



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

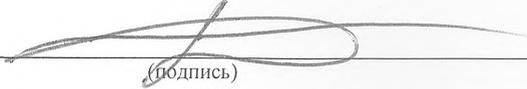
На тему **Методы учёта стока в летний
период**

Исполнитель Кабанова Вера Сергеевна
(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.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

10» ИЮНЯ 2019г.

Санкт-Петербург
2019



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Методы учёта стока в летний
период**

Исполнитель Кабанова Вера Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Векшина Татьяна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«__» _____ 20__ г.

Санкт–Петербург
2019

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение..... | 3 |
| 1. Физико – географическое описание района..... | 6 |
| 1.1 Описание водосбора реки Олонка – г.Олонец, республика Карелия..... | 6 |
| 1.2 Описание водосбора реки Кичменьга – п. Волома, Вологодская область | 8 |
| 1.3 Описание водосбора реки Лёкшма – п. Лядины, Архангельская область | 10 |
| 1.4 Описание водосбора реки Ловать – г.Холм, Новгородская область..... | 12 |
| 1.5 Описание водосбора реки Угра – Мокрое, Смоленская и Калужская области..... | 14 |
| 1.6 Описание водосбора реки Молога – п. Спас – Забережье, Тверская область..... | 16 |
| 2. Гидробиологические условия развития водных растений..... | 18 |
| 3.Современные методы учета стока в летний период..... | 25 |
| 3.1 Интерполяция измеренных расходов воды..... | 26 |
| 3.2 Метод переходных коэффициентов..... | 29 |
| 3.3 Регрессионно – гидравлические модели..... | 31 |
| 3.4 Интерполяция параметра Великанова..... | 35 |
| 4. Анализ результатов расчётов..... | 37 |
| Заключение..... | 44 |
| Список используемой литературы..... | 45 |

Введение

Большинство водотоков, протекающих на территории России, зарастает водной растительностью. Развитие водной растительности часто приводит к вредным последствиям: быстрому заилению и обмелению рек, каналов и водохранилищ, 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. Во многих случаях убытки, приносимые зарастанием в естественных условиях равнинных, болотистых рек, вообще не поддаются сколько-нибудь полному учету. Зарастание рек сопровождается подпором уровня воды, который нередко достигает по данным различных авторов /1,2/ 0,4-0,8 м, а иногда и 1,5 м, что в естественных условиях равнинных рек ведет к заболачиванию пойменных земель /3,4/.

Осложняется при зарастании русла и гидрометрический учет стока, так как развитие водной растительности на реках существенно сказывается на гидравлических характеристиках потока, таких как: коэффициент шероховатости, площадь живого сечения, средняя скорость течения и др. В результате зарастания уменьшаются скорости течения потока, 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.

Наиболее сложными для гидрометрического учета стока зарастающих рек являются периоды дождевых паводков, наблюдающиеся достаточно часто на многих реках и, как правило, недостаточно освещенные измерениями расходов воды, что приводит к увеличению погрешности учета стока.

В связи с вышесказанным особую важность приобретает повышение точности учета стока зарастающих рек с тем, чтобы адекватно оценивать и прогнозировать их состояние как элементов ландшафта. Именно в этом заключается одна из задач, реализуемых в России мониторинга водных объектов и программ охраны окружающей среды.

Современная практика учета стока основана на методическом руководстве, разработанном почти полвека назад /5/. Большинство методов, рекомендуемых руководством сводится во многом к различным графическим построениям и интуитивным приемам, мало пригодным для реализации на ЭВМ, эти недостатки присущи и методам переходных коэффициентов и временных кривых, используемых для учета стока зарастающих рек в паводочный период. Между тем, очевидна необходимость перехода на компьютерную технологию учета стока, использующую современные, физически обоснованные методы, опирающиеся на единую методологию.

Цель исследований заключается в совершенствовании методики гидрометрического учета стока зарастающих рек в периоды дождевых паводков. В качестве объекта исследований служили зарастающие реки Европейской территории России (ЕТР).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Оценить изменение гидравлических сопротивлений зарастающих русел в периоды дождевых паводков.
2. На основе сравнительного анализа результатов расчета оценить эффективность применения рассматриваемых методов.

3. Выявить, есть ли предпочтения в выборе методик, для расчётов стока рек с выраженными паводками и для рек с неярко выраженными паводками.

В качестве исходного материала использовались данные наблюдений на гидрологической сети Росгидромета.

Для решения поставленных задач выполнялись регрессионно-статистическая обработка гидрометрических данных и численные эксперименты на ПЭВМ.

1. Физико – географическое описание района

Исследования велись по рекам, протекающим на Европейской территории России. К северу относится река Олонец – Олонец, республики Карелия и река Лекшма – Лядины, Архангельской области. К центральной части – река Кичменьга – Волома, Вологодской области, река Ловать – г.Холм, Новгородской области, река Угра – Мокрое, Смоленской области и река Молога – Спас Забережье, Тверской области.

1.1 Описание водосбора реки Олонка – г.Олонец, республика Карелия

Река Олонка протекает на территории Республики Карелия. Площадь Карелии 180,5 тыс. кв. км (1,0% территории Российской Федерации). Протяженность территории республики с севера на юг достигает 660 км. С запада на восток по широте города Кеми продолжительность составляет 424 км.

На западе Карелия граничит с Финляндией, а на юге – с Ленинградской и Вологодской областями, на севере – с Мурманской, на востоке – с Архангельской областью. На северо-востоке республика омывается Белым морем. Западная граница Карелии совпадает с государственной границей Российской Федерации и Финляндии и имеет протяженность в 798 км.

Река Олонка протекает по Олонецкому национальному району Республики Карелия. Исток берёт в озере Утозеро, устье – в Ладожском озере. Перепад высот между истоком и устьем – 66 метров. Длина реки – 87 километров. Крупнейшие притоки: Мегрега, Тукса, Пеки, Улванка.

Олонка – равнинная река, протекает преимущественно в заболоченной местности. Русло извилистое, неглубокое, течение медленное. На всём протяжении большое количество перекатов. Ширина русла от 40 до 170 м, глубина от 1 до 3,5 м. Уклон около 0,76‰. Берега крутые, высотой достигая

до 4м. По качеству вода Олонки является загрязнённой. Основные источники загрязнения – сброс промышленных и бытовых вод и отходов.

