



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

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Методы учета стока при
зарастании русла

Исполнитель Галкина Ульяна Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.т.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Векшина Татьяна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.г.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

5» июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Введение.....	2
1 Физико-географическое описание	5
1.1 Географическое описание и общее описание	5
1.2 Рельеф и геология	8
1.3 Климатическая характеристика.....	11
1.4 Атмосферные осадки	11
1.5 Растительный и животный мир	12
1.6 Экологическая ситуация.....	18
1.7 Населенные пункты	20
2 Учет стока.....	22
2.1 Методы учета стока при зарастании русла	22
2.2 Современные методы.	35
3 Анализ результатов расчетов.....	44
Заключение	50
Список литературы	51

Введение

Большинство водотоков, протекающих на территории России, подвержены зарастанию. Развитие водной растительности приводит к вредным последствиям: быстрому заилению и обмелению рек, заболачиванию речных пойм, ухудшению качества воды, затруднению водоснабжения. Значительный ущерб зарастание наносит водному хозяйству и мелиорации. При зарастании каналов затрудняется осушение и орошение вследствие уменьшения пропускной способности каналов. По данным различных авторов зарастание рек сопровождается подпором уровня воды в 0,4 – 0,8 м, а иногда и 1,5 м, что в естественных условиях ведёт к заболачиванию пойменных земель. [4], [5]

Осложняется при зарастании русла и гидрометрический учет стока, так как развитие водной растительности на реках существенно сказывается на гидравлические характеристики потока, таких как: коэффициент шероховатости, площадь живого сечения, средняя скорость течения и др. В результате зарастания уменьшаются скорости течения, появляются «мертвые зоны», косоструйность потока, искажаются эпюры скоростей по глубине и ширине потока, что приводит в конечном итоге к нарушению однозначной устойчивой зависимости расхода воды от уровня и существенному уменьшению пропускной способности русла, т.е. для одного и того же уровня заросшее русло по сравнению со свободным руслом пропускает гораздо меньший расход воды. Кроме того, отсутствие однозначной связи расходов и уровней на зарастающих реках вынуждает производить более частые измерения расходов воды, что, в конечном счете, усложняет и значительно удорожает учет стока.

Недостаток финансирования гидрологической сети в настоящее время влечёт за собой ухудшение качества сбора необходимой информации, в том числе уменьшение количества измерений расхода воды. Многие посты были

закрыты, а на некоторых временно не выполнялись наблюдения. Поэтому актуальной задачей гидрологов сейчас является разработка и апробирование новых методов подсчёта стока, которые будут учитывать изменение пропускных характеристик русла и недостаточное количество измерений расходов воды. Особенную значимость обретает повышение точности учета стока зарастающих водоемов вместе с тем, для того чтобы правильно оценивать, а также давать прогноз их состоянию относительно ландшафта. Непосредственно в данном и заключается цель, реализуемых в Российской Федерации согласно мониторингу водных объектов и программ охраны окружающей среды.

Существующая на сегодняшний день практика учёта стока основана на методических руководствах, разработанных почти полвека назад. Поэтому целью этой работы является апробация современных методик учёта стока при зарастании русла, разработанных на кафедре гидрометрии, таких как: регрессионно-гидравлическая модель и метод интерполяция параметра Великанова. В работе проведены сравнения полученных результатов этих методик с натурными данными.

Для исследований была выбрана река Кан, которая находится в южной части Сибири, с постом расположенным в с. Ирбейское. Анализ графика совмещённых гидрографов, позволяет выявить какой именно способ учёта стока лучше подходит для того или иного периода: межени или дождевого паводка.

1 Физико-географическое описание

1.1 Географическое описание и общее описание

Река Кан - один из больших правых притоков Енисея в южной части Красноярского края. Длина реки Кан составляет 629 км, площадь водосбора 36 900 км². Основные притоки: справа - Агул, слева - Анжа, Большая Уря, Рыбная. Река Кан берет начало несколькими истоками на северных склонах Восточного Саяна, на отрогах хребта Канского Белогорья; до устья реки Кирели проходит в горах, где имеет бурное течение и порожистое русло.



Рисунок 1 – Расположение реки Кан на карте

Ниже долина реки расширяется, скорость течения уменьшается, русло расчленяется на рукава и протоки, образуя острова. (рис.2) Ниже впадения Агула на протяжении 15 км река Кан протекает в пределах Канского лесостепного массива; здесь долина широкая, пойменная, течение реки Кан спокойное.

От города Канска река Кан поворачивает на запад и в 70 км ниже подходит к Енисейскому кряжу. На участке прорыва через этот кряж, протяжением около 140 км, река Кан течет по дну глубокого ущелья. Здесь часты пороги, шиверы, каменистые перекаты; наиболее известны пороги - Комаровский, Косой, Большой. Течение бурное, скорости его достигают 34 м/сек.



Рисунок 2 – Река Кан с высоты птичьего полета

Питание реки Кан смешанное. За две недели до вскрытия начинается подъем уровня воды. Начало весеннего половодья приурочено в среднем к первой-второй декаде мая, в середине июня наблюдается максимум (подъем на 3 – 5 м над меженным уровнем). Спад половодья прерывается дождями. В летне-осенний период по реке проходит несколько дождевых паводков. В конце октября - начале ноября уровни занимают низкое положение, а в начале ледостава несколько повышаются.

Средний расход воды на участке среднего течения равен $100 \text{ м}^3/\text{сек.}$, у города Канска - $244 \text{ м}^3/\text{сек.}$, в устье - $283 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Максимальный расход в нижнем течении около $1200 \text{ м}^3/\text{сек.}$, величина его 1 % - ной обеспеченности составляет около $2500 \text{ м}^3/\text{сек.}$ В маловодные годы сток в реке летом может понизиться до $100 - 110 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Зимой сток воды в реке резко уменьшается, в отдельные периоды средний расход может понизиться до $7 - 8 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Появление первых ледяных образований (сало, шуга, забереги) приурочено к последней декаде октября. Осенний ледоход (шугоход) длится в течение 15 – 20 дней, ледостав обычно наступает в период 5-15/XI. Продолжительность ледостава составляет 150 – 170 дней. В конце апреля река вскрывается и в течение 5 – 8 дней по ней наблюдается ледоход, который показан на рисунке 3. В первых числах мая река Кан очищается ото льда.



Рисунок 3 – Ледоход реки Кан

1.2 Рельеф и геология

Река Кан расположена на территории Восточного Саяна, или Восточно-Саянского нагорья (лесные и гольцовые горы), представляющего собой обширную горную систему (рис.4), простирающуюся с северо-запада на юго-восток от истоков рек Кача и Кемчуг (левобережье Енисея) до р. Иркутта (Тункинского грабена) более чем на 1000 км.

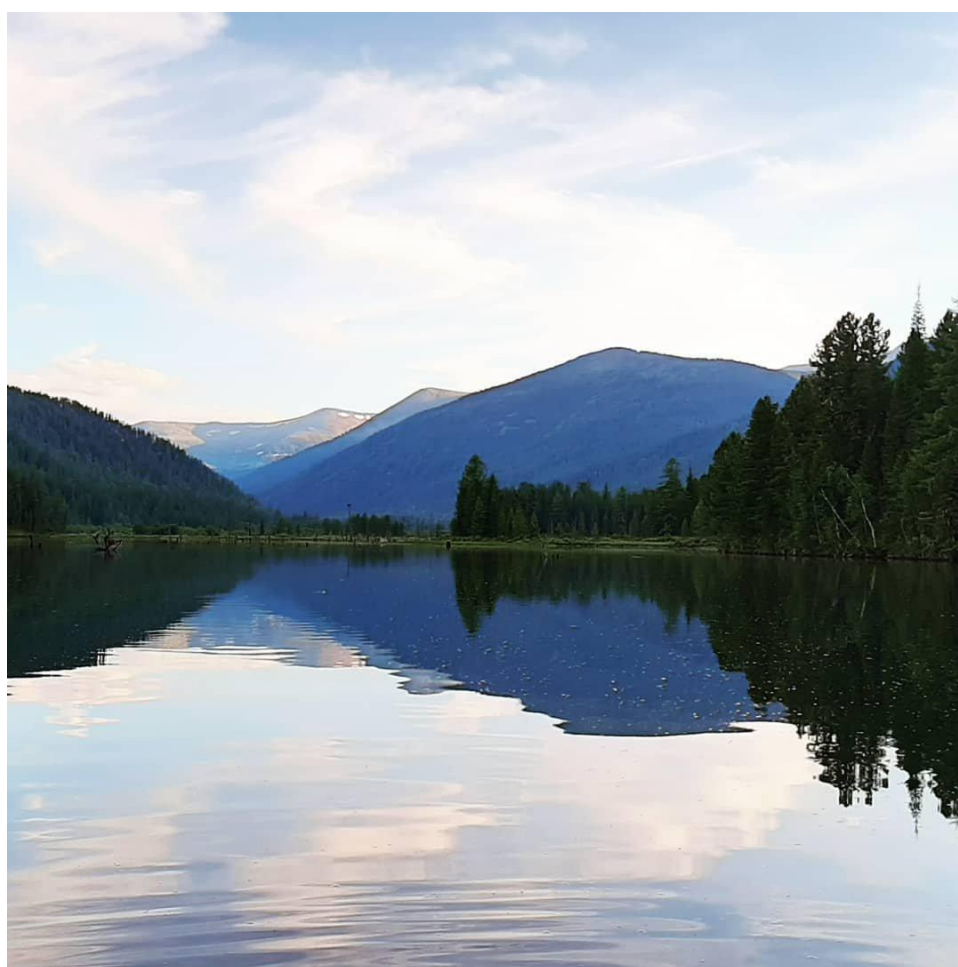


Рисунок 4 – Природа и ландшафт реки Кан

Рельеф Восточного Саяна очень сложный; здесь имеются высокие хребты, плоскогорья, межгорные понижения, глубокие долины, участки, подвергавшиеся в прошлом воздействию ледников, о чем свидетельствуют кары, цирки, троговые долины. Северо-западная часть системы представлена

низкогорьем, где высотные отметки не превышают 800 – 1000 м. К юго-востоку высота гор увеличивается, они расчленяются на плосковершинные хребты, называемые «белогорьями»; известны Манское, Канское, Койское, Идарское с высотами 1500 – 1800 м. Белогорья окаймлены полосой сильно расчлененных эрозионных низких гор. На гребнях и склонах хребтов видны следы деятельности ледников. Северо-западным отрогом Восточного Саяна является Красноярский хребет (450 – 850 м), где по правобережью Енисея расположен заповедник Столбы (47 тыс. га), известный многочисленными, грандиозных размеров, выветренными скалами причудливой формы, которые в совокупности называются столбами.

Большая часть территории Восточного Саяна покрыта горно-таежными хвойными и светлохвойными лесами. По долинам рек растут лиственничные леса. В высокогорном поясе развиты альпийские луга, значительные по площади участки заняты горной тундрой. В нижних и средних частях река Кан подвергается антропогенной нагрузке, применяется в хозяйственной деятельности: лесозаготовки, аграрное производство, индустрия. «Река пересекается Транссибирской (в городе Канске) (рис. 5) и Южно-Сибирской железной дорогой - легендарной «трассой мужества» Абакан-Тайшет (в районе с. Ирбейское), Московским трактом (в городе Канске). Кан - частично судоходная река.» [8]



Рисунок 5 – Транссибирская магистраль

Существенное влияние на формирование стока и распределение его по времени и по территории оказывает геологическое строение речных водосборов.

Река Кан расположена на Сибирской платформе. В строении верхнего структурного яруса, где в основном формируется поверхностный сток бассейна, принимают участие главным образом триасовые образования. Далее на север прослеживаются в виде узкой полосы ордовикские и силурийские отложения, состоящие из доломитов, известняков, песчаников и сланцев.

Четвертичные отложения распространены почти повсеместно и образуют сплошной или разорванный чехол, состоящий из элювиальных, делювиальных и аллювиальных пород.

На юге Сибирской платформы располагается Рыбинская впадина, сложенная маломощными вулканогенными и пестроцветными терригенными

отложениями девона и карбона и пологозалегающими юрскими отложениями, венчающими верхний структурный комплекс пород.

