0	65
1971	59,4	15.10	81,2	27.10	1.11	12	5	17	19,7	14,0
1972	43,1	25.08	74,2	2.09	10.09	8	8	16	15,0	7,7
1973	-	-	57,9	24.06	-	0	-	-	-	-

Продолжение таблицы 1.5

Год	Предпаводочный расход и дата		Наибольший расход и дата		Дата окончания паводка	Продолжительность слоя стока, мм			Слой за весь паводок, мм	Слой стока до пика паводка, мм
	Q, м ³ /с	Дата	Q, м ³ /с	Дата		Подъёма	Спада	Общая		
1974	38,9	15.09	56,7	8.10	13.10	7	5	12	9,3	5,5
1975	82,2	11.09	143	18.09	3.10	7	15	22	30,0	7,12
1976	57,1	11.09	85,0	26.09	13.10	15	17	32	34,0	9,0
1977	38,4	2.08	48,8	5.08	20.08	3	15	18	12,8	2,6
1978	58,5	20.08	64,4	24.08	27.08	4	3	7	7,49	4,7
1979	30,6	6.09	35,3	27.09	4.10	21	7	28	14,0	10,5
1980	68,6	4.09	75,7	7.09	10.09	3	3	6	6,72	3,0
1981	45,4	15.09	53,0	20.09	25.09	5	5	10	20,7	4,5
1982	68,6	7.09	81,1	9.09	13.09	2	4	6	10,3	2,76
1984	56,2	14.10	70,9	18.10	25.10	4	7	11	12,1	4,98
1985	62,2	25.10	72,6	28.10	2.11	3	5	8	8,3	4,12
1987	54,1	25.07	66,6	1.08	5.08	6	5	11	11,9	8,25
1988	45,6	10.10	53,2	16.10	22.10	6	6	12	10,4	6,33
Сред.	54,0	-	75,6	-	-	6	7	14	13,3	6,06
<i>max</i> Год	82,2	14.07	143	24.06	31.07	21	17	32	34	14
<i>d</i>	1976	1969	1976	1974	1969	1980	1977	1977	1977	1972
<i>min</i> Год	30,6	27.10	35,3	2,3.11	4.11	2	3	6	6,2	2,3
	1980	1967	1980	1967	1967	1984	1979, 1981	1981, 1984	1968	1968

Существенное влияние на характер паводка оказывают озёра. При значительной озёрности речного бассейна снижается максимум и увеличивается продолжительность дождевого паводка, что особенно выражено на водосборах р. Кулой и р. Сояны. В связи с закарстованностью района

паводки также сильно растянуты во времени и незначительны по высоте. Заболоченность и залесённость речных водосборов сильно сказываются на характеристиках речного стока. Однако, ввиду малого диапазона изменения этих факторов по территории, оценить степень их влияния на формирование паводков не удаётся.

Средние величины максимальных модулей стока $10 - 30 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$. Слой дождевого стока за весь период в среднем составляет 15 мм.

1.6.3 Сток летне – осенней межени

Для бассейна р. Кулой период летне-осенней межени начинается в июле и заканчивается в октябре – ноябре.

Встречающиеся паводки не превышают 10 –15% от объёма меженного стока.

Период минимального месячного стока обычно приходится на сентябрь. Постоянным источником питания являются грунтовые (карстовые) воды [1,8].

Средний из минимальных летних расходов р. Кулой–д. Кулой равен $24,1 \text{ м}^3/\text{с}$; р. Сояны – д. Сояна - $37,9 \text{ м}^3/\text{с}$; р. Немнюги– д. Совполье- $73,8 \text{ м}^3/\text{с}$ (Приложение Б).

1.6.4 Сток зимней межени

Зимняя межень длится 5 месяцев, с ноября по апрель. Питание реки в этот период осуществляется за счет карстовых источников, и к концу зимы сток существенно уменьшается. На р. Кулой – д. Кулой средний минимальный зимний расход воды составляет $26,9 \text{ м}^3/\text{с}$, а на р. Сояна – д. Сояна $16,8 \text{ м}^3/\text{с}$. На р. Немнюга – д. Совполье этот минимум составляет $2,32 \text{ м}^3/\text{с}$. Данные о наибольших и наименьших за год расходах воды рек бассейна р. Кулой приведены в Приложении Б. Обобщённые сведения о фазовых экстремумах

жидкого стока по результатам измерений на этих реках представлены в таблице 1.6.

Период наименьшего стока, продолжительностью до 30 суток, приходится на март – апрель.

Таблица 1.6 – Обобщение сведений о жидком стоке по результатам измерений

Пост, период наблюдений	Максимум половодий		Минимум летне- осенней межени		Минимум зимней межени		Средний расход воды
	Q, м ³ /с	Дата	Q, м ³ /с	Дата	Q, м ³ /с	Дата	
р. Кулой – д. Кулой 1926-1988 гг.	931	02.06 1952 г.	14,6	29.10 1937 г.	9,49	08.04 1938 г.	33,4
р. Сояна – д. Сояна 1966-1988 гг.	436	03.06 1971 г.	26,2	23.08 1986 г.	16,8	11.11 1974 г.	50,4
р. Немнюга – д. Совполье 1958-1986 гг.	757	18.05 1964 г.	4,04 4,04	23.08 1967 г. 19.08 1980 г.	1,67	03.03 1986 г.	24,5

1.6.5 Обобщенные сведения о жидком стоке

Анализ данных, приведенных в таблице 1.7, позволяет сделать вывод, что максимальный среднегодовой расход воды наблюдался на р. Кулой – д. Кулой в 1952 г. и составлял 47,2 м³/с, годовой слой стока 489 мм. В минимальный по водности 1938 год слой стока составил 213 мм. Среднемноголетний расход реки в створе деревни Кулой 33,4 м³/с (таблица 1.7).

Общая характеристика колебания водности реки Кулой за многолетие такова:

1. Период с 1933 г. по 1941 г. – маловодный цикл.
2. В последующие годы периодически прослеживается возрастание водности. Заметны небольшие по продолжительности циклы; спад сменяет подъём.
3. Максимальная амплитуда колебаний расхода воды $27 \text{ м}^3/\text{с}$.