Карелия располагается в пределах восточной части Балтийского щита. Большая часть территории Карелии - холмистая равнина с ярко выраженными следами деятельности ледника. Более 49% площади республики покрыто лесом, 25% территории составляет водная поверхность.

Основные полезные ископаемые: железная руда, титан, ванадий, молибден, благородные металлы, алмазы, слюда, строительные материалы (граниты, диабазы, мраморы), керамическое сырьё (пегматиты, шпат), апатит-карбонатные руды, щелочной амфибол-асбест.

Климат республики Карелия умеренно континентальный с чертами морского.

Он характеризуется длительной, относительно мягкой зимой и коротким прохладным летом, большой облачностью и большим количеством осадков в течение года.

Продолжительность светлого времени суток в среднем по республике составляет: 22 часа в июне, 21 час в июле, 16 часов в августе. Полярная ночь на севере республики и незначительная высота солнца над горизонтом в средней и южной ее части обуславливают зимой отрицательный радиационный баланс поверхности.

Вследствие влияния Атлантики и близости к Северному Ледовитому океану климат Карелии является неустойчивым, один тип погоды резко сменяется другим. Но благодаря влиянию Атлантического океана среднегодовая температура воздуха в регионе в среднем на 10° выше, чем в более континентальных районах - в Сибири и Якутии, лежащих на той же географической широте. Среднегодовая температура от 0 до + 3° С. Средние температуры января минус 8 - 13° С, июля - плюс 14 - 16° С. Продолжительность безморозного периода от 80-90 дней на северо-западе республики, до 120-130 дней в Приладожье и Прионежье. Годовое

количество осадков колеблется от 450-550 мм на севере до 600-700 мм на юге.

Преимущественное значение для питания рек имеет весенний сток (более 50%). Весенние паводки проходят здесь в конце апреля – начале мая.

Реки, по условиям питания относятся к смешанному типу с преобладанием снегового питания. 40-50% стока рек приходится на талые воды в весенний период, 30-40% стока на дождевые осадки и 10-20% подземные воды. За счёт подземных вод происходит питание в зимний период. Грунтовое питание рек, как правило, объёмное и осуществляется в основном за счет верхних грунтовых вод, аккумулированных в летне-осенний период. В питании рек, помимо грунтовых вод, некоторое участие принимают трещинные воды коры выветривания кристаллических пород. Исключением являются карстовые районы, которые характеризуются неглубоким залеганием легко растворимых силурийских и других известняков.

1.2 Описание водосбора реки Кичменьга – п. Волома, Вологодская область

Река Кичменга протекает на территории Вологодской области. Площадь области составляет 144 527 км². Наибольшая протяженность с севера на юг — 385 км, с запада на восток — 650 км.

Область делит границу с восемью субъектами Российской Федерации: Архангельской областью на севере, Кировской — на востоке, с Костромской и Ярославской — на юге, с Тверской и Новгородской — на юго-западе, с Ленинградской — на западе, и Республикой Карелия — на северо-западе.

Река Кичменга является левым притоком реки Юг (бассейн Северной Двины). Она протекает по территории Кичменгско-Городетского и Великоустюгского районов.

Длина реки — 208 км, площадь бассейна — 2330 км. Кичменга берёт начало в Кичменгских болотах к северо-западу от Кичменгского Городка, в верхнем и среднем течении описывает большое незамкнутое кольцо в ненаселённой местности вокруг холмистых северных отрогов Северных Увалов. Течение сильное, встречаются каменистые перекаты. Русло сильно меандрирует, особенно в верховьях. В нижнем течении входит в населённую территорию, впадает в р. Юг в черте села Кичменгский Городок.

Все притоки Кичменьги относятся к малым рекам и ручьям, крупнейшие из них: правый – Светица (62 км); левый – Шарженьга (53 км).

Русло реки извилистое, но не имеет многорукавности. Течение реки быстрое, дно сложено галькой и мелкими валунами, встречаются каменистые перекаты. Пойма узкая, ширина 0,3–0,4 км.

Вологодская область расположена в северной части Восточно-Европейской равнины высотой 150–200 метров. Поверхность – низменная равнина с множеством озёр, болот, рек и большим количеством невысоких гряд и возвышенностей. На территории области – водораздел проходит по Евразии между бассейнами Северного Ледовитого, Атлантического океанов и бассейном внутреннего стока Каспийского моря. Для западной части характерен относительно разделённый моренно-озёрный рельеф области валдайского оледенения.

В геологическом отношении Вологодская область расположена в пределах Московской синеклизы Русской плиты древней Восточно-Европейской платформы. Поверхность фундамента, сложенного породами архейского и раннепротерозойского возрастов, постепенно опускается с северо-запада на юго-восток и восток.

Климат умеренно континентальный с длительной умеренно холодной зимой и относительно коротким тёплым летом. Суровость климата увеличивается с запада на восток. Средняя температура января от -11°C на западе области до -14°C на востоке, июля соответственно от 16 до $17,3^{\circ}\text{C}$. Осадков в год 500–650 мм (максимум – в летние месяцы). Снежный покров лежит 165–170 дней.

Продолжительность вегетационного периода колеблется от 125 до 230 суток, в среднем 170 дней.

Вегетационный период делится на три фазы:

1. Фаза роста водной растительности.
2. Фаза стабильного состояния водной растительности.
3. Фаза отмирания водной растительности.

Фаза роста обычно начинается при температуре воды около $+8^{\circ}\text{C}$.

Реки Вологодской области имеют смешанное снегово-дождевое (отчасти грунтовое) питание. На апрель – июнь приходится примерно половина годового стока рек.

Качество воды в Кичменьге оценивается как «чистая».

Верхнее и среднее течение проходит в необитаемой местности среди холмов Северных Увалов. Нижнее течение является населённой зоной, в устье находится Кичменгский городок, административный центр Кичменгско-Городецкого муниципального района Вологодской области.

1.3 Описание водосбора реки Лёкшма – п. Лядины, Архангельская область

Река Лёкшма протекает на территории Архангельской области.

Площадь Архангельской области составляет 589 913 км². Большая часть материковой территории Архангельской области располагается на Восточно-Европейской равнине. Северная граница на протяжении 3

тысяч км омывается водами Белого, Баренцева и Карского морей, которые относятся к бассейну Северного Ледовитого океана. Большая часть территории области (практически все крупные острова и архипелаги) расположены выше границы Северного полярного круга.