Саяно-Алтайская горно-скульптурная область состоит из сложнодислоцированных образований. Горные сооружения сложены преимущественно древними кристаллическими и метаморфическими породами, в значительной степени выветрившимися с поверхности и хорошо промытыми до уровня вреза речной сети. Из четвертичных отложений в Саяно-Алтайской области развиты аллювиальные и пролювиально-делювиально-элювиальные отложения предгорных равнин и погребенных речных долин. В межгорных котловинах этой области, в днищах широких долин залегают пески с галькой и глиной в виде слоя мощностью до 30 м.

1.3 Климатическая характеристика

Климат района отличается резко выраженной континентальностью. Наблюдаются довольно суровые зимы, а летние месяцы непродолжительны. Суточная амплитуда колебаний температуры воздуха достигает 10—20 °С.

Перенос воздушных масс обычно осуществляется в направлении с запада на восток, однако временами наблюдается выходы циклонов с юга или юго-запада, обуславливающие обильные осадки.

1.4 Атмосферные осадки

Максимальное число осадков падает в июле, средняя многолетняя величина их изменяется от 50 до 200 мм.

Минимальное число влажности выпадает в зимнее время – в январе – феврале, когда формируется антициклон.

В теплое время осадков выпадает больше, нежели ли в холодный период. Холодный период охватывает время с ноября по март, а теплый – с апреля по октябрь. Жидких осадков падает более (60 – 70 %), нежели твердых, а также смешанных. Годичное число осадков является 1000 – 1500 мм.

1.5 Растительный и животный мир

Река Кан расположена в лесостепной зоне, представленной разобщенными массивами Красноярской и Канской лесостепи.

Южная подзона тайги характеризуется развитием травянистых типов темнохвойных лесов с преобладанием пихты. С продвижением к западной границе бассейна в связи с усиливающейся увлажненностью травянистые леса уступают место лесам таежного типа. В них развивается почти сплошной, но не мощный моховой покров из зеленых мхов, сочетающихся с сфагновыми мхами. В долинах рек на песчаных террасах развиты типы травянистых сосновых боров.

Темнохвойные травянистые леса постепенно сменяются к югу смешанными лесами с преобладанием березы и осины, под пологом которых развивается подрост из темнохвойных пород.

Среди других хвойных древесных пород выделяется кроной-свечкой пихта сибирская, долгожительницей наших лесов является ель сибирская. Растёт лиственница сибирская, берёза, осина, тополь, липа сибирская (рис. 8), рябина, черёмуха. «Во влажных лесах растёт чёрная и красная смородина, ольховик кустарный, жимолость. В лесах, на полянах нас радуют зелень и цветы трав – медуницы, пустырника, подснежников, жарков, лилий, башмачков, папоротника.» [9]

Обитало большое количество животных: белки, соболи, куницы, бурые медведи, черные лисы (рис.6), суслики и черная норка. «В XIX веке правила охоты соблюдались строго, на охоту ходили в период миграции лесных зверей. В октябре звери уходили в кедровые рощи горных хребтов в верховьях реки Кан. Тысячи белок и летяг - голубых, рыжих и чёрных совершали переход по вершинам деревьев. Можно было увидеть сразу до десяти зверьков на одной сосне. Во время миграции животные переплывали через реку Кан.» [9]



Рисунок 6 – Черная лиса

В реке Кан множество разных видов рыб. Но в последние года сильное воздействие на ихтиофауну оказывает хозяйственная деятельность человека. «Зарегулирование стока рек и создание в бассейне Енисея четырех крупных водохранилищ сыграло огромную роль в изменении привычных условий обитания рыб.» [9] Уменьшилась водность, сократился летний тепловой сток, снизились летние температуры, изменилась скорость течения, глубины, кормовая база. Все эти изменения отрицательно повлияли на условия обитания рыб в реке Кан. Численность рыб значительно снизилась. Но в реке

Кан все равно обитают такие рыбы как: окунь, пескарь, щука, елец, налим, таймень(рис.7) и стерлядь (рис.13).



Рисунок 7 – Рыба таймень

Флора лесов бассейна Кана богата и разнообразна. «В лесах растет сосна обыкновенная, сосна сибирская, пихта, лиственница, береза, осина, тополь, липа сибирская (рис.8), рябина, черемуха, красная смородина, ольховик кустарник, жимолость, а также множество зелени и цветов.» [9]

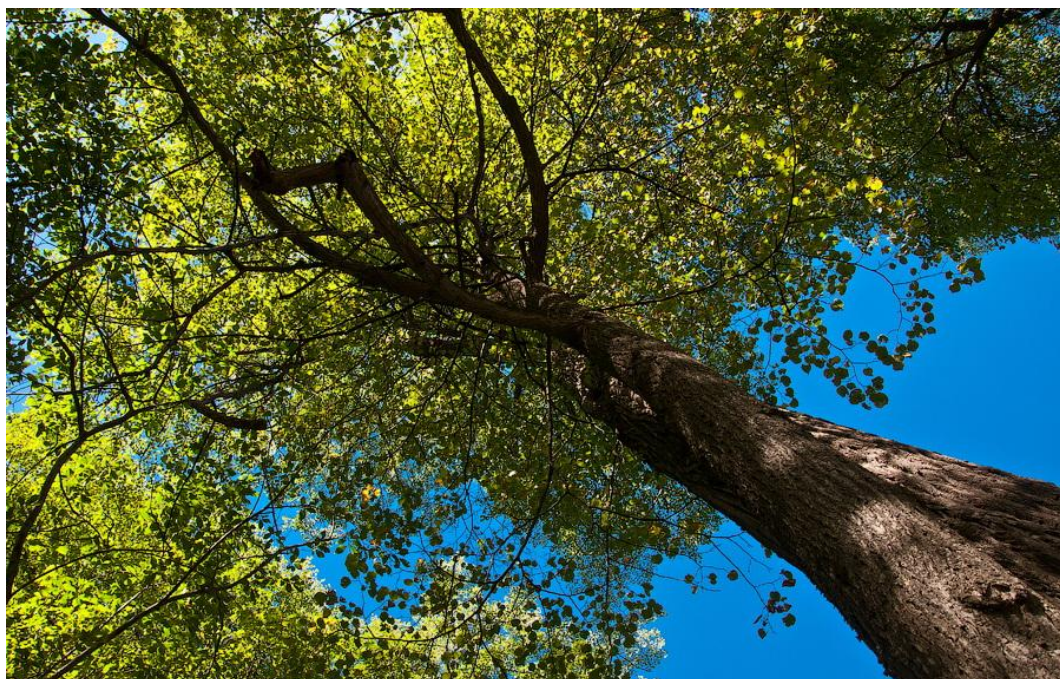


Рисунок 8 – Липа сибирская

Растительный мир бассейна реки Кан очень разнообразен и насчитывает около 3000 видов растений из них 183 вида растений, занесённых в Красную книгу Красноярского края и России: венерин башмачок, адонис сибирский, Марьин корень и другие растения. [9]

«Цветок, который мы называем просто подснежником, занесённый в Красную книгу Красноярского края. Маленькие чашечки сон-травы напоминают пушистый тюльпан. Цветет сон-трава даже при нулевой температуре воздуха, что для другого цветка холодно.» [9]

В бассейне реки Кан отдельные виды животных, например, сибирский горный козел (рис.9) и красный волк (рис.10) и др., находятся под угрозой исчезновения, потому что становятся объектами запрещённой охоты.



Рисунок 9 – Сибирский горный козел



Рисунок 10 – Красный волк

На берегу реки Кан живёт выдра (рис. 11). Из-за плохой экологической ситуации численность выдр уменьшилась.

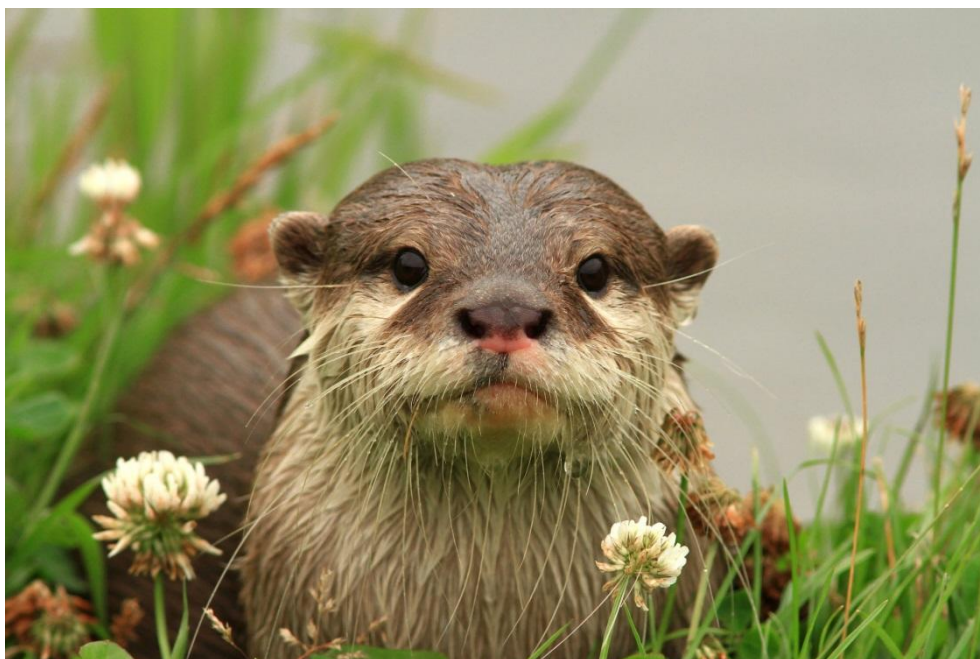


Рисунок 11 – Выдра

Одной из редких птиц, которая обитает на территории реки, является «сапсан» – крупный хищный сокол. (рис. 12). «Причины вымирания сапсана: - его отстрел, как хищника, уничтожающего домашнюю птицу; - гибель сокола из-за использования на полях ядовитых средств для борьбы с сорняками; - вывоз редкой птицы за границу в арабские страны для охоты.» [9].



Рисунок 12 – Сапсан

Ключевые обстоятельства вымирания рыбы Стерлядь – постройка Красноярского и Саяно-Шушенского водохранилищ и ловля рыб в большом количестве. Стерлядь – занесена в Красную книгу Красноярского края (рисунок 13).



Рисунок 13– Стерлядь

1.6 Экологическая ситуация

С целью предоставления жителям населенных пунктов Красноярского края питьевой воды используют поверхностные источники, в список которых входит река Кан. В большинстве случаев эти воды имеют неблагоприятный микробиологический признак качества и недостаточно изучены в санитарно-токсикологическом отношении. Хозяйственная деятельность людей стала оказывать негативное воздействие на природу. Истощение окружающей среды в результате нерационального природопользования, загрязнение ее твердыми, жидкими и газообразными отходами, а также и химическими и радиоактивными веществами привели к значительной деградации экологической системы. Это коснулось и реки Кан (рис. 14).