На реках Сояна и Немнюга ряд наблюдений недостаточен для выявления цикличности колебаний водности.

Для всех рек характерны синхронные колебания водности.

Таблица 1.7 – Статистические характеристики среднегодового стока

Статисти-ческие характе-ристики	Абсолютные значения	Ср. кв. погрешность, %	Абсолютные значения	Ср. кв. погрешность, %	Абсолютные значения	Ср. кв. погрешность, %
по ряду СНиП						
	р. Кулой – д. Кулой		р. Немнюгад – д. Совполье		р. Сояна – д. Сояна	
Длина ряда n	59		26		20	
Средний расход $Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\frac{33,4}{30,4}$	2,5	$\frac{24,5}{25,9}$	3,21	$\frac{50,4}{55,7}$	2,89
Коэффициент вариации C_V	$\frac{0,19}{0,18}$	9,35	$\frac{0,16}{0,18}$	13,9	$\frac{0,13}{0,18}$	15,9
C_S/C_V	2		2		2	

Примечание: в знаменателе указаны значения, принятые по СНиП 2.01.14 – 83, в числителе – по фактической выборке данных.

Имеющиеся ряды наблюдений (Приложение В и таблица 1.7), были статистически обработаны, определены среднее и экстремальные значения

расходов воды, которые затем сравнивались с соответствующими данными, снятыми с карт Приложения к СНиП 2.01.14 – 83.

По ряду наблюдений были подсчитаны статистические характеристики:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i/n, \quad (1.1)$$

где \bar{Q} – норма годовых расходов воды, м³/с;
 n – расчетный период;
 \bar{q} – среднегодовой модуль стока, л/с·км²:

$$\bar{q} = 10^3 \bar{Q}/F, \quad (1.2)$$

где \bar{q} – среднегодовой модуль стока, л/с·км²;
 F – площадь водосбора, км².

$$C_V = \delta_a/\bar{Q}, \quad (1.3)$$

где C_V – коэффициент вариации;
 δ_a – среднеквадратическое отклонение.

$$\delta_a = \left[\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 / (n - 1) \right]^{0,5}. \quad (1.4)$$

$$\bar{\delta}_{C_V} = C_V \cdot \sqrt{(1 + C_V^2)/(2n)}. \quad (1.5)$$

Соотношение C_S/C_V принято равным 2.

По полученным данным были построены кривые распределения Крицкого – Менкеля, которые наиболее точно совпадают с эмпирическими [10].

По картам Приложения к СНиП 2.01.14 – 83 расчет производился путём интерполяции между изолиниями относительно центра водосбора [13].

Данные Приложения к СНиП 2.01.14 – 83 позволяют определить величину годового стока неизученных рек с точностью в среднем 10%.

1.7 Сток наносов р. Кулой

Определение стока наносов в бассейне реки Кулой не производилось, но имеются расчетные данные по стоку наносов в эстуарии р. Мезени, имеющей единое устьевое взморье с Кулоем и характерный для Кулоя гидрологический режим [4] (рисунок 1.7).

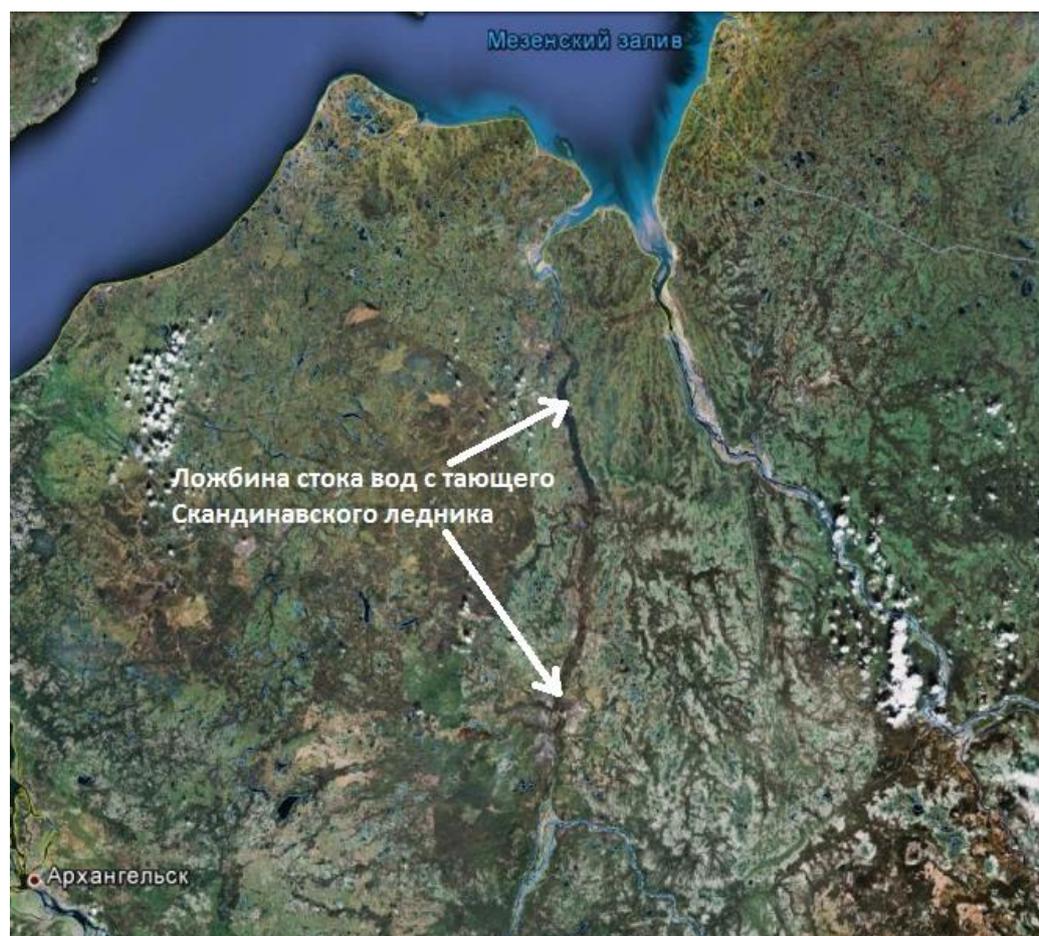


Рисунок 1.7 – Снимок устья рек Кулой и Мезень

Средний годовой расход взвешенных наносов, поступающих в эстуарий р. Мезени, 20 кг/с, что соответствует переносу 0,6 млн. т. наносов в год.