В состав области также входит Ненецкий автономный округ (НАО), архипелаги Новая Земля и Земля Франца-Иосифа, Соловецкие острова, острова Колгуев и Виктория.

Река Лёкшма протекает в Каргопольском районе Архангельской области России. Принадлежит бассейну реки Онега. Длина Лёкшмы — 73 км, площадь водосбора — 1070 км². Река берёт начало из озера Лёкшмозеро, впадает в озеро Лача. Крупнейшие притоки: р. Сиянга, р. Воя, р. Пежма.

Территория области представляет собой обширную равнину со слабо выраженным уклоном к Белому и Баренцеву морям. На северо-западе области сохранились моренные нагромождения с множеством замкнутых впадин, занятых озёрами, и с холмами, сливающимися в целые цепи (Летние горы Онежского полуострова и др.).

На юге Коношско-Няндомская возвышенность достигает высоты до 250 м. На востоке в границы области входят Северный и Средний Тиман — низкогорье из ряда параллельных гряд с платообразными вершинами высотой до 400–450 м. На западе вдоль Онежского залива протягивается кряж Ветренный Пояс.

Область имеет большое количество полезных ископаемых. В регионе открыты их значительные запасы.

Климат умеренно континентальный, на северо-востоке — субарктический. Погода крайне нестабильна. Зима холодная. Средние температуры января от –12 до –18 °С, июля от 16 °С на юге, до 8–10 °С на севере. Лето непродолжительное и прохладное.

Вегетационный период от 50–60 дней на севере до 150–155 дней на юге. Осадков от 300 до 500 мм в год. На побережье Белого моря зачастую

наблюдаются туманы (до 60 дней в году). На северо-востоке распространена многолетняя мерзлота. В области густая сеть рек и озёр. Все реки (кроме Илексы) относятся к бассейну Северного Ледовитого океана. Осадки выпадают от 400 до 600 мм в год.

Тип питания реки - смешанный, в котором преобладает снеговой тип.

Начало произрастания водных растений происходит при переходе температуры воды за отметку +8 °С. Нельзя не отметить и скоростной режим потока, характер течения со средними скоростями от 0,15 до 0,25 м/с наиболее благоприятен для зарастания.

1.4 Описание водосбора реки Ловать – г.Холм, Новгородская область

Река Ловать протекает на территории Новгородской области.

Площадь области 55 300 км². Область расположена на северо-западе Европейской части России. Наибольшая часть территории — плоская, местами заболоченная Приильменная низменность, в центре которой — озеро Ильмень.

Новгородская область имеет общую границу на севере с Ленинградской, на северо-востоке — с Вологодской, на юго-востоке и юге — с Тверской, на западе — с Псковской областями.

Река Ловать вытекает из озера Ловатец (Белоруссия), впадает в озеро Ильмень. Длина реки 530 км, площадь бассейна — 21,9 тыс. км². Основные притоки: р. Кунья – правый приток и левые притоки - р. Насва, р. Локня, р. Редья и р. Полисть.

Бассейн реки Ловать богат большим количеством озёр и болот. В верхнем течении Ловати – цепь озёр, соединенных протоками. Болота занимают до 8% площади бассейна. Залесённость территории составляет около 50%.

В среднем течении река пересекает Валдайскую возвышенность. На этом участке дно реки каменистое, много порогов и перекатов, берега высокие, нередко обрывистые. В 60 км от устья Ловать выходит на Приильменскую низменность.

Русло реки извилистое и очень широкое (до 100 м), берега реки – низкие. При впадении в озеро Ловать образует дельту. Один из дельтовых рукавов связан с р. Полой.

Новгородская область располагается на северо-западе Восточно-Европейской равнины. По характеру рельефа подразделяется на равнинную западную и возвышенную восточную части.

На западной части плоская озёрно-ледниковая Приильменская низменность, высотой от 20 до 100 м. В её пределах встречаются моренные и водно-ледниковые разобщённые гряды длиной до нескольких километров, высотой до 10 м. В восточной части располагается холмистая, сильно расчленённая моренная Валдайская возвышенность.

Новгородская область бедна полезными ископаемыми. Имеются месторождения огнеупорных глин (каолинов) – Окладнево, Малиновецкое, Шиботовское и др.; кирпично-черепичных глин – Боровичское; кварцевых песков – Неболчинское, Крапивненское; подземных пресных и минеральных вод.

Климат умеренно континентальный, близкий к морскому, для которого характерны избыточное увлажнение, прохладное лето, теплая длительная осень, умеренно-мягкая зима и прохладная затяжная весна. Туманы бывают на протяжении всей зимы в утренние часы (от 5 до 15 дней с туманом в месяц). Число пасмурных дней от 10 до 28 в месяц (максимум в декабре), ясных 2-6 дня в месяц.

Летом дожди, как правило, бывают кратковременные (12-17 дней с дождями в месяц). Число ясных дней в месяц в среднем около 10, изредка до 19. В ночные часы и утром бывают туманы (5-8 дней с туманом в месяц).

Вегетационный период длится в среднем 175 дней, за это время выпадает 400-430 мм осадков, что составляет 60% годовой нормы.

Весеннее половодье начинается в конце марта – начале апреля. При прохождении волны половодья возможны наводнения. На период повышенного стока, это период как правило со второй половины марта по май, приходится до 55% годового стока; на период летне-осенней межени – всего около 23% стока, на холодный, зимний период – 22% стока.

Тип питания смешанный. Характеризуется высоким половодьем, низкой летней меженью. Мутность реки Ловать относительно невысокая.

Вода по химическому составу относится к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе; по качеству соответствует слабозагрязнённым водным объектам. Воды реки используется для водоснабжения. В бассейне реки находятся Рдейский и Полистовский заповедники.

1.5 Описание водосбора реки Угра – Мокрое, Смоленская и Калужская области

Река Угра протекает на территории Смоленской и Калужской областей.

Площадь Смоленской области составляет 49 779 км². Граничит на западе с Белоруссией (Витебская и Могилёвская области), а также на севере с Псковской и Тверской областями, на востоке с Московской областью, на юго-востоке с Калужской областью, на юге с Брянской областью.