Местность реки используются в сельском хозяйстве. Осуществляются вырубки леса, в следствии чего практически поменялся климат, режим грунтовых вод. «Как следствие изменялся гидрологический режим рек – с 1950-х годов отмечено увеличение весеннего стока в среднем на 17 % и уменьшение минимального летнего стока на 20 %.» [32]

В Красноярском крае в 2010 г. качество воды, согласно санитарно-химическим нормам, по сравнению с предыдущим годом, значительно ухудшилось. «Доля проб, не отвечающих гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям, увеличилась с 18,2 до 25,6 %; по микробиологическим показателям - с 4,6 до 12,4 %.» [34]

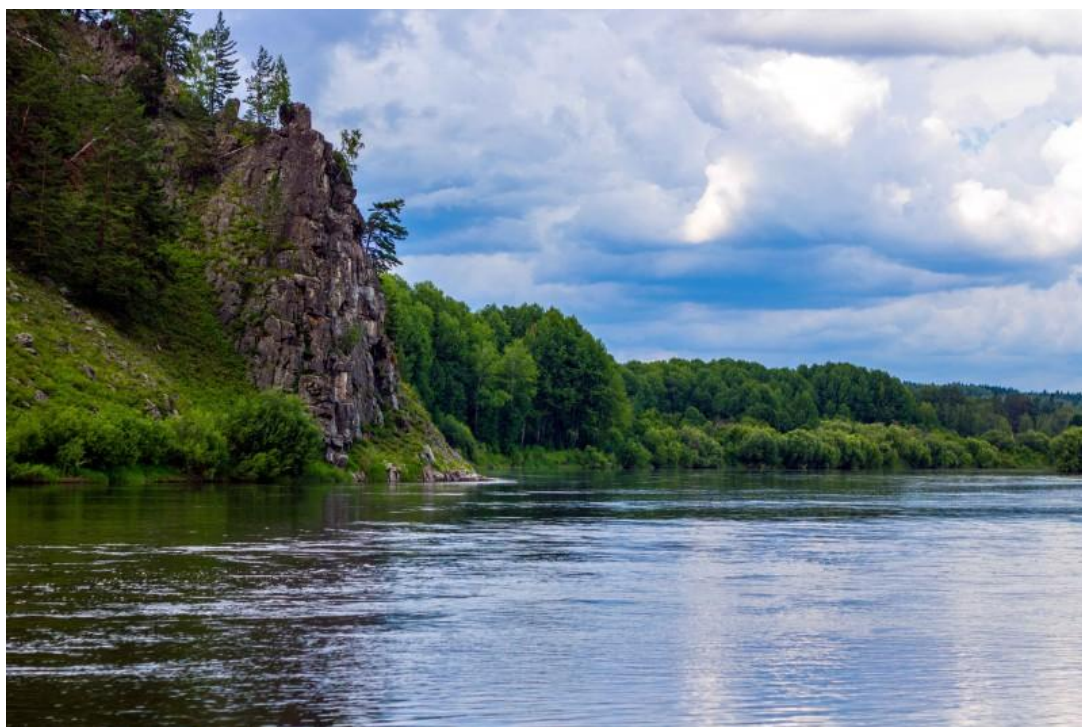


Рисунок 14 – Река Кан

Помимо засорения водотоков промышленными, аграрными и бытовыми стоками, по всей местности водоема и прослеживается огромное число неуправляемых свалок мусора в долине, а также в пойме реки и на всем ее протяжении.

1.7 Населенные пункты

В древние времена на побережье реки жили котты и камасинцы (рис.15), общавшиеся на кельтском. Славянское население поселилось здесь со строительством Красноярской тюрьмы в 1628 году. В первой половине 18 века людей сюда тянуло больше. «Сегодня на здешних берегах люди живут в небольших населенных пунктах: Саянский район, Ирбейский (села Ивановка, Александровка).» [12]



Рисунок 15 – Племена камасинцев

«Также много жителей в деревнях Орье, Юдино, Кан-Ауклере. Географическое положение этой местности находится в руках ее жителей, поэтому Канский район особенно плотно заселен. Город Канск (рис.16) занимает четвертое место по количеству жителей в регионе. Наибольший упор делается на пищевую и легкую промышленность.» [12]



Рисунок 16 – Город Канск

2 Учет стока

«Сток воды – одно из основных и наиболее широких понятий гидрологии суши. Как одна из наиболее важных характеристик водных ресурсов, сток воды выражает количество воды, протекающее в створе за единицу времени: сутки, декаду, месяц, год. Выражается в осредненных за эти периоды значениях расходов воды в $\text{м}^3/\text{с}$ или км^3 .» [14]

«Гидрометрический учет речного стока предполагает получение его гидрографа как непрерывной функции времени по данным дискретных измерений расходов воды и практически непрерывных (ежедневных) наблюдений за уровнями.

В случае однозначного соответствия расходов Q и уровней H задача сводится к определению ежедневных расходов воды (ЕРВ) с использованием кривых расходов (КР) или её аналитической аппроксимации $Q(H)$.» [11]

В результате расхождения связи, которая определяется колебаниями пропускной способности русла под воздействием различных факторов, включая зарастание, появляется необходимость применять интерполяцию к характеристикам пропускной способности между измеренными расходами.

2.1 Методы учета стока при зарастании русла

Зарастание рек, как правило, сложный процесс, его развитие обусловлено совместным влиянием различных факторов. Одним из которых является гидрологический режим реки. «Гидрологический режим содержит особенности жидкого и твердого стока, свойства морфологического строения участка реки, рельеф дна и тип грунтов, также режим движения донных наносов и пр. Немаловажную роль играют группы химического и

термического стока, так как они в большой мере определяют базовые условия произрастания водной растительности.» [16]

На развитие водных растений влияют также почва дна и берегов, количество содержащихся в них мелких фракций, которые образуют благоприятную среду для развития биомассы. Их поступление, обычно, происходит прямо с поверхности водосборов. «Некоторая их часть аккумулируется в долинах и руслах верхних звеньев речных систем. Стоит заметить, что наносы, которые относятся к бассейновому происхождению, также могут наблюдаться в руслах высоких порядков.» [16]

Существует зависимость степени зарастания от площади водосбора реки. «Чем меньше площадь водосбора реки, тем больше ее зарастание и наоборот, с увеличением площади водосбора – зарастание уменьшается, а реки с площадями водосборов более 25000 км² не зарастают или зарастание существенно не влияет на пропускную способность русла.» [16]

«Средние и малые реки в межень зарастают водной растительностью, которая оказывают значительное дополнительное сопротивление движению руслового потока. Растительность, в таком случае, можно назвать очень сложным видом шероховатости.» [16] Это обусловлено весьма сложной структурой потоков в заросших руслах, трудно поддающейся схематизации и анализу.

«Зарастание русла можно рассматривать в нескольких аспектах:

- гидравлический – создание дополнительного сопротивления движению потока;
- гидрометрический – проявление расхождения в связи расходов и уровней воды.

Водная растительность в русле, как фактор гидравлических сопротивлений может быть представлена (рис. 2) в виде системы введенных в поток продольных тормозящих поверхностей, многократно увеличивающих смоченный периметр русла.» [10]

а) в виде системы введенных в поток продольных тормозящих поверхностей, многократно увеличивающих смоченный периметр русла.

б) в виде совокупности препятствий, создающих очаги местных сопротивлений.

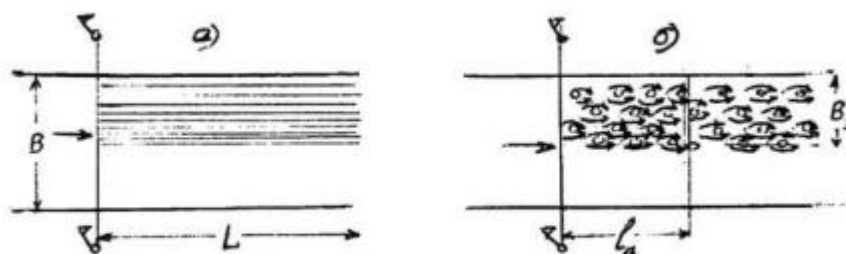


Рисунок 2 – Схемы тормозящего действия водных растений на поток

а) по В.Н.Гончарову, б) по А.Найту

«Так как большая часть водотоков, протекающих на территории России, зарастает водной растительностью, то в последствие осложняется и учет стока, так как зарастание русла имеет влияние на характеристики водотока, например, коэффициент шероховатости, скорость течения, площадь живого сечения и др.» [10]

Как правило, в периоды дождевых паводков, которые отмечаются довольно часто на многих реках, являются более трудоемкими для учета стока, так как достаточно не освещены измерениями расходов воды. В такие периоды также возрастают погрешности гидрометрического учета стока.

«Современная практика гидрометрического учета стока зарастающих рек базируется на методическом руководстве, которое разработано еще в прошлом столетии. Из содержащихся в нем рекомендаций следует, что достоверные данные могут быть получены при выполнении большого объема трудоемких измерений расходов воды, но в настоящее время экономические ресурсы не располагают такой возможностью.» [16]

Необходимость в повышении надежности учета стока приобретает актуальность в связи с увеличением масштабов контроля экологии ландшафтов и реализации системы мониторинга водных объектов.

Потребность в большом количестве измерений расходов воды, вытекает из того, что в них игнорируются гидравлические закономерности движения потока в интервале между измерениями.

Интерполяция измеренных расходов

Основными исходными данными для гидрометрического учета стока при зарастании русла являются измерения расходов воды. Одним из методов учета стока, по рекомендации Наставления [15] служит интерполяция между измеренными расходами воды. Интерполяция выполняется графически, интерполяционная линия строится криволинейно. Кривую необходимо проводить так, чтобы точки (Q, t) измеренных расходов располагались равномерно по обеим сторонам кривой, т.е. осредненно, это позволит сгладить погрешности измерений. Для того, чтобы снять с кривой расходов значения определенной точности, интерполяционный график необходимо строить в допускающем масштабе.

Данный прием графической интерполяции можно назвать интуитивным, так как точность выполнения во многом зависит от опыта и знаний исполнителя.

Интерполяцию можно применять, когда измерения расходов воды выполнялись достаточно часто.

Рассматриваемый метод считается ограниченным в применении из-за сложности в определении характера водности между измерениями.

Для надежности расчетов методом интерполяции необходимо владеть измеренными расходами для всех переломных моментов гидрографа, что требует большого количества измерений.

«Интерполяция применяется в случаях, когда изменение водности реки в промежутках между соседними измерениями происходят плавно, или в тех случаях, когда измерения расходов воды выполнялись достаточно часто.» [16] Этот метод имеет весьма ограниченное применение, так как, во-первых, достаточно сложно установить характер изменения водности в промежутках между измерениями, во-вторых, для уверенного подсчета стока посредством интерполяции необходимо иметь измеренные расходы для всех характерных переломных моментов гидрографа, что, как правило, требует значительного числа измерений. В тоже время, для вычисления стока за отдельные периоды, отвечающие перечисленным выше требованиям, интерполяция измеренных расходов воды применяется достаточно часто и дает удовлетворительные результаты.

Следует отметить, что вычисление стока методом интерполяции измеренных расходов производится очень часто и дает приемлемые результаты.

Во время дождевого паводка на зарастающих реках появляется необходимость в увеличении частоты измерений расходов воды, так как в это время меняется водность реки и пропускная способность русла. При условии, что все фазы дождевого паводка оснащены измерениями, т.е. измерения проводились в ветвь подъёма, пик и в ветвь спада, то рассматриваемый метод

интерполяции служит достаточно надежным способом вычисления стока в данный период.

Помимо надежности результатов, большое количество измерений может способствовать детализации параметров моделей учета стока, которые используются при недостаточном количестве измерений, а также способствует анализируванию погрешности их результатов. Однако, как показывает практика, в периоды дождевых паводков измерения расходов воды либо вовсе отсутствуют, либо не в полной мере определяют изменения водности. В таком случае учет стока производят методом переходных коэффициентов.

Метод переходных коэффициентов

Расчет по хронологическому графику переходных коэффициентов $K_{\text{зар}}$ считается основным способом учета стока в период зарастания русла. В тридцатых годах А.В.Огиевский [17] разработал способ переходных коэффициентов для зарастающих рек, именно в то время, данный метод и получил широкое распространение.