Объём стока р. Мезени составляет 26,4 км³, а на реке Кулой 5,6 км³. Соответственно меньше и сток взвешенных наносов реки Кулой.

Поступление взвешенных и влекомых наносов существенного значения на динамику развития эстуария в данном случае не имеет. Эстуарий

развивается под воздействием приливных течений и транспортируемых ими наносов. Сильные приливо – отливные течения достигают здесь скорости 1,5 – 2,5 м/с.

Течения перемещают наносы различной крупности и создают характерную зону высокой мутности в эстуарии - «пробку мути», ядро которой располагается в 15 – 20 км от устьевого створа. Здесь наблюдается максимальная концентрация взмученных в прилив наносов. Процесс заполнения эстуария наносами продолжается по сей день.

В течение года мутность воды реки Кулой изменяется в значительных пределах. Так, в створе села Долгощелье, расположенном в 30 км от устья (рисунок 1.7), зимой вода имеет прозрачность до 1,5 м, при сходе льда наблюдается резкое возрастание мутности.

Прозрачность в летне – осеннюю межень зависит от величины прилива. Во время малой воды она составляет 0,5 м. В сизигийный прилив уменьшается до нуля.

В створах деревень Немнюга и Кулой количество наносов в течение года практически не меняется, из-за отсутствия влияния прилива. Кроме того, на этих участках рек Немнюга и Кулой преимущественно питаются грунтовыми и подземными водами, лишёнными взвешенных наносов. В деревне Сояна наблюдается увеличение мутности при сизигийном приливе в Мезенской губе.

1.8 Гидрохимическая характеристика воды р. Кулой

Постоянного контроля химического и минерального состава воды реки Кулой не ведётся, но в материалах Государственного водного кадастра приведены общие сведения о гидрохимических характеристиках речной воды [12].

Воды рек бассейна Белого моря различаются по химическому составу и величине минерализации. Для р. Сояны характерны менее минерализованные

воды гидрокарбонатно – кальциевого состава. В зимний период минерализация вод этих рек составляла 220 – 483 мг/л, весной – снижается до 129 – 344 мг/л. Для рек Кулой и Сотка, протекающих по районам гипсоносных толщ, характерна более высокая минерализация. Максимальных значений минерализация достигает в зимний период: р. Кулой – д. Кулой 2400 мг/л; р. Сотка – д. Разитина 2200 мг/л; летом, соответственно, 1090 и 1020 мг/л. В период весеннего половодья минерализация снижается до 164 – 172 мг/л, в летне-осенний период 490-790 мг/л. По химическому составу вода рек Кулой и Сотка (во все фазы водного режима) относится к сульфатному классу группы кальция.

По показателю жесткости в течение года воды р. Сояна характеризовались как умеренно жесткие (3,64 – 6,08 мг/л). В реках Кулой и Сотка вода в летнюю межень и осенью была преимущественно очень жесткая (9,79 – 34,1 мг/л), весной мягкая (2,20 – 2,40 мг /л).

Кислородный режим на реках был удовлетворительный, процент насыщения не опускался ниже 54%. Организованных сбросов загрязняющих веществ в реки не осуществляется. Уровень загрязнённости речной воды в целом невысокий.

Вблизи устьевого створа величина солёности изменяется в широких пределах 13 – 29 ‰. Весной она уменьшается, а летом увеличивается.

Устьевая зона характеризуется условиями сильного перемешивания. Продольные градиенты солёности составляют 1 – 2‰ на 1км. Галоклин продвигается вверх по течению на расстояние до 25 – 30 км. Следствием этого являются значительные колебания солёности за приливной цикл [4].

1.9 Термический режим р.Кулой

На реке Кулой – д. Кулой температура воды измеряется с апреля по ноябрь, т.е. с момента очищения русла до ледостава на реке. Среднемесячный

максимум температуры наблюдается, как правило, в июле и не превышает 12°C. Наибольший прогрев речной воды был зафиксирован в июне 1948 г. и составил 19.2°C.

На устьевом участке самая ранняя весенняя дата перехода воды через 0°C была зафиксирована 29.03.1975 г., а самый ранний переход через 0°C осенью – 14.10.1946 г.

Средняя дата перехода температур через 0°C на устьевом участке весной – в середине апреля, осенью – в середине ноября.

На рр. Немнюга и Сояна, даты перехода температуры воды через 0°C весной наблюдаются несколько позднее, чем на р. Кулой. Самый ранний переход был зафиксирован 26.04.1960 г., а поздний – 31.05.1971 г. Средняя дата перехода – середина мая.

Переход воды через 0°C на реках Немнюга и Сояна осенью – в конце октября. Максимум температуры на этих реках наблюдался в 1968 г. и составлял на р. Немнюга – 27.2°C, на р. Сояна – 22.6°C. В среднем термический режим рек одинаков.

Факт получения показаний температуры воды ниже 0°C объясняется высокой минерализацией водной массы в холодный период. Повышенная минерализация – свидетельство обильного подземного питания рек.

1.10 Ледовый режим р. Кулой

Ледообразование на р. Кулой обычно начинается в конце октября. Ледяной покров устанавливается во второй половине ноября. После суровой зимы в марте толщина льда достигает 90 см.

Зим с отсутствием льда не наблюдалось. Устье реки замерзает ежегодно. Сильные приливо – отливные течения препятствуют быстрому установлению ледостава. На границе между припаем и дрейфующим льдом формируются «ледяные плотины», блокирующие устьевой участок реки.

Вскрытие реки происходит в апреле – начале мая. Интенсивный ледоход в створе деревни Кулой не наблюдается; лёд здесь тает на месте.

В устье вскрытие реки, как правило, происходит бурно и сопровождается заторами льда.