Река берёт своё начало на Смоленско-Московской возвышенности; впадает в Оку в 12 км выше г. Калуги. Длина реки 399 км, площадь бассейна 15,7 тыс. км². Наиболее крупные притоки: р. Реса

(правый); р. Воря, р. Шаня, р. Суходрев (левые). В бассейне р. Угры насчитывается 213 озёр и водохранилищ общей площадью 4,76 км².

В целом поверхность рельефа волнистая, с холмистыми участками и сравнительно глубоко врезынными речными долинами. Большая часть территории располагается в пределах Смоленской, Духовщинской (до 282 м) и Вяземской возвышенностей.

Максимальная отметка региона — 321 м у деревни Марьино Вяземского района. На северо-западе имеются моренные гряды (Слободская - до 241 м) и другие), участки Витебской (до 232 м) и Валдайской возвышенностей. На востоке участок Московской возвышенности (высоты до 255 м).

Низины — Вазузская, Верхнеднепровская, Березинская; Приднепровская низменность на крайнем юге области с абсолютными отметками от 175 м до 180 м и Прибалтийская низменность в северо-западной части, где находится самая низкая отметка — 141 м по берегу реки Западная Двина на границе с Белоруссией.

Климат бассейна умеренно континентальный. Среднегодовая температура воздуха составляет +4,0°С...+4,5°С. Средняя температура января -10°С, июля – +17°С. В среднем за год выпадает 600–650 мм осадков (наибольшая часть в виде летних дождей). Бассейн реки расположен в зоне смешанных лесов.

В верхнем течении склоны долины умеренно крутые, высотой 4–15 м; в нижнем течении крутизна склонов увеличивается, а глубина вреза долины достигает 30–40 м. На склонах долины развита овражная эрозия. Ширина долины в нижнем течении реки 3,5 км. Ширина поймы изменяется от 1–2 до 3,5 км. В нижнем течении ширина русла 70–80 м. Берега крутые, обрывистые, высотой 3–5 м, сложены песками и супесью, легко размываются.

Русло Угры умеренно извилистое, неразветвлённое. Глубина русла в межень на перекатах 0,4–0,6 м, на плёсах 4 м. Скорость течения составляет 0,4–0,6 м/с. Русловые отложения: песок, гравий.

Питание реки преимущественно снеговое. Восточно-европейский тип водного режима. Весеннее половодье начинается в конце марта, заканчивается в первой декаде мая.

Минерализация воды в летнюю межень 260–360 мг/л, в зимний период возрастает до 400–500 мг/л. Вода по химическому составу относится к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе, по качеству – можно отнести к условно чистой.

1.6 Описание водосбора реки Молога – п. Спас – Забережье, Тверская область

Река Молога протекает на территории Тверской, Новгородской и Псковской областях.

Тверская область расположена на западе средней части Восточно-Европейской равнины. Она раскинулась на 260 км с севера на юг и на 450 км с запада на восток. Площадь региона составляет 84 201 км².

Исток реки берёт свое начало в районе деревни Ключевая Тверской области. Р. Молога впадает в Весьегонский плёс Рыбинского водохранилища. Длина реки 456 км, площадь бассейна 29,7 тыс. км² (без учёта водосбора оз. Меглино, из которого вода в основном поступает в р. Мсту). Крупные притоки: р. Мелеча (правый), р. Могоча, р. Волчина, р. Кобожа, р. Чагодоца (левые). В бассейне реки много озёр.

Рельеф бассейна, в большей степени, соответствует равнинному. Долина реки расположена в пределах Молого-Шекснинской низменности. На западе — Валдайская возвышенность, на востоке Молого-Шекснинская низменность, на крайнем западе — Плоскошская низина, в центре Тверская

моренная гряда. Верхняя точка («Макушка Валдая») — 346,9 м — около деревни Починок Фировского района, нижний уровень — 61 м — берег реки Кунья на границе с Новгородской областью.

Климат умеренно континентальный. Ежегодно выпадает около 650 мм осадков. Увлажнение территории обильное. В бассейне преобладают таёжные ландшафты, подзолистые, дерново-подзолистые и болотные почвы. Лесистость бассейна в среднем равна 60%.

В верхнем течении долина реки слабо выражена, русло реки имеет плавневый характер на 35% длины. Ниже по течению ширина долины достигает 4 км, поймы — 1–1,5 км.

Прямолинейные участки русла чередуются с пологими сегментными, а затем — вынужденными синусоидальными излучинами. Вогнутые берега излучин размываются со скоростью от 0,5 до 5 м/год.

При пересечении рекой моренных гряд и отрогов Бежецкого Верха ширина её русла сильно уменьшается, скорости течения достигают максимума на порожистых участках русла. В 200 км от устья русло реки имеет прямолинейный участок. Коренные берега отступают со скоростью 0,5 м/год. По берегам — следы схода оползней.

Питание реки смешанное с некоторым преобладанием снегового питания. Река имеет восточноевропейский тип водного режима. Половодье проходит в марте–мае. Продолжительность половодья 3–6 недель.

Среднемноголетняя мутность воды составляет 0,017 кг/м³. Речные воды относятся к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе. Минерализация изменяется от 45–90 мг/л в половодье до 275–300 мг/л в межень. Воды реки соответствуют слабо загрязнённым.

2. Гидробиологические условия развития водных растений

Знания о гидробиологических условиях развития водных растений, об их закономерностях очень важны для подбора расчетных методик и внедрения новых расчетных схем. Значительно сложнее обстоит проблема расчета гидравлических сопротивлений в зарастающих руслах. Это обусловлено весьма сложной структурой потоков в заросших руслах, трудно поддающейся схематизации и анализу.

Зарастание русел проявляется в двух аспектах; гидравлический, как фактор, создающий дополнительные сопротивления движению потока, и – гидрометрический, как фактор, проявляющийся в неоднозначности связи расходов и уровней воды.

Первый аспект получил в последнее время достаточно широкое развитие.