В зарастающем русле измеряют расход воды $Q_{\text{зар}}$, определяют к расходу Q_0 , который в дальнейшем снимается с кривой $Q_0(H)$ для свободного русла при таком же уровне, и находят коэффициент зарастания $K_{\text{зар}}$ по формуле:

$$K_{\text{зар}} = \frac{Q_{\text{зар}}}{Q_0}$$

Затем по полученным данным $K_{\text{зар}}$ строится хронологический график зависимости $K_{\text{зар}}=f(T)$ (рис.2.1)

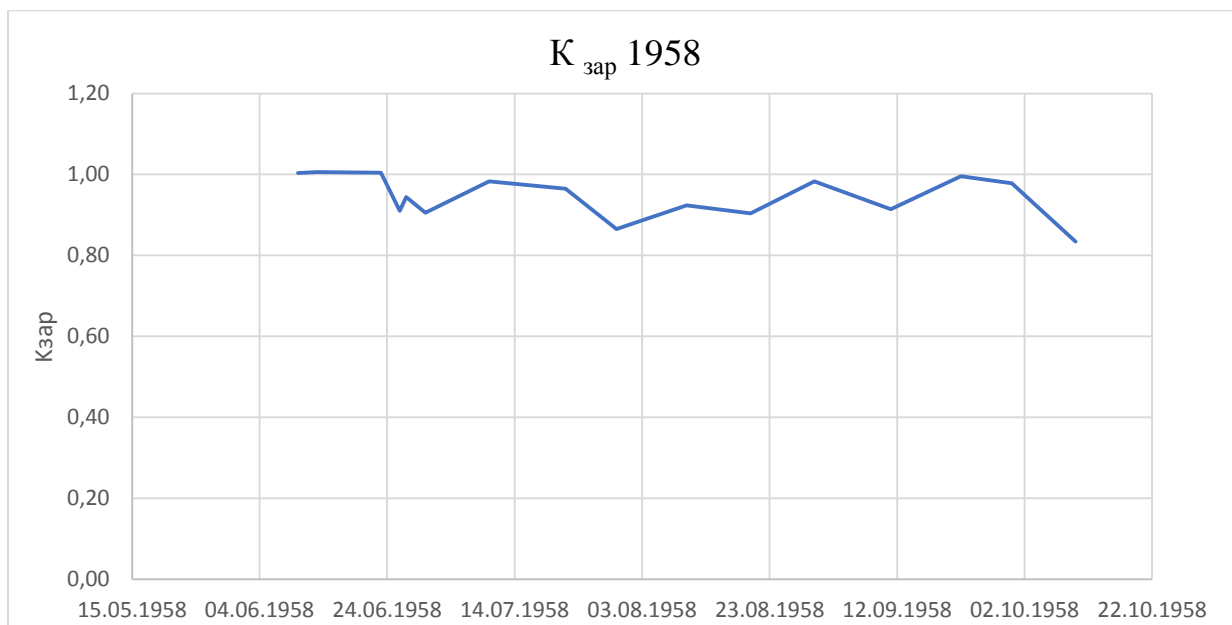


Рисунок 2.1– Хронологический график $K_{зар}$.

р.Кан– с. Ирбейское, 1958 года

По построенному графику снимают значение $K_{зар}$ в период заросшего русла для каждого дня. Необходимый расход определенного дня $Q=Q_0 * K_{зар}$, где Q_0 определяется по кривой уровня рассматриваемого дня. Весной $K_{зар}$ близок к единице, затем ближе к середине лета становится 0,15 – 0,20 в последствии зарастания, а после снова возрастает. Как указывал Огиевский, $K_{зар}$ стремится к своему пределу – единице, к концу вегетационного периода. В действительности коэффициент $K_{зар}$ обычно не возвращается к единице [18], как например на рисунке 2.2.

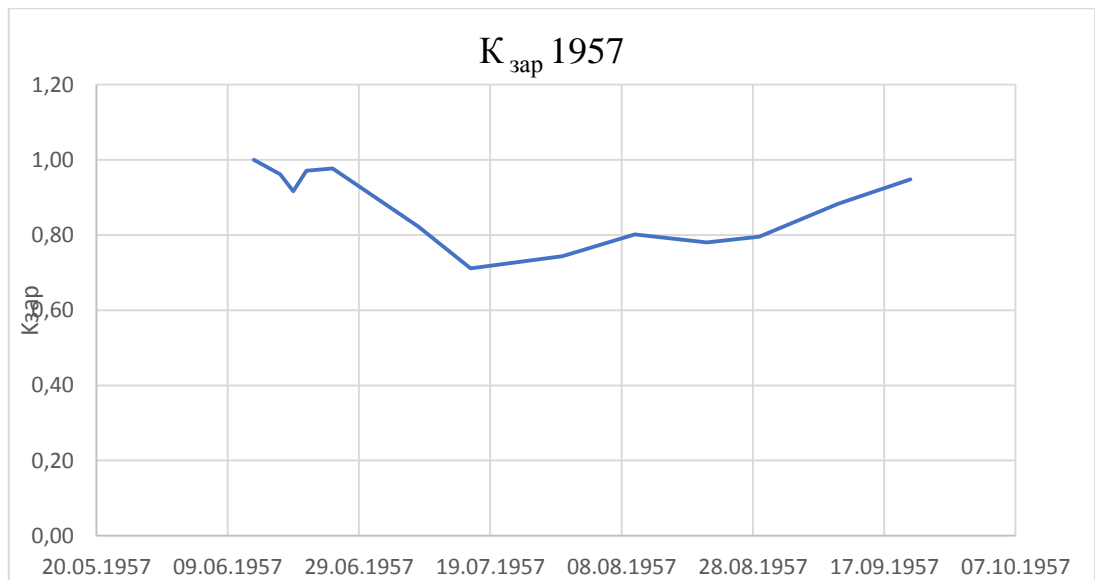


Рисунок 2.2 – Хронологический график $K_{зар}$.

р.Кан– с. Ирбейское, 1957 года

В указанных работах не оговаривается влияние уровня, на изменение переходного коэффициента и что в период паводков коэффициент $K_{зар}$ может значительно увеличиваться. В этой связи под графиком $K_{зар} = f(T)$ следует вычерчивать также график колебаний уровня и затем сопоставлять их. Если при этом выясняется постоянство коэффициента при паводках или практически ничтожные его изменения, то линию коэффициентов можно провести прямо по точкам. В противном случае необходимо построить вспомогательный график $K_{зар} = f(H)$ для данного паводка.

Упоминание об анализе материалов наблюдений на зарастающей реке находим в работе Р.А. Флёровой [14], в которой указывается, что хронологический график значений $K_{зар}$ анализируется в составе комплексного графика всех гидрометеорологических наблюдений, производимых в данном пункте. Но это так называемый гидрологический анализ, лишь позволяющий установить степень соответствия между изменением переходных коэффициентов $K_{зар}$ и изменением других элементов режима. Гидрологический анализ не заменяет гидрометрический,

включающий, прежде всего, оценку погрешности измерений расходов воды, так как является самостоятельным и должен производиться после него.

Несомненно, гидрометрический анализ необходим и должен осуществляться с учётом специфических особенностей протекания потока в зарастающем русле, так как погрешность измеренного расхода влияет на полученный коэффициент $K_{зар} = Q_{зар} / Q_{св}$ и распространяется на вычисленные ежедневные расходы за целый период пользования им.

Предложение по расширению области применения хронологического графика $K_{зар}$ заключается в следующей рекомендации Р.А. Флеровой [14]. При недостаточном числе измерений расхода воды в текущем году для уточнения хода изменения коэффициента $K_{зар}$ Флерова рекомендует пользоваться осредненными его значениями, полученными за ряд предыдущих лет. Для этого строится многолетний хронологический график изменения $K_{зар}$, на котором время t в целях сопоставления однородных величин откладывается в днях от начала и конца вегетационного периода.

Метод переходных коэффициентов $K_{зар}$, рекомендуемый для условий зарастания как основной и применим при достаточном количестве измерений в каждом отдельном году, позволяющих уверенно строить график $K_{зар} = f(T)$.

Таким образом, в речной гидрометрии $K_{зар}$ играет роль основной характеристики пропускной способности русла, которая всегда снижается при зарастании, т.е. $K_{зар}$ всегда меньше единицы. Это условие предполагает положение кривой $Q_0(H)$ правее точек измеренных при зарастании расходов воды. На самом же деле, положение кривой $Q_0(H)$ в этой зоне всегда остается неопределенным, так как именно при зарастании русла оно не бывает свободным. Кривую в зоне низких уровней строят, экстраполируя вниз верхнюю её ветвь, полученную до начала зарастания. Для примера на

рисунке 2.3 представлены кривая $Q=f(H)$ для свободного русла по расчётной реке.

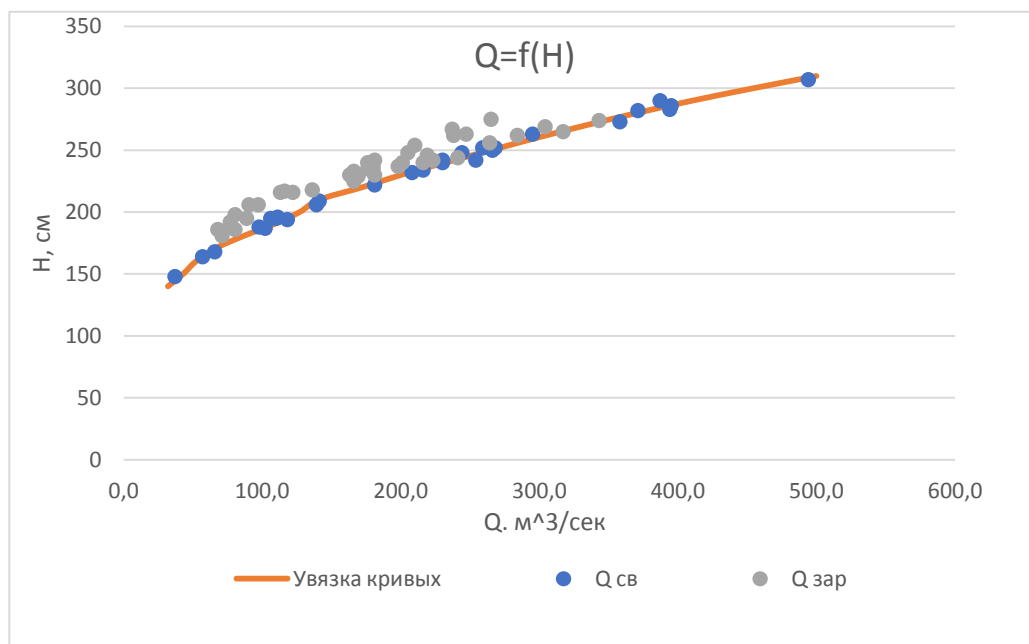


Рисунок 2.3 – Зависимость $Q=f(H)$ р. Кан – с. Ирбейское в период свободного русла и его зарастания за 1956 год

На рисунке 2.4 представлен хронологический ход коэффициента зарастания, рассчитанный для реки Кан – с. Ирбейское за 1956 год. Как видно из рисунка коэффициент зарастания существенно изменяется за период вегетации.

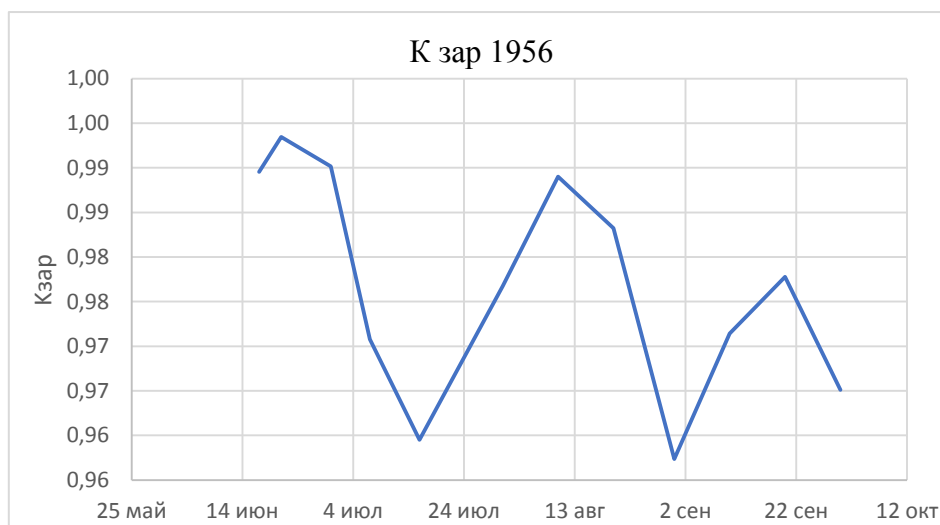


Рисунок 2.4 – Хронологический ход $K_{зар}$ р. Кан – с. Ирбейское, 1956 год

Также были рассчитаны гидрографы за период зарастания реки Кан – с. Ирбейское за 1956 год различными способами, которые представлены на рисунке 2.5. Анализируя полученные гидрографы, можно сказать, что гидрограф рассчитанный методом переходных коэффициентов существенно отклоняется от натуральных данных.