2 РАСЧЕТ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ПОЛОВОДЬЯ В БАССЕЙНЕ Р. КУЛОЙ

2.1 Оценка состоятельности формул для расчета максимального стока половодья

Исходным материалом для характеристики максимального стока послужили результаты наблюдений на гидрологической сети Северного управления. Данные по стоку рек имеются на р. Кулой с 1927 г., на р. Сояна – с 1967 г. Параметры стока были получены непосредственно по рядам. Точность определения \bar{Q} по фактическому ряду оценивается среднеквадратическими погрешностями:

$$\delta = \pm \frac{100 C_V}{\sqrt{n}} . \quad (2.1)$$

Среднеквадратическая погрешность расчёта коэффициента вариации C_V при той же длине ряда определяется как:

$$\delta_{C_V} = \frac{100 \cdot \sqrt{1 + C_V^2}}{\sqrt{2n}} . \quad (2.2)$$

Допустимая погрешность – 15 – 20%.

Параметры интегральных распределений максимального стока определены исходя из наилучшего соответствия эмпирическим данным. При расчете максимальных расходов весеннего половодья различной обеспеченности использовано трёхпараметрическое гамма-распределение. Возможную погрешность полученных максимальных расходов воды можно оценить в $\pm 5 - 10\%$ [10].

Результаты расчёта средних значений максимальных расходов воды рек бассейна р. Кулой приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 – Статистические характеристики максимальных расходов

ПОЛОВОДЬЯ

Статистические характеристики	Абсолютные значения	Ср. кв. погрешность, %	Абсолютные значения	Ср. кв. погрешность, %	Абсолютные значения	Ср. кв. погрешность, %
	р. Кулой – д. Кулой		р. Немнюга – д. Совполье		р. Сояна – д. Сояна	
Объём выборки	60		27		19	
Средний расход \bar{Q} , м ³ /с	265	9	334	6,4	283	7,2
Коэффициент вариации C_V	0,67	10	0,33	14	0,31	17
C_S/C_V	2		2		2	

Примечание: показатель коэффициента асимметрии определён по аналогии с характеристиками максимального стока изученных малых и средних рек Северного края; в итоге, отношение C_S/C_V примерно равняется 2.

2.2 Расчет максимального стока при отсутствии данных наблюдений

При отсутствии данных наблюдений слой среднемесячного стока определяется по карте нормы весеннего стока. Карта изолиний позволяет с практически достаточной точностью ($\pm 15\%$) определять величину нормы стока. Исключение составляют карстовые реки, для которых характерны большие потери талых вод в значительных карстовых образованиях.

Коэффициент вариации для слоя стока составляет 0,4.

Для расчета максимальных расходов неизученных рек

Северного края принята эмпирическая редуционная формула Соколова — Воскресенского [5].

При сопоставлении максимальных модулей стока, полученных по ряду и вычисленных по формуле, различия в значениях не должны превышать $\pm 15\%$ (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Максимальные расходы воды половодья, рассчитанные при отсутствии и наличии данных наблюдений

	C_s/C_v	C_v	0,1	1,0	2,0	5,0	10	25	$\frac{\Sigma\delta}{n} 100\%$
р. Кулой — д. Кулой									
$Q_{\text{набл.}}$	2	0,67	1150	840	792	609	503	358	
$Q_{\text{расч.}}$	2	0,3	1128	919	870	746	658	537	
Погрешность, %			1,9	9,4	9,8	22	31	50	21
р. Сояна — д. Сояна									
$Q_{\text{набл.}}$	2	0,39	605	506	492	430	390	331	
$Q_{\text{расч.}}$	2	0,3	992	824	798	696	635	533	
Погрешность, %			64	63	62	62	21	18	48
р. Немнюга — д. Совполье									
$Q_{\text{набл.}}$	2	0,33	908	638	594	534	484	401	
$Q_{\text{расч.}}$	2	0,3	966	787	745	639	563	460	
Погрешность, %			6	23	25	19	16	15	17

Для карстовых рек характерен пониженный естественный сток, поэтому отклонения от полученных по формуле значений достигают 40%.

При расчете максимальных расходов паводка заданной обеспеченности по данным наблюдений и по формулам установлено, что расчет по формуле, специально подобранной для карстовых районов, наиболее точно соответствует данным, полученным с использованием результатов наблюдений.

Погрешности находятся в допустимых пределах.

Действительный сток р. Кулой и ее притоков, так же, как и максимальный сток весеннего половодья, формально несколько занижен, по сравнению с расчётными показателями.

Распределение модулей максимального дождевого стока по площади неоднородно: 15,2 л/с·км²; 19,3 л/с·км²; 12,9 л/с·км².

2.3 Испытание формул для расчета статистических характеристик максимальных расходов дождевых паводков заданной обеспеченности

Исходным материалом послужили ежегодные данные о наибольших паводках с даты окончания весеннего половодья до появления ледяных образований.

За дату начала паводка принималась дата, предшествующая заметному увеличению стока, а за окончание паводка— дата, соответствующая расходу воды, равному предпаводочному.

Для получения значений максимальных расходов и слоев дождевого стока различной обеспеченности произведена статистическая обработка материалов наблюдений (таблица 2.3).

Поскольку из-за неравномерности выпадения осадков дождевые паводки на описываемой территории проходят асинхронно, удовлетворительные связи между характеристиками паводков даже на соседних реках, как правило, отсутствуют. Это мешает возможности приведения параметров кривых обеспеченности дождевого стока к длительному периоду.

Таблица 2.3 – Статистические характеристики максимального дождевого стока

Статистические характеристики	Абсолютные значения	Ср. кв. Погрешность, %	Абсолютные значения	Ср. кв. Погрешность, %	Абсолютные значения	Ср. кв. Погрешность, %
	р. Кулой – д. Кулой		р. Немнюга – д. Совполье		р. Сояна – д. Сояна	
Длина ряда n	54		27		20	
Средний расход \bar{Q} , м ³ /с	46,4	5,38	55,7	10,0	71,7	7,10
Коэффициент ариации C_V	0,39	10,2	0,49	15,0	0,32	15,0

Примечание: показатель коэффициента асимметрии определён по аналогии с характеристиками максимального стока изученных малых и средних рек Северного края.

Представленная таблица демонстрирует, что при наличном объёме исходной информации о дождевых паводках эмпирические и расчётные оценки не могут быть признаны вполне однородными в отношении дождевого стока р. Немнюги – д. Совполье.