Водная растительность в русле, как фактор гидравлических сопротивлений может быть представлена (рис.2.1):

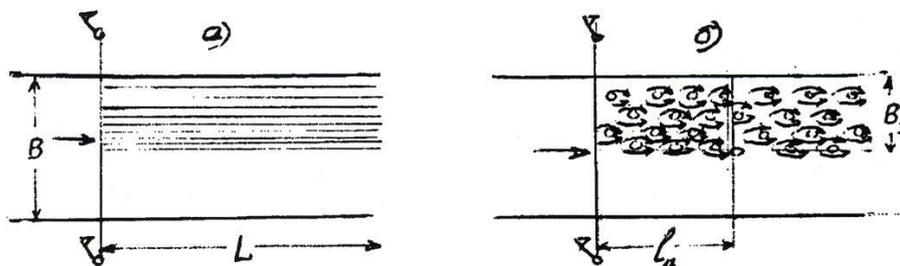


Рис.2.1 Водная растительность в русле, как фактор гидравлических сопротивлений.

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

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

Первая схема наиболее полно рассмотрена В.Н. Гончаровым. Им были получены формулы, позволяющие оценить коэффициенты шероховатости зарастающих русел n . При этом в зависимости от густоты и относительной высоты стеблей водных растений, отношение коэффициента заросшего русла n_3 к коэффициенту шероховатости свободного русла n_0 могло составлять от 3 до 7,5, а в пределе достигает 30.

Механизм взаимодействия потока и водных растений, их отдельных элементов и целых массивов крайне сложен, поэтому более реальна вторая схема – совокупность препятствий, оказывающих сопротивление движению потока.

Наряду с увеличением шероховатости, появление растений в русле ведет к стеснению его живого сечения. При значительной плотности водной растительности в русле именно на нее приходится основная доля сопротивлений движению потока, а трением о дно, как правило, пренебрегают.

Заращение, как фактор, влияющий на изменение пропускной способности русла – одно из наиболее распространенных явлений почти во всех климатических зонах. Так, например, на территории Северо-Запада, около 40 % рек относятся к зарастающим.

Видовая совокупность водных растений очень многообразна, и природа нам оставляет максимум неопределенности в этом вопросе. Однако можно выделить четыре основные группы водной растительности:

- 1) водноболотная группа,
- 2) воздушно-водная, сюда относится тростник, рогоз,
- 3) прикрепленные растения с плавающими листьями – это такие, как кувшинка, кубышка,
- 4) погруженная растительность – рдест, роголистник.

Первые две группы образуют – гидрофиты, а третья и четвертая группы образуют – гидатофиты. Флора только цветковых водных растений (это

высшие водные растения) на территории России насчитывает свыше 250 видов, принадлежащим к 40 семействам.

Несмотря на то, что растительный мир водных объектов достаточно разнообразен, видовой состав водных растений интразональный, т.е. одни и те же виды встречаются в разных географических зонах, с той лишь разницей, что в зонах более теплых водные растения того же вида будут крупнее, чем в более холодных зонах. Будет различаться так же и время вегетации, в более теплых районах это время будет более длительным.

Выделено три зоны зарастания рек ЕТР по признаку сроков наступления и продолжительности вегетационного периода. Для всех трех зон обнаружена закономерность, степень зарастания пропорциональна площади водосбора реки. Чем меньше площадь водосбора реки, тем больше ее зарастание и наоборот, с увеличением площади водосбора – зарастание уменьшается, а на реках с площадями водосборов более 25000 км² зарастание теряет свое влияние на пропускную способность русла.

Вместе с тем, нельзя утверждать однозначно, что если физико-географические условия бассейнов рек примерно одинаковы, то они одинаково подвержены зарастанию, так как на зарастание реки помимо географического положения и размеров водотока влияют очень многие факторы (температура, освещенность, скорости течения, устойчивость грунтов дна и берегов, наличие растворенных в воде веществ и т.д.). В этом заключается сложность проблемы, связанной с оценкой влияния водных растений на гидравлические сопротивления русла и его пропускную способность.

Растительность оказывает значительное дополнительное сопротивление движению руслового потока, являясь особым и очень сложным видом шероховатости.

Зарастание рек длительный и сложный процесс, развитие которого обусловлено совместным влиянием различных факторов. Растения в ходе своего развития и жизнедеятельности меняют условия своего существования,

подчиняясь естественным закономерностям. Основные факторы, обуславливающие развитие водной растительности можно объединить в следующие группы:

- гидрологический режим реки
- термический режим
- естественный химический состав воды

Гидрологический режим включает в себя характеристики жидкого и твердого стока, особенности морфологического строения участка реки, рельеф дна и характер грунтов, режим движения донных наносов и пр. В особые группы объединяются характеристики термического и химического стока, так как они в значительной мере определяют основные условия произрастания водной растительности.

Примерно при скоростях течения свыше 0,7-0,9 м/сек. растения прижимаются ко дну или даже вырываются. Таким образом, течение стремится «прогнать» поселяющиеся в реке существа, а если они оказываются стойкими против его давления, то обеспечивает им хорошие кормовые и кислородные условия. Надо сказать, что в условиях течения и температура проявляется без скачков, более умеренно и плавно, чем в стоячих водах.

Корневая система у водных растений в основном слабая, а у некоторых она полностью отсутствует (например – турча, роголист). Слабое развитие корневой системы приводит к вымыванию водной растительности во время прохождения половодий и дождевых паводков.

Промежуток времени, за которое растительность проходит все фазы своего развития, называется вегетационным периодом. Общая продолжительность вегетационного периода колеблется от 125 до 230 суток, в среднем 170 дней. Вегетационный период подразделяют на три фазы:

1. Фаза роста водной растительности.
2. Фаза стабильного состояния водной растительности.

3. Фаза отмирания водной растительности.

Фаза роста обычно продолжается около месяца, начинается при температуре воды около $+8^{\circ}\text{C}$. Температурный режим один из основных факторов влияющих на развитие водных растений. Так при отсутствии необходимых термических условий (температура воды менее $+8^{\circ}\text{C}$), водная растительность не будет развиваться.

Интенсивность роста водной растительности в первую фазу их развития, пропорциональна интенсивности роста среднесуточных температур. По данным Е.А.Леонова на рисунке 2.2 показан ход температуры воды и роста осоки, рдеста и кувшинки.