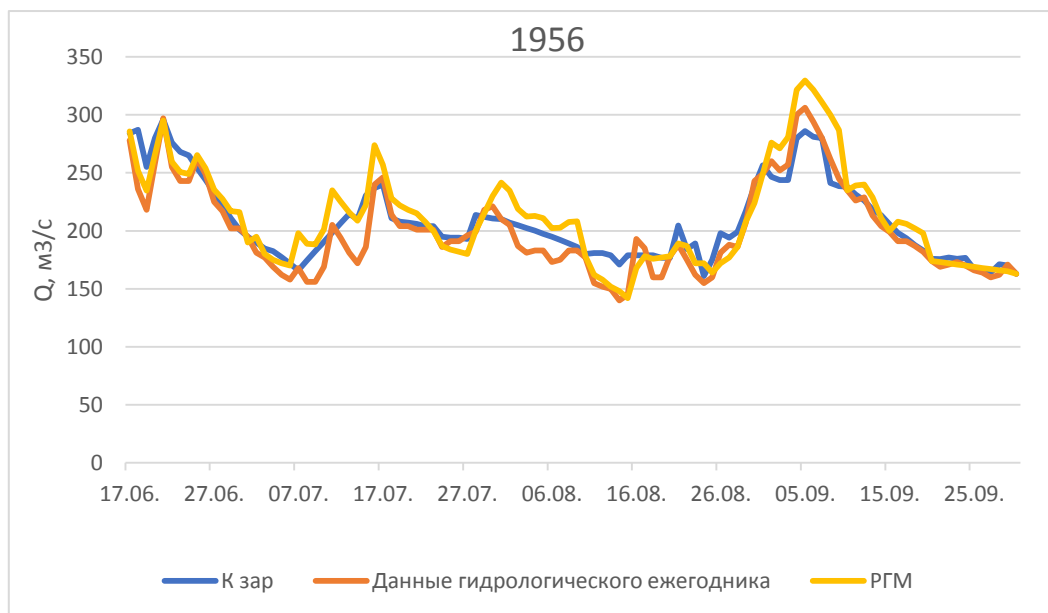


Рисунок 2.5 – Гидрографы р. Кан – с. Ирбейское в период зарастания за 1956 год

В соответствии с вышесказанным, $K_{зар}$ является во многом иллюзорной характеристикой, ведущей к заблуждениям относительно реальных условий движения потока в заросшем русле. И если в практике гидрометрии использование $K_{зар}$ не ведет к заметным искажениям результатов, то это только потому, что интерполируемые значения $K_{зар}$ устанавливаются на основе измеренных расходов воды, чем и компенсируется условность кривой, особенно при достаточно большой частоте наблюдений.

Само применение поправочных коэффициентов, в том числе $K_{зар}$, как функции времени связано с тем, что при неоднозначных зависимостях $Q(H)$ совокупность измеренных расходов воды, представленная в виде временной последовательности этих коэффициентов, позволяет зафиксировать

тенденцию их изменений в интервале между измерениями. Но если при этом производится простая линейная интерполяция или более сложная, но формальная математическая интерполяция, не опирающаяся на гидравлические закономерности изменения пропускной способности русла, никакого уточнения результатов расчета не достигается. Игнорируя физические факторы, приводящие к неоднозначности связей $Q(H)$ некоторые специалисты, в частности известный методист из Эстонии Т.Ф.Эйпре [21], предлагал вообще не делать различия между $K_{\text{зар}}$ и $K_{\text{зим}}$, поскольку осенью первый может истолковываться как второй.

Временные кривые расходов воды

При зарастании русла, в случаях резко выраженного паводочного режима, для вычисления стока используется способ построения кривых расходов, при этом последние могут быть следующих видов:

а) кривые однозначной связи, которые выражают временно устойчивую, но изменённую, по сравнению со свободным состоянием русла, связь между расходом и уровнем. Такие кривые свойственны периоду относительно стабильного состояния водной растительности;

б) кривые неустойчивой связи – переходные кривые зарастания; они могут иметь неправильный вид. Период действия переходных кривых всегда соответствует одной фазе изменения уровня – подъёму или спаду, а границы периода отвечают переломным точкам графика уровня – максимумам и минимумам. Такие кривые обычно свойственны периодам роста и отмирания водной растительности, но могут иметь место и при стабильном её состоянии, и при прохождении паводков.

При построении кривых их вид и сроки действия определяются положением точек (Q, H) измеренных расходов.

2.2 Современные методы.

Регрессионно-гидравлические модели.

Недостаточная физическая обоснованность используемых на гидрологической сети методов привела к необходимости разработки более совершенных моделей гидрометрического учета стока зарастающих рек. Любая расчетная методика должна вытекать из соответствующих математических моделей изучаемого процесса, а изменения должны служить для идентификации их параметров. Применительно к гидрологии и гидрометрии вопросы идентификации были развиты И.Ф.Карасевым и В.В.Коваленко [22].

В основу модели гидрометрического учета стока зарастающих рек естественно положить формулу Шези – Маннинга. Такая модель предложена И.Ф.Карасева и Е.Б.Сунцовой [23], в ней геометрические элементы русла B и h , входящие в формулу Шези – Маннинга представлены как функции уровня воды H посредством схематизации очертаний поперечного профиля русла в виде параболы S -ого порядка:

$$B = \beta h_{\max}^S; \quad h = \varphi h_{\max}; \quad h_{\max} = H - H_0 \quad (2.1)$$

где β - геометрический параметр, имеющий размерность m^{1-S} ,
 H_0 – наименьшая отметка дна над нулем поста. Показатель степени S связан с коэффициентом формы русла φ :

$$S = (1 - \varphi) / \varphi \quad (2.2)$$

В результате преобразований исходной гидравлической зависимости и объединения входящих в нее независимых переменных в комплексы X_i авторами [23] получено выражение:

$$Q = \sqrt{I/n_0} [\beta \varphi^{5/3} (x_1 - a_1 x_2 + a_2 x_3) - a_3 x_4 + a_4 x_5 - a_5 x_6], \quad (2.3)$$

которое затем рассматривается в качестве уравнения множественной линейной регрессии по этим комплексам:

$$\begin{aligned} x_1 &= (H - H_0)^{5/3 + S}; & x_2 &= x_1 \tau; & x_3 &= x_1 \tau^{4/3}; \\ x_4 &= (H - H_0)^S \upsilon^{0,025}; & x_5 &= x_4 \tau; & x_6 &= x_4 \tau^{4/3} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Здесь τ – относительное время от начала вегетации, υ – относительное значение суммы температур воды t от начала вегетации водных растений;

$\upsilon = \sum t / \sum_{T_3} t$ (в знаменателе – сумма температур воды за весь вегетационный период)

Достоинство описанной регрессионно-гидравлической модели – это полнота учета временных гидравлических и гидрометрических факторов, от которых зависит зарастание, и в конечном счете пропускная способность русла. Вместе с тем множественность переменных, входящих в структуру регрессионно-гидравлической модели, сопряжена с заведомо недостаточной надежностью определения параметров регрессии по совокупности измеренных расходов воды, особенно если их количество ограничено, как это имеет место на гидрологической сети.

Т.В.Векшина усовершенствовала модель РГМ [25] существенно сократив число ее переменных (факторов). В самом деле суммарная температура воды $\sum t$ от начала вегетации в конечном счёте не что иное как функция времени и может не входить в аналитическую структуру РГМ. Следовательно, при назначении переменных уравнения для конкретного

гидрометрического створа, можно ограничиться лишь учётом фактора времени.

Коэффициент шероховатости заросшего русла n_3 зависит от фазы развития водных растений: с одной стороны, n_3 увеличивается по мере увеличения массы растений, а с другой – уменьшается из-за их старения, полегания и срыва. Эти процессы происходят хронологически закономерно, так что изменение n_3 может быть представлено в виде некоторой функции времени. Непосредственно по гидрометрическим данным, а также учащенным измерениям Е.А.Леонова установлено, что она сохраняет однотипную аналитическую структуру в разные годы и для различных рек, если время от начала вегетации T выражено в долях от общей продолжительности зарастания русла T_3 : $\tau=T/T_3$. Вид этой функции устанавливается с учетом того, что n_3 равен коэффициенту шероховатости n_0 свободного русла $n_3=n_0$ при $\tau=0$ и отличается от n_0 на величину второго порядка малости при $\tau=1$:

$$n_3=n_0/(1+k_1\tau+k_2\tau^{4/3}), \quad (2.5)$$

где k_1 и k_2 - поправочные коэффициенты.

В таком случае для расхода воды формула Шези-Маннинга записывается следующим образом:

$$Q = \frac{\omega^{5/3} \sqrt{I}}{B^{2/3} n_0} (1+k_1\tau+k_2\tau^{4/3}), \quad (2.6)$$

где ω - площадь поперечного сечения русла,

B – ширина русла,

I – уклон свободной поверхности.

На постах гидрологической сети измеряются уровни H , расходы Q и температура воды t , но, как правило, не выполняются измерения уклонов I и тем более не оцениваются коэффициенты шероховатости n_3 и n_0 . Что касается зарастания русла, то в изданиях водного кадастра (гидрологических ежегодниках) указывается лишь на наличие растительности, без каких-либо сведений о степени ее развития и распространении в русле. В этом состоит существенный недостаток стандартных сетевых наблюдений. Достоинством же их является массовость и регулярность проведения во времени в течение всего вегетационного периода. Отсюда следует задача выбора такой структуры РГМ, чтобы она в полной мере основывалась непосредственно на объективной измерительной информации.

Уравнение (2.6) дает возможность определить непосредственно не измеряемую характеристику гидравлических сопротивлений – комплекс:

$$m_3 = \sqrt{I/n_3} = \frac{\sqrt{I}}{n_0(1 + k_1\tau + k_2\tau^{4/3})} = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}} \quad (2.7)$$

Комплекс $m = \sqrt{I/n}$ играет особую роль в динамике русловых потоков. Его использовал М.А.Великанов [13,18] при разработке метода построения плана течений, а в гидрометрии он принят в качестве основополагающего параметра интерполяционно-гидравлической модели расхода воды. Особенность комплекса m (он получил название параметр Великанова) состоит в том, что при однородной шероховатости русла он сохраняет относительное постоянство, независимо от колебаний расходов воды. В нашем случае посредством использования $m_3 = \sqrt{I/n_3}$ открывается возможность

учета увеличения гидравлических сопротивлений при зарастании русла по сравнению с условиями свободного русла.

Формуле (2.7) может быть поставлено в соответствие следующие уравнение множественной линейной регрессии:

$$m_3 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2, \quad (2.8)$$

в котором $x_1 = \tau$; $x_2 = \tau^{4/3}$.

Параметры уравнения a_0 , a_1 , a_2 определяются по совокупности измеренных расходов воды и их элементов за время зарастания русла методом наименьших квадратов. В таблице 2.1 представлены результаты расчета параметров РГМ для реки Кан – с. Ирбейское за различные года.

Таблица 2.1 Результаты расчета параметров РГМ

р. Кан - с. Ирбейское						
Год	Кол-во измерений	a_0	a_1	a_2	$\sigma \%$	R
1956	12	0.80	-1.15	1.20	0.13	0.45
1957	13	0.82	-1.99	1.89	0.04	0.90
1958	16	0.92	-2.18	1.88	0.03	0.98

Формула для вычисления ЕРВ при этом получает следующий вид:

$$Q = (\varpi^{5/3} / B^{2/3}) (a_0 + a_1 \tau + a_2 \tau^{4/3}) \quad (2.9)$$

Для каждого расчетных суток величины ϖ и B определяются по среднесуточным уровням H на основе зависимостей функций $\varpi(H)$ и $B(H)$.

На рис.2.8 представлены гидрографы стока зарастающей реки, полученные на основе уравнения 2.9 (РГМ) и линейной интерполяции $K_{зар}$

(данные ГЕ). Как оказывается, гидрографы не обнаруживают резких различий. Однако рассчитанные на основе РГМ ежедневные расходы воды сглаживают ряд измеренных расходов, а вариант $K_{зар}$ в день наблюдений дает ЕРВ не отличающиеся от измеренных расходов воды. Этого и следовало ожидать, поскольку фактически интерполяция $K_{зар}$ в конечном счете сводится к интерполяции измеренных расходов воды.