Результаты измерений и расчётов максимальных расходов дождевого стока различной обеспеченности приведены в таблица 2.4

Таблица 2.4 – Максимальные расходы воды дождевого стока, полученные при наличии и отсутствии данных наблюдений

	$\frac{C_S}{C_V}$	C_V	0,1	1,0	2,0	5,0	10	25	$\frac{\Sigma\delta}{n}$
р. Кулой — д. Кулой									
$Q_{\text{набл}}$	2	0,39	123	98,4	94,6	79,8	70,5	56,5	
$Q_{\text{ф}}$	2	0,4	153	107	97,5	81,2	70,1	53,4	
δ_* %			24	8,7	3,0	1,7	0,6	5,4	7,2
р. Сояна – д. Сояна									
$Q_{\text{набл}}$	2	0,32	164	135	130	113	102	85,3	
$Q_{\text{ф}}$	2	0,4	229	164	139	119	98,5	78,0	
δ_* %			39	21	6,9	5,3	3,4	8,5	14
р. Немнюга – д. Совполье									
$Q_{\text{набл}}$	2	0,39	179	137	131	107	92,4	71,3	
$Q_{\text{ф}}$	2	0,4	148	103	89,7	76,5	63,3	50,1	
δ_* %			17	19	23	21	25	24	21

Как видим, наибольшие погрешности расчётов максимальных расходов дождевого стока на реках Кулой и Сояне имеют место в случаях редкой повторяемости, а на р. Немнюге – д. Совполье – практически во всём диапазоне изменения водности.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ СТАНДАРТНЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИНИМАЛЬНОГО МЕСЯЧНОГО СТОКА НА ПРИМЕРЕ РЕКИ КУЛОЙ

Применительно к низкому стоку, основное значение имеет обеспеченность последних членов ряда, поскольку в большинстве случаев расчет ведется в диапазоне обеспеченности 75 – 97%, характеризующем наиболее напряжённые по водности годы.

Обеспеченность рассчитывается

$$P = \frac{m}{n + 1} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

где m – порядковый номер расхода в убывающем ряду [9];

n – объём выборки.

Ряды представлены минимальными месячными расходами, размещёнными в порядке убывания.

Основной характеристикой изменчивости водных ресурсов рек является среднеквадратическое отклонение значений расходов от среднего за n лет

$$\delta_Q = \pm \sqrt{\frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^{i=n} (Q_i - \bar{Q})^2}. \quad (3.2)$$

К статистическим характеристикам минимального жидкого стока относятся коэффициент вариации C_V и коэффициент асимметрии C_S .

Коэффициент вариации характеризует колебания величин стока относительно их нормы и определяется непосредственно по ряду наблюденных значений:

$$C_V = \delta_0 / \bar{Q}. \quad (3.3)$$

Коэффициент асимметрии характеризует несимметричность распределения величин стока. Расчёт этого параметра требует

продолжительности наблюдений порядка 100-150 лет. По имеющимся рядам можно определить лишь приближённое значение C_S :

$$C_S = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n=1} \frac{(K_i - 1)^3}{C_V^3}, \quad (3.4)$$

где K – модульный коэффициент $K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$.

По приведенным выше формулам были рассчитаны статистические характеристики, а затем подобраны теоретические кривые обеспеченности, соответствующие эмпирическим распределениям (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Статистические характеристики меженного стока и погрешностей его определения

Летне – осенняя межень	Статистические характеристики						
	Q_0	δ_{Q_0}	$\delta_{n\%}$	C_V	$\delta_{C_V\%}$	C_S	$\delta_{C_S\%}$
Зимняя межень							
р. Кулой – д. Кулой	22,2	6,99	3,4	0,27	9,40	1,10	31
	17,4	2,30	1,7	0,13	9,20	-0,52	–
р. Немнюга– д. Совполье	11,1	5,54	9,7	0,50	13,0	1,30	47
	2,87	0,57	3,8	0,20	14,0	-0,24	–
р. Сояна – д. Сояна	41,4	11,6	6,1	0,28	16,0	1,50	53
	27,2	7,89	6,3	0,29	16,0	-0,08	–

Примечание: в числителе приведены значения статистических характеристик, полученных по результатам гидрометрических работ, в знаменателе – расчётные показатели (СНиП 2.01.14 - 83).

Для определения минимального среднемесячного расхода обеспеченностью $P = 80\%$, можно использовать формулу А.М.

Владимирова [10]:

$$Q_{min} = a(F + f)^n, \quad (3.5)$$

где a – параметр, характеризующий увлажнённость района;

F – площадь бассейна реки, км²;

f – средняя по бассейну площадь с отсутствием стока, км²;

n – параметр, характеризующий интенсивность изменения стока с увеличением площади бассейна [11].

Эта формула справедлива для расчёта минимального стока малых рек.

Для средних рек, при подсчете $Q_{80\%}$ применяют карты изолиний стока [11].

При наличии данных наблюдений среднемесячные расходы обеспеченностью 80% могут быть сняты с эмпирических кривых обеспеченности.

Полученные расходы обеспеченностью 80% для вышеприведённых гидрометрических створов сведены в таблице 3.2. Для оценки надёжности расчётных данных были определены значения относительных погрешностей.

Результаты расчетов указывают на возможность применения карт минимального стока ($P = 80\%$) для определения минимальных расходов на реках Кулой и Сояна. Формулой А.М. Владимирова пользоваться не рекомендуется, так как она применима только для малых рек.

В период летне – осенней межени сток рек Кулой и Сояна несколько завышен в сравнении с результатами, полученными при отсутствии данных наблюдений. На р. Немнюге в летне – осеннюю и в зимнюю межень сток завышен, так же, как и на реках Кулой и Сояне за летне – осеннюю межень.