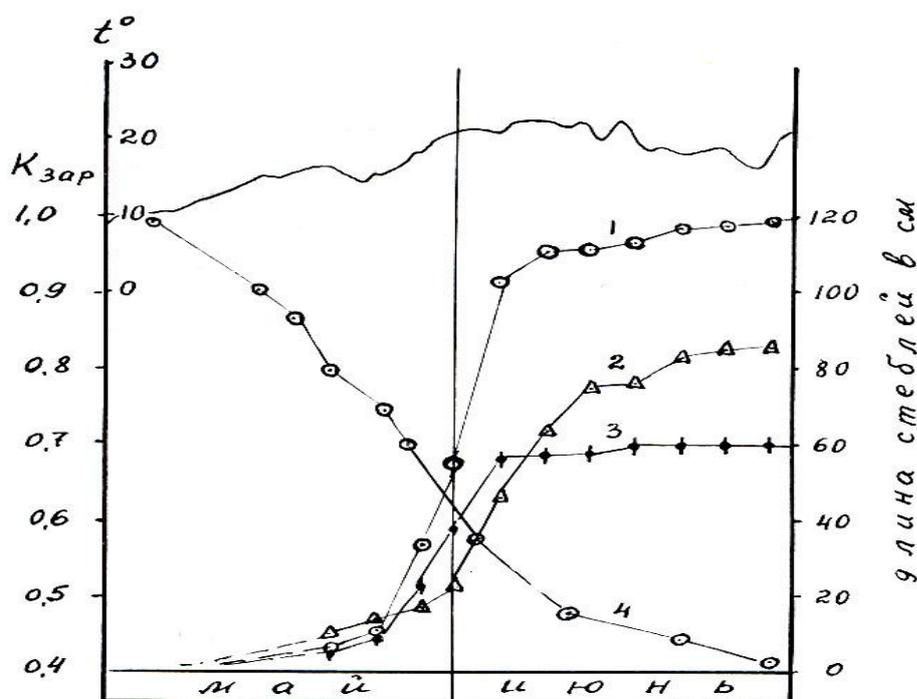


Рис.2.2 Изменения коэффициентов $K_{зар}$, длины стеблей водной растительности от температуры воды по данным Е.А.Леонова (р.Сороть-д.Осинкино, 1960г.): 1 – изменение длины рдеста, 2 – кувшинки, 3 – осоки, 4 – изменение $K_{зар}$.

Фаза стабильного состояния водной растительности обычно начинается в середине июня-июля и продолжается до середины августа, в среднем эта фаза, до моментов первых признаков увядания, длится около 100-110 дней. В

эту фазу развития водных растений наблюдается цветение большинства высших водных растений.

Фаза отмирания водной растительности длится два-три месяца. Освобождение русла реки от остатков растительности на некоторых реках предшествует появлению ледовых явлений, а иногда завершается в условиях ледового режима. Однако полное очищение русла от остатков растительности наблюдается не зимой, а в течение ледохода и паводка следующего года.

На развитие водных растений влияют не только термические и гидравлические условия, но и грунты дна и берегов, в частности содержание в них илистых и мелкопесчаных частиц, составляющих питательную среду для развития биомассы.

Они поступают непосредственно с поверхности и склонов водосборов. Часть их аккумулируется главным образом в долинах и руслах верхних звеньев речных систем. Однако наносы бассейнового происхождения наблюдаются и в руслах достаточно высоких порядков.

Распространение продуктов эрозии с поверхности водосборов в речных системах ЕТР исследовал В.Н.Голосов. На рисунке 2.3 представлен график изменения коэффициента доставки с водосбора по исследованиям В.Н.Голосова.

На основе баланса наносов, поступивших в речную сеть, получено выражение для коэффициента их доставки, как отношение объема их стока в замыкающем створе W_3 к объему продукта смыва с поверхности бассейна W_c :

$$D = W_c / W_3 = 0,65A^{-0,27} \quad (2.1)$$

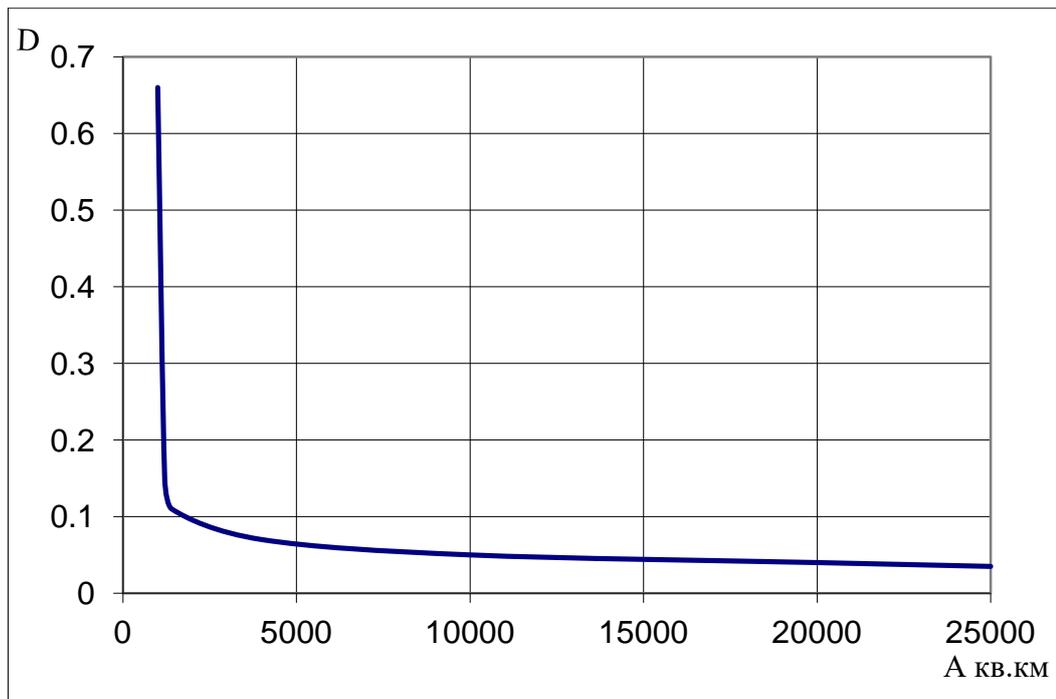


Рис. 2.3. Изменение коэффициента доставки наносов с водосбора в зависимости от площади водосбора.

График $D=f(A)$ представлен на рис.2.3. Из полученного графика следует, что начиная с площадей водосборов от 2000 км^2 и до 25000 км^2 , коэффициент доставки наносов с водосбора уменьшается. Для других площадей водосборов D мало изменяется, при $A=1000 \text{ км}^2 - D=0,65$: а при $A=25000 \text{ км}^2 -$ значения D уменьшается на порядок. Отсюда можно заключить, что на реках имеющих площади бассейна, близкие к этому пределу, зарастание может считаться гидравлически несущественным. На те же предельные значения площади водосбора указывал и Е.А.Леонов.