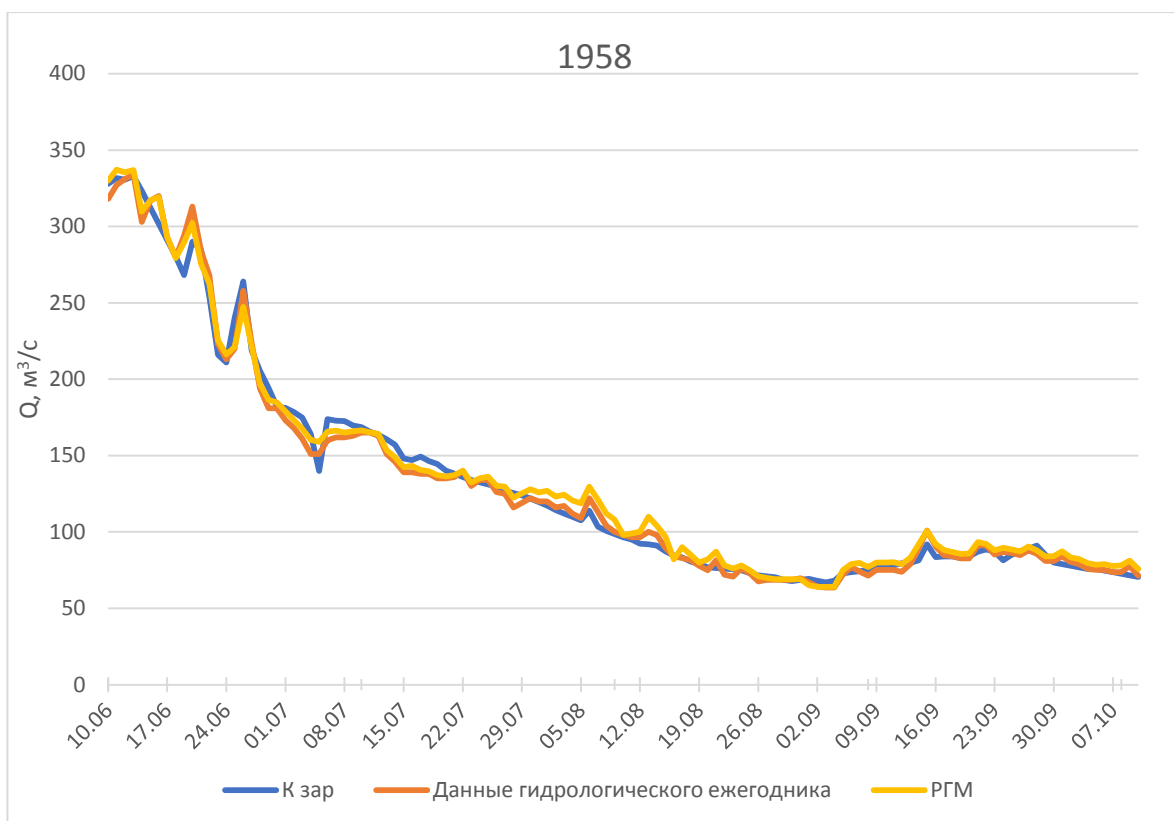


Рисунок 2.8 – Гидрографы р. Кан – с. Ирбейское при зарастании за 1958 года

Кроме того, модель РГМ в отдельных случаях дает удовлетворительные результаты и при прохождении дождевого паводка в зарастающем русле (рис.2.9)

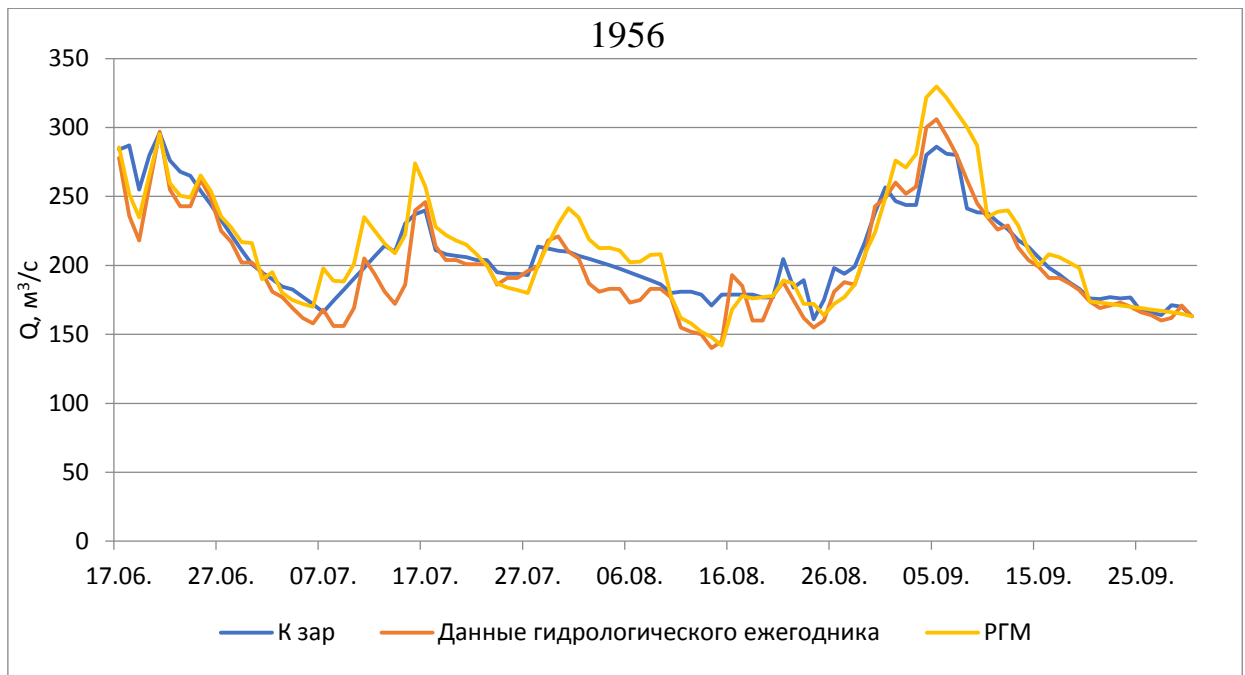


Рисунок 2.9 – Гидрографы р. Кан – с. Ирбейское в период зарастания за 1956 года

Интерполяция параметра Великанова.

Несмотря на то, что в отдельных случаях, как например, для р. Кан (рис. 2.9) модель РГМ в периоды дождевых паводков может давать удовлетворительные результаты, можно предположить, в целом для большинства рек модель РГМ будет занижать паводочный сток (рисунок 2.10 и рисунок 2.11), так как процесс закономерного изменения пропускной способности при зарастании, описываемый моделью при существенных изменениях уровня воды нарушается.

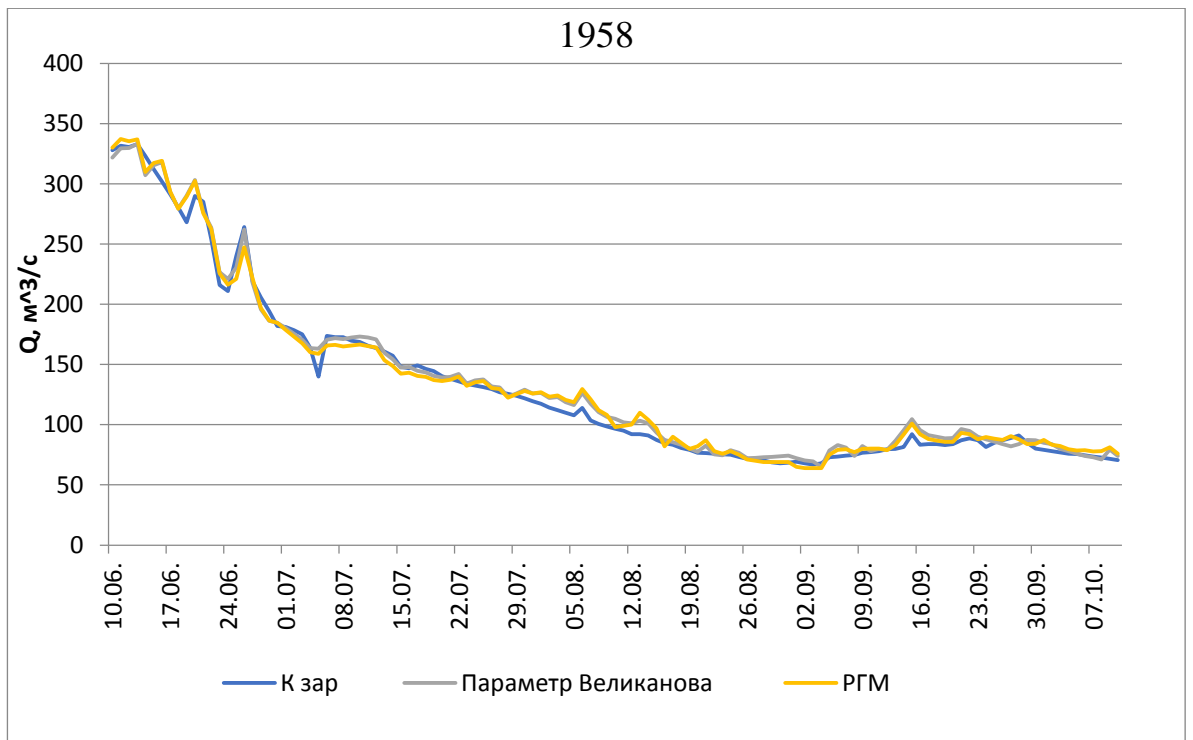


Рисунок 2.10 – Гидрографы р. Кан – с. Ирбейское при зарастании за 1958 года

Поэтому в периоды дождевых паводков, особенно если они не освещены измерениями расходов воды, возможно выполнение интерполяции параметра m_3 , между значением, полученным по модели РГМ на начало паводка и значением m_3 , соответствующим свободному руслу [25]. Последнее назначается или по имеющимся расходам расчетного года, или по данным предшествующих лет с аналогичными условиями. Если измеренных расходов воды достаточно, то производится линейная интерполяция между соседними значениями параметров Великанова, рассчитанных по данным измерений.

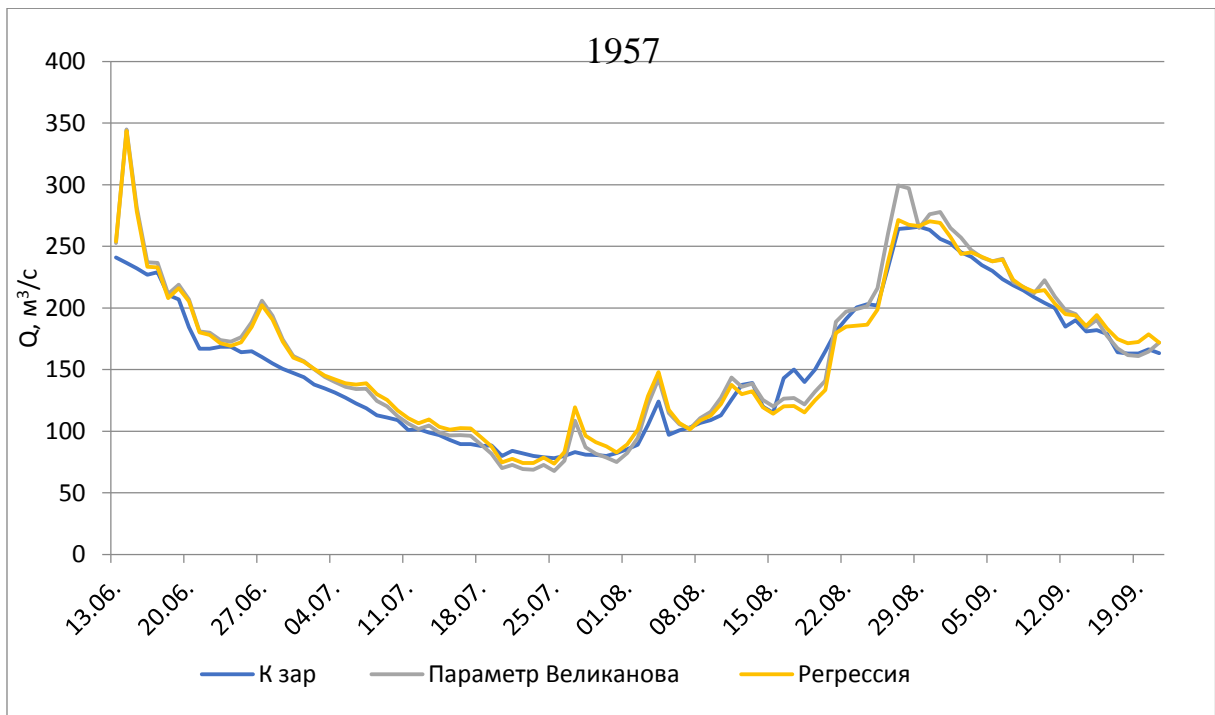


Рисунок 2.11– Гидрографы р. Кан – с. Ирбейское при зарастании в период за 1957 года

Указанный вариант расчета (еще недостаточно апробированный) по-видимому, имеет преимущества, по сравнению с интерполяцией $K_{зар}$, так как, во-первых, при вычислении стока дает практически такие же результаты (рис.2.10), или для некоторых створов гораздо лучшие (рисунок 2.11), во-вторых, не требует экстраполяции и использования кривых расходов.