Это свидетельствует о значительном влиянии карта, а также о возможном несовпадении поверхностного и подземного водосборов нар. Немнюге. Распределение стока по площади бассейна реки Кулой неоднородно. Приведём средние за межень модули стока:

Таблица 3.2 – Расчет минимального месячного стока ($P = 80\%$) зимней и летне – осенней межени при отсутствии и наличии данных наблюдений

Расчеты	Минимальный месячный расход воды $P= 80\%$, м ³ /с					
	р. Кулой		р. Немнюга		р. Сояна	
	летне-осенний	зимний	летне-осенний	зимний	летне-осенний	зимний
По ряду данных $P = 80\%$	20,9	13,7	5,20	2,50	33,0	24,0
По карте min стока $P = 80\%$	16,7	15,2	11,1	8,64	30,6	27,8
По формуле	14,6	5,45	13,6	5,14	30,9	10,3

$$q_{\text{р.Кулой л-о}} = 6.87 \frac{\text{л}}{\text{с}\cdot\text{км}^2};$$

$$q_{\text{р.Сояна л-о}} = 5.92 \frac{\text{л}}{\text{с}\cdot\text{км}^2};$$

$$q_{\text{р.Кулой зим}} = 4.50 \frac{\text{л}}{\text{с}\cdot\text{км}^2};$$

$$q_{\text{р.Немнюга зим}} = 0.86 \frac{\text{л}}{\text{с}\cdot\text{км}^2};$$

$$q_{\text{р.Сояна зим}} = 4.31 \frac{\text{л}}{\text{с}\cdot\text{км}^2};$$

Как видим, модуль зимнего стока р. Немнюги существенно отличается от такой же характеристики бассейнов рек Сояны и Кулоя.

3.1 Оценка однородности сведений о годовом стоке на водосборе р. Кулой

Набольшие объёмы выборок среднегодовых расходов воды бассейна р. Кулой имеются для гидрометрических створов:

1. р. Кулой – д. Кулой ($n_K = 59$);
2. р. Немнюга – д. Совполье ($n_H = 26$);
3. р. Сояна – д. Сояна ($n_C = 20$).

Эти сведения легли в основу количественной оценки однородности условий формирования годового стока на водосборе реки Кулой. Применена стандартная методология с использованием критериев Фишера и Стьюдента – Госсета [15].

С целью физической сопоставимости данных о стоке рек различной величины, водность рек выражена в модулях стока. Исходные данные статистической оценки однородности приведены ниже.

Таблица 3.3 – К оценке однородности годового стока

№ п/п	Река – пост	Число лет наблюдений	Площадь водосбора, км ²	Норма годового расхода, м ³ /с	Норма модуля годового стока, л/с·км ²	Коэффициент вариации годового стока	Среднеквадратическое отклонение модуля, л/с·км ²
1	р. Кулой – д. Кулой	59	3040	33,4	11,0	0,19	2,09
2	. Немнюга – д.Совполье	26	880	24,5	8,51	0,16	1,36
3	р. Сояна – д. Сояна	20	5570	50,4	9,05	0,13	1,18

Начнём с оценки однородности дисперсий среднегодового расхода воды р. Кулой – д. Кулой и р. Немнюга – д. Совполье. Эмпирическое значение статистики Фишера равно:

$$F^* = \frac{\bar{S}_K^2}{\bar{S}_H^2} = \frac{2,09^2}{1,36^2} = 2,36. \quad (3.6)$$

При уровне значимости $2\alpha = 10\%$ и числе степеней свободы

$$v_1 = 59 - 1 = 58$$

и

$$v_2 = 26 - 1 = 25$$

критическое значение статистики Фишера составляет $F_{1-\alpha} = 1,78$.

Доверительный интервал вариации показателей статистики Фишера при соблюдении условия однородности

$$1 \leq \frac{\bar{S}_K^2}{\bar{S}_H^2} < F_{1-\alpha}. \quad (3.7)$$

В нашем случае

$$\frac{\bar{S}_K^2}{\bar{S}_H^2} > F_{1-\alpha}. \quad (3.8)$$

Таким образом, при уровне значимости $2\alpha = 10\%$ и числе степеней свободы $v_1 = 58$ и $v_2 = 25$ следует отвергнуть гипотезу об однородности дисперсий среднегодовых расходов реки Кулой в створах д. Кулой и д. Совполье.

Такой же вывод получен при сравнении дисперсий среднегодовых расходов реки Кулой в створах д. Кулой и д. Сояна:

$$F^* = \frac{\bar{S}_K^2}{\bar{S}_C^2} = \frac{2,09^2}{1,18^2} = 3,14.$$

$$v_1 = 59 - 1 = 58;$$

$$v_2 = 20 - 1 = 19;$$

$$2\alpha = 10\% ;$$

$$F_{1-\alpha} = 1,96.$$

Поскольку $F^* > F_{1-\alpha}$, гипотеза об однородности дисперсий отвергнута.

При сравнении исходных данных по гидрометрическим створам р. Немнюга – д. Совполье и р. Сояна – д. Сояна однородность дисперсий среднегодовых расходов была подтверждена:

$$F^* = \frac{\bar{S}_H^2}{\bar{S}_C^2} = \frac{1,36^2}{1,18^2} = 1,33.$$

$$v_1 = 26 - 1 = 25;$$

$$v_2 = 20 - 1 = 19;$$

$$2\alpha = 10\%;$$

$$F_{1-\alpha} = 2,13.$$

Поскольку $F^* < F_{1-\alpha}$, нет оснований отвергнуть гипотезу об однородности дисперсий.

Оценка значимости различия средних показателей годового стока в сравниваемых створах произведена с применением критерия Стьюдента-Госсета. Исходные данные приведены в таблице 3.4.

Как и в предыдущем расчёте, сравним гидрологические показатели средней водности р. Кулой – д. Кулой и р. Немнюга – д. Совполье:

$$\Delta \bar{q} = \bar{q}_K - \bar{q}_H = 11,0 - 8,51 = 2,49 \text{ (л/с} \cdot \text{км}^2\text{)}.$$

Эмпирическая оценка среднеквадратического отклонения этой разности $\Delta \bar{q}$

$$S = \sqrt{\frac{(n_K - 1)\bar{S}_K^2 + (n_H - 1)\bar{S}_H^2}{n_K + n_H - 2}} \text{ – параметр;} \quad (3.9)$$

где $n_K = 59$; $n_H = 26$ – объёмы выборок среднегодовых модулей стока, соответственно, в створах д. Кулой и д. Совполье.

$$S = \sqrt{\frac{(59 - 1) \cdot 2,09^2 + (26 - 1) \cdot 1,36^2}{59 + 26 - 2}} = 1,90 \left(\frac{\text{л}}{\text{с}} \cdot \text{км}^2 \right). \quad (3.10)$$

Выборочное значение статистики Стьюдента-Госсета

$$t^* = \frac{\bar{q}_K - \bar{q}_H}{S} \sqrt{\frac{n_K \cdot n_H}{n_K + n_H}} = \frac{11,0 - 8,51}{1,90} \sqrt{\frac{59 \cdot 26}{59 + 26}} = 5,56. \quad (3.11)$$

При уровне значимости $2\alpha = 10\%$ и числе степеней свободы

$$v = n_K + n_H - 2 = 83,$$

доверительный интервал статистики t при соблюдении условий однородности сравниваемых выборок

$$-1,663 < t_{1-\alpha} < 1,663 .$$

В нашем случае, статистика Стьюдента – Госсета вышла из доверительного интервала: $5,56 > 1,663$.