Таким образом, 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 км^2 не зарастают.

3.Современные методы учета стока в летний период

Современная практика гидрометрического учета стока зарастающих рек основана на методическом руководстве, разработанным почти пол века назад. Согласно содержащимся в нем рекомендациям, для получения сколько-нибудь надежных данных необходимо выполнять большое количество трудоемких измерений расходов воды (до 5-10 раз в месяц), что находится в явном несоответствии с экономическими возможностями настоящего времени.

Потребность же в повышении надежности учета стока зарастающих рек приобретает особую актуальность в связи с возрастающими масштабами контроля экологии ландшафтов и реализацией системы мониторинга водных объектов.

Необходимость в большом количестве измерений расходов воды, регламентированным действующими методическими рекомендациями, проистекает из того, что в них игнорируются гидравлические закономерности движения потока в интервале между измерениями.

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 $Q(H)$.

При неоднозначности этой связи, обусловленной изменением пропускной способности русла под влиянием различных факторов, в том числе зарастания дна и берегов, приходится прибегать к различным методам интерполяции характеристик пропускной способности русла в интервале между измерениями расходов воды.

В методическом арсенале речной гидрометрии все еще остаются различные расчетные схемы, не опирающиеся непосредственно на уравнения движения потока и физические зависимости для факторов, определяющих пропускную способность русла. Таковы методы Стаута, Больстера и др.

3.1 Интерполяция измеренных расходов воды

Измерения расходов воды служат основными исходными данными для учета стока воды. В качестве одного из методов вычисления стока зарастающей реки наставление /5/ рекомендует интерполяцию между измеренными расходами. При этом интерполяция выполняется графически, с криволинейным проведением интерполяционной линии (непосредственное построение гидрографа).

Кривая проводится осредненно, т.е. так, чтобы точки (Q, t) измеренных расходов равномерно распределялись по обе стороны кривой, что позволяет сгладить погрешности измерений. Интерполяционный график строится в масштабе, допускающем снятие с кривой расходов требуемой точности.

Для наглядности на рисунке 3.1 представлен пример такого интерполяционного графика.

Такой вариант графической интерполяции следует отнести к интуитивным приемам, точность которого во многом определяется знанием и опытом исполнителя.

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.

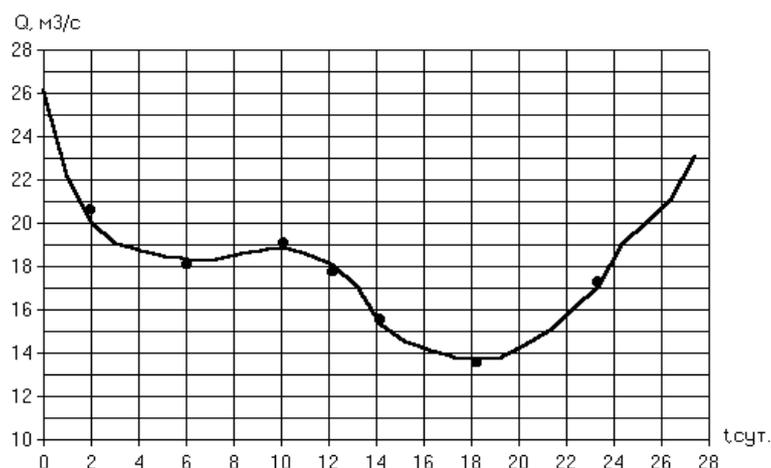


Рис.3.1 Графическая интерполяция измеренных расходов воды

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.

При прохождении дождевого паводка на зарастающей реке, как уже указывалось, существенно изменяется водность реки и пропускная способность русла, что требует, как правило, увеличения частоты измерений расходов воды.

В случае, если измерениями освещены все фазы паводка (ветвь подъема, пик и ветвь спада), интерполяция этих измерений является

наиболее достоверным (эталонным) способом вычисления стока в этот период.

Такие расчеты и построения выполнены нами для р.Кичменьга - д.Волома, 10.07-25.08.1971, в период прохождения паводка. Гидрограф для реки Кичменьги построен на основе интерполяции измеренных расходов.

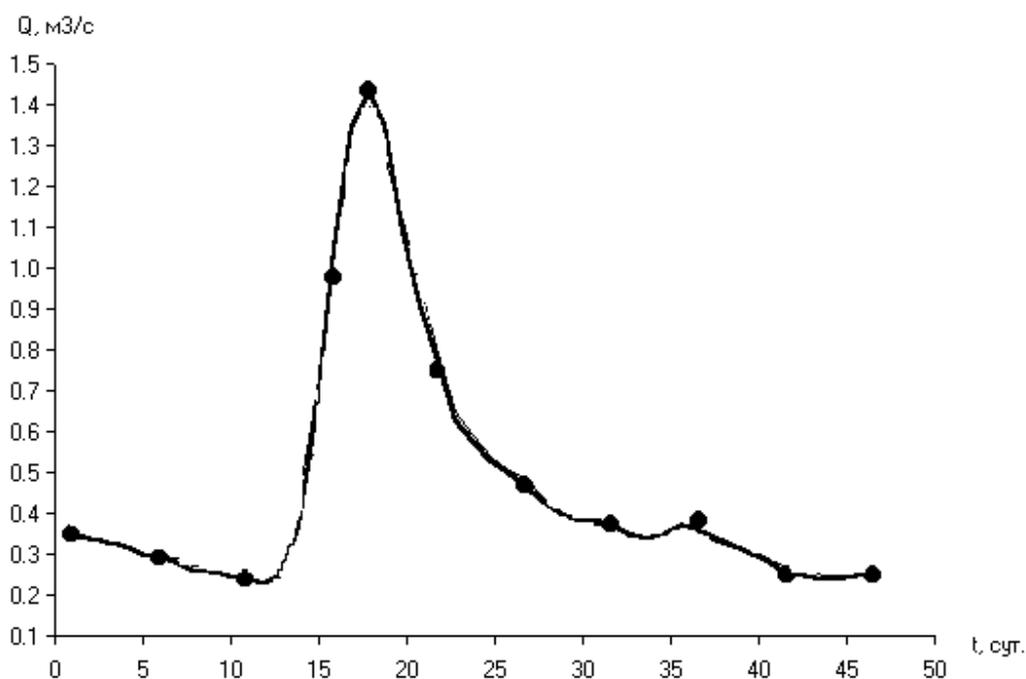


Рис.3.2. Интерполяция расходов воды при прохождении паводка.
р.Кичменьга - д.Волома, 10.07-25.08.1971

Как видно из рисунка 3.2 для данного случая все изменения водности в период прохождения паводка, освещены измерениями расходов воды, что дало возможность получить вполне удовлетворительные результаты при построении гидрографа стока.