3 Анализ результатов расчетов

Для обоснования применения новых методов выполнены сравнительные расчеты для створа р. Кан – с. Ирбейское за 3 года, при этом рассматривался период с 1956 по 1958 г. Предварительно, на основе полученных значений параметра Великанова производилась оценка изменения гидравлического сопротивления зарастающего русла (таблица 3.1) за все годы. Анализ результатов измерений за период с 1956 по 1958 показывает, что условия развития водной растительности на р. Кан меняются, но не существенно. В разные годы продолжительность периода зарастания и величина изменения пропускной способности потока из-за водной растительности, оцениваемые параметром Великанова могут существенно варьировать (таблица 3.1, рисунок 3.1).

При вычислении стока применялись три способа: метод переходных коэффициентов, регрессионно-гидравлическая модель и метод, основанный на интерполяции параметра Великанова. Для оценки эффективности применения новых методов, выполнялся сравнительный анализ полученных результатов.

Метод переходных коэффициентов, являющийся основным из используемых в настоящее время методов, рассматривался как реперный. Хотя очевидно, что более физически обоснованные новые методы (РГМ и интерполяция m) могут давать более точные результаты. Таким образом в качестве эталонных принимались ежедневные расходы воды, приведенные в гидрологическом ежегоднике, вычисленные путём интерполяции коэффициента зарастания. При сравнении методов выяснилось, что в меженный период более подходит метод РГМ, а в период дождевого паводка актуален способ интерполяции параметр Великанова.

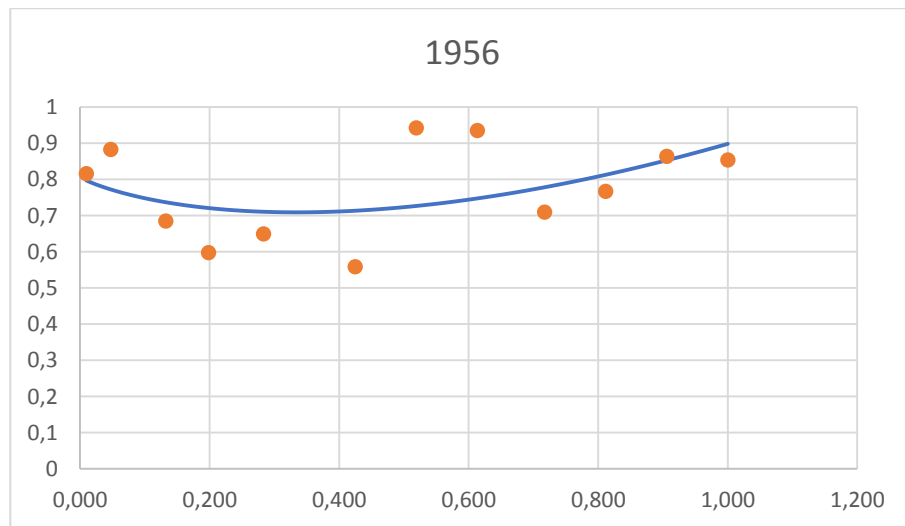


Рисунок 3.1– Хронологический ход параметра Великанова за 1956 год

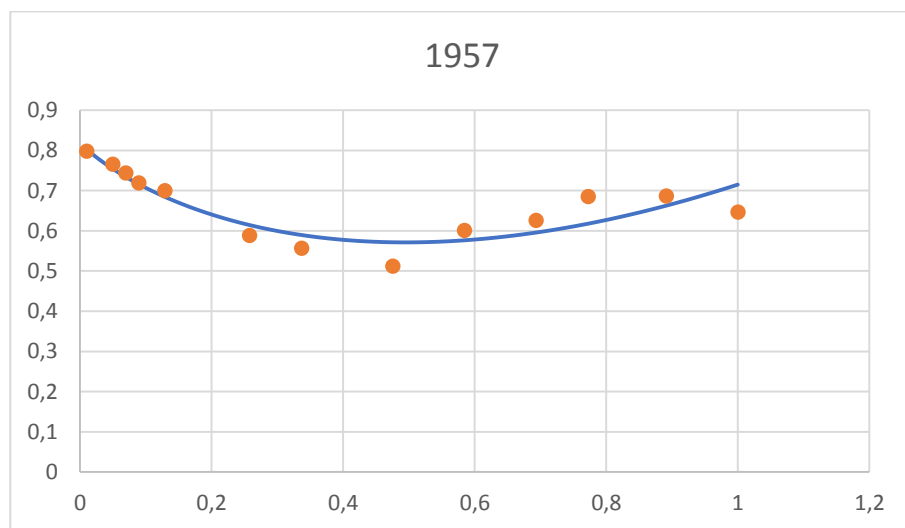


Рисунок 3.2 – Хронологический ход параметра Великанова за 1957 год

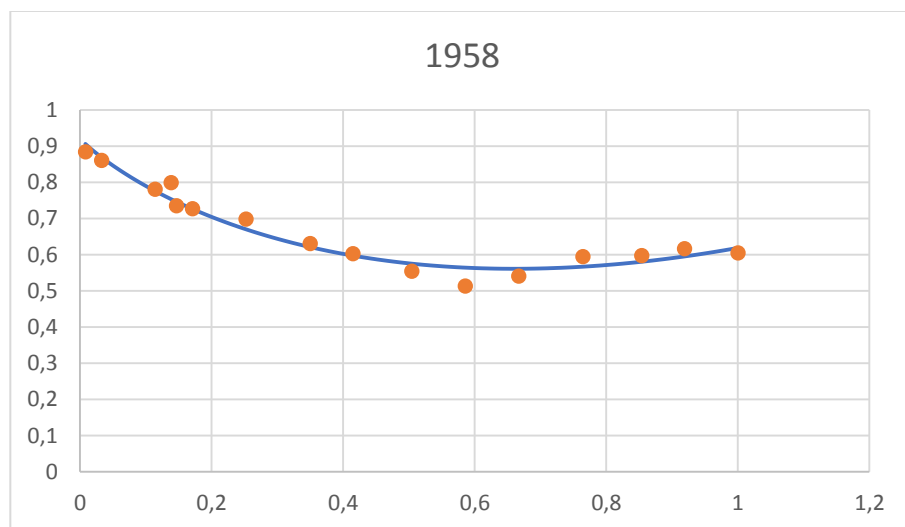


Рисунок 3.3 – Хронологический ход параметра Великанова за 1958 год.

Таблица 3.1 – Характерные значения параметра Великанова для р. Кан – с. Ирбейское.

n/n	Год	T _{зар}	m при зарастании			
			нач.=a ₀	наим.	кон.	∂m
1	1956	106	0.79	0.71	0.90	0.19
2	1957	101	0.80	0.57	0.71	0.23
3	1958	123	0.91	0.57	0.62	0.34

Расчетное уравнение регрессионно-гидравлической модели получалось по данным измерений за весь период зарастания русла. Параметры модели РГМ (a₀, a₁, a₂) приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры уравнения регрессии РГМ.

р. Кан - с. Ирбейское, Площадь водосбора 8900 км ²						
Год	Кол-во измерений	a ₀	a ₁	a ₂	σ %	R
1956	12	0.80	-1.15	1.20	0.13	0.45
1957	13	0.82	-1.99	1.89	0.04	0.90
1958	16	0.92	-2.18	1.88	0.03	0.98

Вычисление стока на основе параметра Великанова производилось следующим образом:

- на каждый день измерения расхода воды, вычислялось значение параметра m;
- для дней между измерениями РВ параметра m определялся посредством линейной интерполяции
- для дней между измерениями РВ по значению среднесуточного уровня по зависимостям $\omega(H)$ и $B(H)$ (построенным для каждого створа) определялись значения площади живого сечения потока (ω) и ширины русла (B)
- расход воды на данные сутки вычислялся по формуле:

$$Q = \frac{m\omega^{5/3}}{B^{2/3}}, \quad (3.1)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.3, где показаны средние за период зарастания расходы, приведенные в ежегоднике ($Q_{\text{еж}}$) и рассчитанные по модели РГМ, на основе линейной интерполяции параметра m ($Q_{\text{инт},m}$) и переходного коэффициента $K_{\text{зар}}$ ($Q_{\text{инт},k}$).

Таблица 3.3 – Результаты расчета стока при зарастании.

№	Год	$T_{\text{зар}}$	$Q_{\text{еж}}$	$Q_{K_{\text{зар}}}$	S%	$Q_{\text{инт},m}$	S%	$Q_{\text{РГМ}}$	S%
1	1956	106	200	208	6	205	4	212	7
2	1957	101	153	153	5	160	5	162	6
3	1958	123	131	210	4	135	4	134	4

На рисунках 3.2, 3.3 и 3.4 представлены совмещённые гидрографы, рассчитанные для р. Кан – с. Ирбейское за различные года, рассчитанные различными способами.