В результате получаем, что гипотеза однородности среднемноголетних значений годовых расходов в створах д. Кулой и д. Совполье.

Аналогичным образом оценена однородность выборок среднегодовых расходов в створах д. Кулой и д. Сояна:

Разность среднемноголетних модулей стока:

$$\Delta \bar{q} = 11,0 - 9,05 = 1,95 \text{ (л/с} \cdot \text{км}^2 \text{)}.$$

Эмпирическая оценка среднеквадратического отклонения разности $\Delta\bar{q}$:

$$S = \sqrt{\frac{(59 - 1) \cdot 2,09^2 + (20 - 1) \cdot 1,18^2}{59 + 20 - 2}} = 1,906 \left(\frac{\text{л}}{\text{с}} \cdot \text{км}^2 \right). \quad 3.12)$$

Выборочное значение статистики Стьюдента – Госсета

$$t^* = \frac{\bar{q}_K - \bar{q}_C}{S} \sqrt{\frac{n_K \cdot n_C}{n_K + n_C}} = \frac{11.0 - 9.05}{1.906} \sqrt{\frac{59 \cdot 20}{59 + 20}} = 3,95. \quad 3.13)$$

Доверительный интервал статистики t при соблюдении условий однородности сравниваемых выборок

$$-1,666 < t_{1-\alpha} < 1,666.$$

Выборочное значение статистики t^* выходит за пределы доверительного интервала, т.е. гипотеза однородности отвергается.

Сравним выборки среднегодовых модулей стока р. Немнюга – д. Совполье и р. Сояна – д. Сояна:

$$\Delta\bar{q} = \bar{q}_H - \bar{q}_C = 8,51 - 9,05 = - 0,54 \text{ (л/с} \cdot \text{км}^2\text{)}.$$

$$S = \sqrt{\frac{(26 - 1) \cdot 1,36^2 + (20 - 1) \cdot 1,18^2}{26 + 20 - 2}} = 1,27 \left(\frac{\text{л}}{\text{с}} \cdot \text{км}^2 \right).$$

$$t^* = \frac{- 0,54}{1,27} \sqrt{\frac{26 \cdot 20}{26 + 20}} = - 1,428.$$

$$t_{1-\alpha} = 1,68, \text{ доверительный интервал } -1,68 < t_{1-\alpha} < 1,68.$$

В результате расчетов получаем, что выборочное значение статистики Стьюдента – Госсета попадет в доверительный интервал при уровне значимости $2\alpha=10\%$ и объеме сравниваемых выборок $n_H = 26 ; n_C = 20$; $-1,68 < -1,428 < 1,68$.

Следовательно, нет оснований отвергнуть гипотезу об однородности выборок среднегодовых расходов воды в створах р. Немнюга – д. Совполье и р. Сояна – д. Сояна.

Ввиду выявленной неоднородности условий формирования стока на территории бассейна р. Кулой, определение нормы среднегодового расхода в устье реки нуждается в количественном учёте этого обстоятельства.

Наибольший объём данных о расходах воды накоплен применительно к гидрометрическому створу р. Кулой – д. Кулой. Однако, площадь водосбора, замыкаемая этим створом, сравнительно невелика $F_K = 3040 \text{ км}^2$ при общей площади бассейна р. Кулой $F_{\text{общ.}} = 19000 \text{ км}^2$. Механически распространить модуль среднегодового стока в створе деревни Кулой на весь бассейн не представляется допустимым, тем более, что установлена неоднородность условий формирования годового стока водосборе р. Кулой – д. Кулой и в бассейнах главных притоков – Сояны и Немнюги.

Определение годовой нормы расхода воды в устье р. Кулой произведено с учётом расположения гидрометрических створов на реках Немнюга и Сояна: оба гидроствора практически замыкают водосборы этих рек. Поэтому в качестве норм годового расхода приняты среднемноголетние расходы в гидрометрических створах Совполье и Сояна.

Суммарная площадь водосборов р. Кулой – д. Кулой, р. Немнюга – д. Совполье и р. Сояна – д. Сояна составляет

$$\sum_{i=1}^{i=3} F_i = 3040 + 2880 + 5570 = 11490 \text{ (км}^2\text{)}.$$

Не освещённая многолетними наблюдениями часть бассейна р. Кулой равна

$$\Delta F = F_{\text{общ.}} - \sum_{i=1}^{i=3} F_i = 19000 - 11490 = 7510 \text{ (км}^2\text{)}.$$

Расчёт среднемноголетнего модуля стока с водосбора площадью ΔF произведён с привлечением данных о модуле стока на каждой из трёх главных

рек (р. Кулой – д. Кулой, р. Немнюга – д. Совполье и р. Сояна – д. Сояна) и о продолжительности наблюдений в каждом из гидрометрических створов:

$$\bar{q} = \frac{1}{59+26+20} \cdot (59 \cdot 11,0 + 26 \cdot 8,51 + 20 \cdot 9,05) \approx 10,0 \text{ (л/с} \cdot \text{км}^2\text{)}.$$

Соответственно, среднемноголетний расход воды с площади ΔF составляет

$$\Delta \bar{Q} = 10^{-3} \bar{q} \Delta F = 10^{-3} \cdot 10,0 \cdot 7510 = 75,1 \text{ (м}^3\text{/с)}.$$

Норма годового расхода в устье р. Кулой принята равной

$$\bar{Q}_{\text{устье}} = \bar{Q}_{\text{Кулой}} + \bar{Q}_{\text{Совполье}} + \bar{Q}_{\text{Сояна}} + \Delta \bar{Q} = 33,4 + 24,5 + 50,4 + 75,1 = 183 \text{ (м}^3\text{/с)}.$$

Не исключено, что расход воды $\bar{Q}_{\text{устье}}$ несколько завышает водность реки Кулой, т.к. наибольший вес придан среднемноголетнему модулю стока в створе деревни Кулой, тогда как водность в этом створе аномально высока. Возможно, следовало бы придать одинаковый вес модулям стока во всех трёх гидрометрических створах, но при этом была бы потеряна независимая информация за половину продолжительности наблюдений в деревне Кулой.