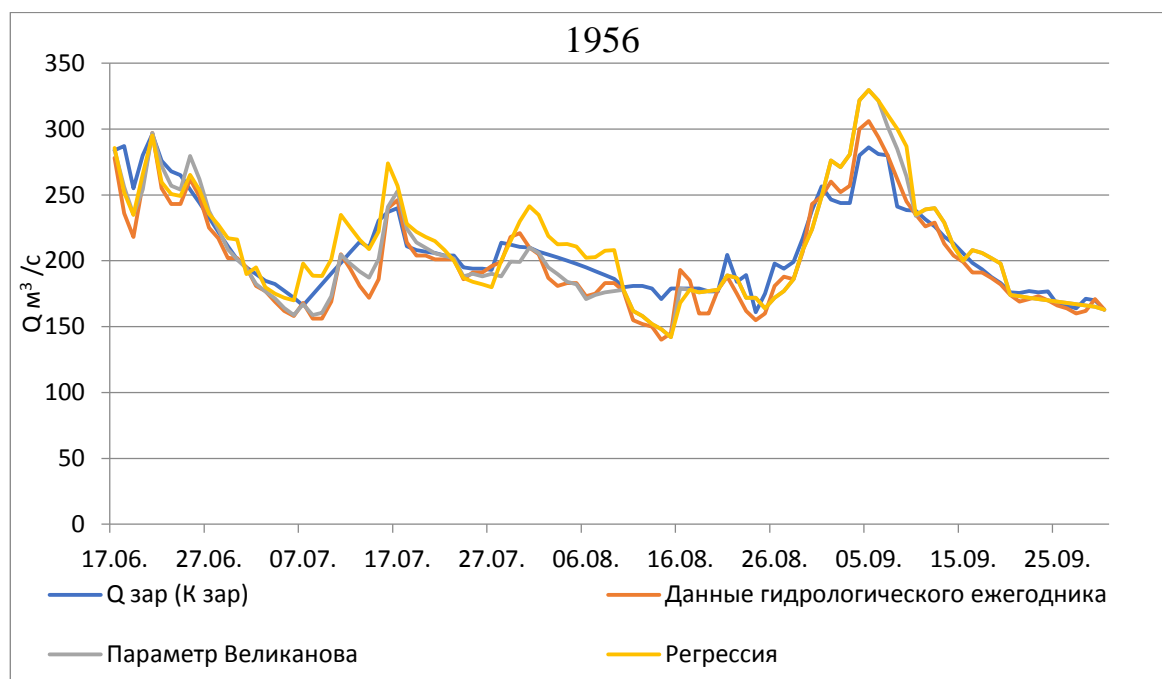


Рисунок 3.2 – Гидрографы р. Кан – с. Ирбейское в период зарастания, 1956 год

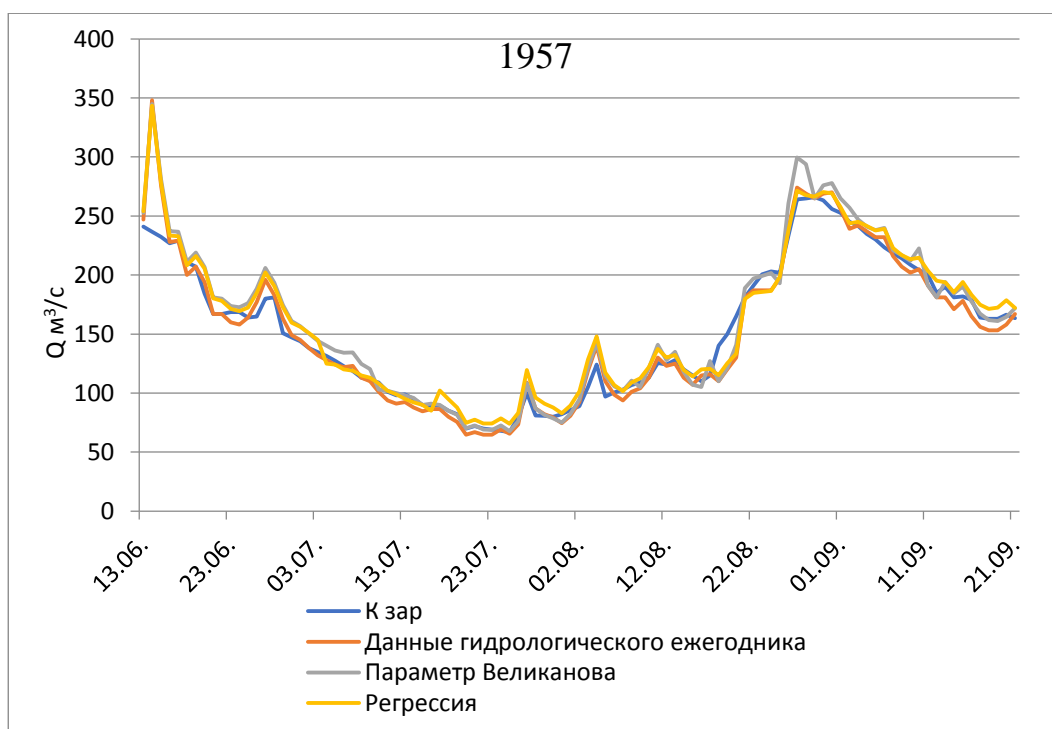


Рисунок 3.3 – Гидрографы р. Кан – с. Ирбейское в период зарастания, 1957 год

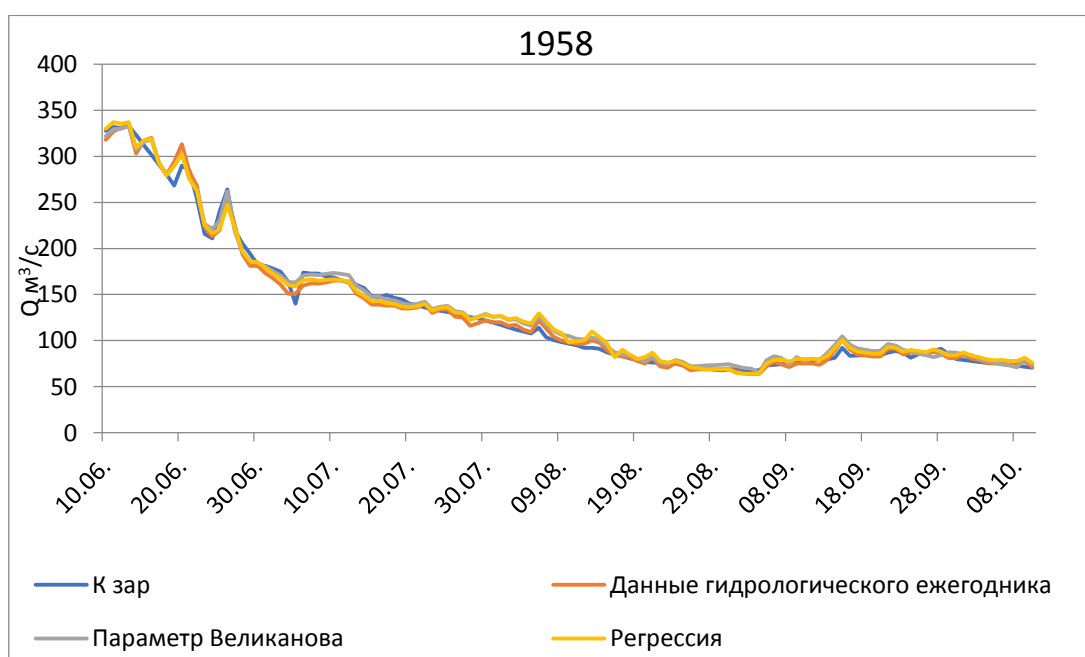


Рисунок 3.3 – Гидрографы р. Кан – с. Ирбейское в период зарастания, 1958 год

Расхождение результатов расчета тремя способами при наличии данных, как правило не более 5%. Т.е. новый метод дает несколько лучшие

результаты. Анализируя результаты численных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- параметр Великанова позволяет количественно оценить изменение гидравлических условий в русле;

- применяемые на сети методы вычисления стока в периоды зарастания (переходных коэффициентов, временные кривые) не перспективны и не могут быть применены в компьютерной технологии, так как сводятся к графическим построениям и во многом опираются на опыт специалиста;

- необходимо, продолжить апробацию методики, основанной на применении параметра Великанова, и исследования изменений гидравлических условий в зарастающих руслах для дальнейшего обоснования применения модели РГМ при сокращении или отсутствии измерений.

- методика учёта стока зарастающих рек ЕТР, разработанная на кафедре гидрометрии, успешно применима и для рек Сибири.

Заключение

При расчёте гидрографов стока были использованы методы:

- интерполяции параметра Великанова
- метод регрессионно-гидравлической модели
- метод переходных коэффициентов

При апробации методов выяснилось, что метод на основе интерполяции параметра Великанова лучше подходит для учёта стока при зарастании при прохождении дождевых паводков, а метод РГМ более уместен для устойчивой межени, более того не требуется большого количества измерений расходов воды.

Из полученных расчётов можно сделать следующие выводы:

- параметр Великанова позволяет количественно оценить изменение гидравлических условий в русле
- применяемые на сети методы вычисления стока не перспективны и не могут быть применены в компьютерной технологии, так как сводятся к графическим построениям и во многом опираются на опыт специалиста.
- необходимо, продолжить апробацию методики, основанной на применении параметра Великанова, и исследования изменений гидравлических условий в зарастающих руслах для дальнейшего обоснования применения модели РГМ при сокращении или отсутствии измерений.

Список литературы

1. Руководящий документ РД 52.08.915-2021. Обработка и обобщение данных наблюдений за стоком воды на реках и каналах при подготовке справочных изданий Водного Кадастра – Санкт-Петербург ФГБУ «ГГИ» 2022 г.
2. Векшина Т.В., Большаков В.А. Математическая модель влияния зарастания на гидравлические сопротивления речных русел // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право / Вып. 3 (21) / Под ред. д.т.н., проф. Истомина Е.П. – СПб.: ООО «Андреевский издательский дом» – 2017 г – С. 145-147
3. Большаков В.А., Векшина Т.В. Гидравлические сопротивления и учет стока при зарастании русел рек водной растительностью//Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов 31 марта 2016 г. по материалам III международной научно-практической конференции/ Под общ. Ред. А.В. Туголукова – Москва: ИП Туголуков А.В., 2016 – 259с.
4. Семенов В.А., Семенова И.В. Водные ресурсы и гидроэкология Калужской области. – Обнинск, 2002.
5. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение – М: ГЕОС, 2000.
6. Основные гидрологические характеристики (Государственный водный кадастр) Том 16, Выпуск 1 Ангаро-Енисейский р-н. – Л.: Гидрометеиздат.
7. Ресурсы поверхностных вод Том 16, Выпуск 1. – Л.: Гидрометеиздат, 1957.
8. Кайгородов Е. В., Яремчук О. В. Последняя экспедиция Александра Кошурникова //Мир Евразии. – 2017. – №. 1. – С. 38-44.

9. Кольцов И. В. Анализ пространственно-временной динамики распространения загрязнителей воды и донных отложений водохранилищ бассейна Верхнего и Среднего Енисея : дис. – Сибирский федеральный университет, 2021.
10. Векшина Т.В., Большаков В.А., Коринец Е.М. Экологические проблемы русловых процессов. Учебное пособие. СПб.: изд. РГГМУ, 2019 - 144с.
11. Векшина Т.В., Карасев И.Ф. Режим гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел / Труды Академии проблем водохозяйственных наук. Вып. 9. Проблемы русловедения. – М.: изд. МГУ, 2003. – 220с., с.112-122
12. Река Кан. Каталог организаций Красноярского края и Республики Хакасия, 2015-2023. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://naenisee.ru/region/kansk/area/664>
13. Карасев И.Ф., Векшина Т.В. Расчетная оценка гидравлических сопротивлений русел зарастающих рек // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева/ Т.245. – 2006. – С. 101-108
14. Флерова Р.А. Гидрологический анализ результатов наблюдений на речных станциях – Л., Гидрометеиздат, 1951
15. Наставление гидрометеорологическим станциям и потам, вып.6, ч. 1-3 -Л.: Гидрометеиздат, 1978.
16. Векшина Т.В. Гидравлические сопротивления русел рек, зарастающих растительностью // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 15. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – С. 19-26.
17. Огиевский А.В. Гидрометрия и производство гидрометрических работ ОНТИ, 1937.

18. Векшина Т.В., Большаков В.А., Векшин А.К. Применение регрессионно-гидравлических моделей для учета стока. // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. №1(33). С. 89-93.
19. Карасев И.Ф., Векшина Т.В. Режим гидравлических сопротивлений зарастающих русел // Труды Академии проблем водохозяйственных наук: Проблемы русловедения. М. 2003. Вып.9. С. 112-122.
20. Карасев И.Ф., Векшина Т.В. Расчетная оценка гидравлических сопротивлений русел зарастающих рек. // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2006. Т.245. С. 101-108.
21. Эйпре Т.Э. Анализ способов вычисления ежедневных расходов воды рек.-Л.: Гидрометеиздат, 1981г.
22. Карасев И.Ф., Коваленко В.В. Стохастические методы речной гидравлики и гидрометрии.- СПб.: Гидрометеиздат, 1994
23. Карасев И.Ф., Сунцова Е.Б. Пропускная способность русла и учет стока зарастающих рек. Ж. «Гидротехническое строительство», №1, 2001.
24. Векшина Т.В., Зажимаров С.А. Усовершенствованная модель гидрометрического учета стока зарастающих рек. Сб.работ ГГИ, вып. 27. Л., Гидрометеиздат, 2005.
25. Великанов М.А. Динамика русловых потоков -М.: Гидрометеиздат, 1954.Т1, М.: Гидрометеиздат 1955, Т2.
26. Давыдова, М.И. Физическая география СССР/ М.И. Давыдова [и д.р.]. – М.: Просвещение, 1966.- 847 с. [Электронный ресурс] Режим доступа:
https://bigarchive.ru/geography/physical_geography_of_the_Soviet_Union/117.php

27. Природные условия Красноярского края / Отв. ред. Л.В. Громов.-М., 1961. - С.237-238
28. Угрюмов А. На диком берегу. (История реки Кан и деревни Усть-Барга) / А. Угрюмов // Панорама.-1994.-№41.
29. Кан (река в Красноярском крае) // Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров . - 3-е изд. - М . : Советская энциклопедия, 1969-1978. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kiddyclub.ru/kakoe-techenie-u-reki-kan-kan---reka-v-krasnoyarskom-krae/>
30. Склонах горного массива Канского Белогорья, после слияния горных рек Дикий Кан и Тихий Кан, пересекает Канско-Рыбинскую котловину и южные отроги Енисейского кряжа. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://refdb.ru/look/3459374.html>
31. Природа, растения и животные красноярского края, 2019. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://storm24.media/news/53395>
32. Неустроева М.В., Деева У.В. Экологический мониторинг малых рек Красноярского края // Успехи современного естествознания. – 2008. – № 7. – С. 60-61; Режим доступа: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=10275>
33. Гумерова Л. О качестве воды в Красноярском крае, дата публикации: 09.08.2017. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.vodoobmen.ru/kachestvo-vody-v-krasnoyarskom-krae.html>
34. Коваленко В. В. и др. Влияние изменения климата на многолетний слой стока весеннего половодья рек Арктической зоны России //Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2010. – №. 14. – С. 14-19.