В дополнение к приведённому расчёту, произведём определение среднемноголетнего модуля стока р. Кулой с привлечением результатов наблюдений на гидрологическом посту р. Сояна –Рыбзавод. Период наблюдений на этом посту с 1956 по 1966 гг. – полных 9 лет.

Среднемноголетний годовой расход за этот период $\bar{Q}_{\text{р.з.}} = 48,7 \text{ м}^3\text{/с}$, а модуль стока, при площади водосбора $F_{\text{р.з.}} = 4870 \text{ км}^2$, составил $\bar{q}_{\text{р.з.}} = 10,0 \text{ (л/с} \cdot \text{км}^2\text{)}$.

Среднемноголетний модуль годового стока р. Сояны, с учётом наблюдений в створе Рыбзавода, составит

$$\bar{q}_C^* = \frac{n_C \bar{q}_C + n_{\text{р.з.}} \bar{q}_{\text{р.з.}}}{n_C + n_{\text{р.з.}}} = \frac{20 \cdot 9,05 + 9 \cdot 10,0}{29} = 9,34 \text{ (л/с} \cdot \text{км}^2\text{)}.$$

Среднемноголетний модуль годового стока с водосбора площадью $\Delta F=7510 \text{ км}^2$ (т.е. с неосвещённой измерениями расходов площади) составляет

$$\bar{q}^* = \frac{1}{59+26+20+9} (59 \cdot 11,0 + 26 \cdot 8,51 + 29 \cdot 9,34) = 10,0 \text{ (л/с} \cdot \text{км}^2\text{)}.$$

Норма годового стока в устье р. Кулой равна

$$\bar{Q}_{\text{устье}}^* = \bar{Q}_{\text{Кулой}} + \bar{Q}_{\text{Совполье}} + \bar{Q}_{\text{Сояна}} + 10^{-3} \bar{q}^* \Delta F = 33,4 + 24,5 + 50,4 + 75,1;$$

$$\bar{Q}_{\text{устье}}^* = 183 \text{ (м}^3\text{/с)}.$$

В итоге, результаты предыдущего расчёта подтвердились, однако неоднородность стокообразования на водосборе реки Кулой очевидна и требует проведения дополнительных исследований и более корректного учёта азональных явлений при определении нормы годового стока в устьевом створе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа гидрологических сведений о водосборе реки Кулой выполнен значительный комплекс расчётов и режимных обобщений.

Определены статистические характеристики стока реки Кулой и его притоков по стандартным схемам СП 33 – 101 – 2003. Ввиду отсутствия Приложений к этому Своду правил, в основном использовались рекомендации СНиП 2.01.14 – 83.

Применение стандартных расчётных схем при оценке гидрологических характеристик реки Кулой затруднено наличием здесь а зональных факторов формирования водности. Наиболее значимым из этих факторов является наличие карста.

Продолжительность наблюдений на реках бассейна р. Кулой невелика, гидрологическая освещённость территории недостаточна. Преобладают малые неизученные реки, для оценки режима которых требуется использование рек-аналогов, тогда как подбор таких аналогов затруднён по причине редкой сети наблюдений.

В ходе исследований удалось применить региональную формулу, позволяющую, по возможности, учесть а зональные факторы, в том числе – закарстованность водосборов.

Распространение карста проявляется, в частности, в несовпадении плановых координат поверхностных и подземных водосборов, особенно на малых реках.

Характеристики среднегодовой водности главных рек бассейна р. Кулой в основном не однородны. Проверка однородности произведена с применением критериев Фишера и Стьюдента – Госсета.

Минимальный сток на водосборах рек Кулой и Сояны несколько повышен за счёт поступления подземной воды из карстовых полостей в меженный период. Минимальный сток на водосборе р. Немнюги,

определённый по данным натурных гидрометрических работ в створе д. Совполье, учитывает существенный отток воды по карстовым образованиям в смежные бассейны.

При расчёте нормы среднегодового стока в устье реки Кулой произведён количественный учёт неоднородности условий формирования водности в бассейне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3 - Л.: Гидрометеиздат, 1972.
2. Справочник по климату СССР. Вып. 1, 2, 3, 4 - Л.: Гидрометеиздат, 1968.
3. Грахов А.Н., Ильина Л.Л. Реки Севера. - Л.: Гидрометеиздат, 1987.
4. Обобщение результатов исследований. Рукопись – М.: МГУ, 1987.
5. Гидрологическая изученность. Т. 3 – Л.: Гидрометеиздат, 1965.
6. Гидрологический ежегодник. Т. 0. Вып. 2, 3, 5, 6, 7 – Архангельск: 1976-1980.
7. Гидрологический ежегодник. Т.1. Вып. 8 - Архангельск: 1980-1988.
8. Основные гидрологические характеристики. Т.3 - Л.: Гидрометеиздат, 1980.
9. Клибышев К.П., Горошков И.Ф. Гидрологические расчеты. — Л.: Гидрометеиздат, 1970.
10. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. - Л.: Гидрометеиздат, 1990.
11. Владимиров А.М. Сток рек в маловодный период года. - Л.: Гидрометеиздат, 1976.
12. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып. 8, 23 — Архангельск: 1990.
13. Приложение к СНиП 2.01.14-83. Атлас расчетных гидрологических карт и номограмм — Л.: Гидрометеиздат, 1983.
14. Сборник задач и упражнений по гидрологическим расчетам — СПб.: Гидрометеиздат, 1992.
15. А.В. Сикан. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации – СПб.,: РГГМУ, 2007.