Кроме того, что очень важно, большое количество измерений позволяет уточнить параметры моделей учета стока, применяемых при недостаточном количестве измерений, и оценить их погрешность.

К сожалению, в гидрометрической практике достаточно часто, в периоды дождевых паводков измерения расходов воды или отсутствуют полностью или не достаточно освещают изменения водности. В этом случае, для вычисления стока применяют метод переходных коэффициентов

3.2 Метод переходных коэффициентов

Основным способом вычисления стока воды при зарастании русла, рекомендуемым наставлением и применяемым на гидрологической сети является расчет по хронологическому графику переходных коэффициентов $K_{зар}$. Наиболее широкое распространение получило вычисление ежедневных расходов воды рек с зарастающим руслом способом переходных коэффициентов $K_{зар}$, разработанным А.В.Огиевским еще в тридцатых годах прошлого столетия.

Измеренный в заросшем русле расход воды $Q_{зар}$ относят к расходу воды Q_0 , определяемому по кривой расходов $Q_0(H)$ для свободного русла при том же уровне, и получают, так называемый, коэффициент зарастания: $K_{зар} = Q_{зар} / Q_0$. На основе полученных значений $K_{зар}$, строится хронологический график $K_{зар} = f(T)$.

По указанному графику находят значение $K_{зар}$ для каждого дня периода заросшего русла. Искомый расход данного дня $Q = Q_0 * K_{зар}$, где расход Q_0 снимается с кривой по наблюденному уровню этого дня.

Значение коэффициента $K_{зар}$, равного весной единице, уменьшается до 0,15 – 0,20 к середине лета в соответствии с интенсивностью зарастания, затем увеличивается. Огиевский указывает, что в конце вегетационного периода значение $K_{зар}$ будет приближаться к своему верхнему теоретическому пределу - единице.

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

В период паводков коэффициент $K_{зар}$ может сильно увеличиваться. Поэтому, 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 необходим вспомогательный график $K_{зар}=f(H)$ для данного паводка.

В речной гидрометрии $K_{зар}$ является основной характеристикой пропускной способности русла, которая всегда снижается при зарастании, то есть $K_{зар}$ 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. Но, этот приём некорректен. Так, как указывает И.Ф.Карасев, если устанавливать положение кривой $Q_0(H)$ для свободного русла по формуле Шези, то она расположится существенно правее кривой, используемой при составлении гидрологического ежегодника.

Более того, в результате полегания растений, как показывают опыты А.Лудова, описанные В.С.Боровковым, а также в некоторых случаях, при более благоприятных условиях обтекания берегов в межень (например, при зарастании сильно изрезанной береговой линии, водная растительность может сглаживать шероховатости берегов) вполне реальным становится уменьшение гидравлических сопротивлений, а следовательно, положение кривой $Q_0(H)$ левее поля точек расходов воды, измеренных при зарастании.

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

Само использование 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 выделить тенденцию их изменений в интервале между измерениями.

Но если при этом производится простая линейная интерполяция или более сложная, но формальная математическая интерполяция, не зависящая от гидравлических закономерностей изменения пропускной способности русла, то никакого уточнения результатов расчета не достигается.

Не обращая внимание на физические факторы, приводящие к неоднозначности связей $Q(H)$ некоторые специалисты, в частности известный методист из Эстонии Т.Ф.Эйпре /20/, предлагал не делать различия между $K_{зар}$ и $K_{зим}$, поскольку осенью первый может истолковываться как второй.

3.3 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 следовать из соответствующих математических моделей изучаемого процесса, а изменения должны служить для идентификации их параметров.

Применительно к гидрологии, с учетом гидравлических закономерностей движения потока в интервале между измерениями, была разработана регрессионно-гидравлическая модель гидрометрического учета стока зарастающих. В ее основе лежит формула Шези – Маннинга.

Достоинство 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, связано с 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, существенно сократив число ее переменных (факторов). 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. Поэтому, при назначении переменных уравнения для конкретного гидрометрического створа, можно ограничиться 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 периода 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 $\tau = 1$:

$$n_3 = n_0 / (1 + k_1 \tau + k_2 \tau^{4/3}), \quad (3.1)$$

где k_1 и k_2 - поправочные коэффициенты.

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

$$Q = \frac{\varpi^{5/3} \sqrt{I}}{B^{2/3} n_0} (1 + k_1 \tau + k_2 \tau^{4/3}), \quad (3.2)$$

где ϖ - 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.

Выражение $m=\sqrt{I/n}$ играет особую роль в динамике русловых потоков. Его использовал М. А. Великанов 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 используя $m_3=\sqrt{I/n_3}$ открывается возможность учета увеличения гидравлических сопротивлений при зарастании русла по сравнению с условиями свободного русла.

Новая методика гидрометрического учета стока зарастающих рек базируется на формуле Шези – Маннинга, на ее основе получено уравнение множественной линейной регрессии, параметры которого определяются методом наименьших квадратов по совокупности измеренных расходов воды.

Кроме того, в качестве определяющих факторов учитывались: средневегетационная температура воды и время от начала вегетации водных растений, которое совпадает с днем, когда температура воды становится выше 8°C.

$$m_3=a_0+a_1x_1+a_2x_2, \quad (3.3)$$

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.

Достаточно высокие значения сводных коэффициентов корреляции свидетельствуют о правомерности и достаточной адекватности принятой структуры РГМ. Формула для вычисления ЕРВ при этом получает следующий вид:

$$Q=(\varpi^{5/3}/B^{2/3})(a_0+a_1\tau+a_2\tau^{4/3}) \quad (3.4)$$

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

Как оказывается, при использовании полного ряда измеренных расходов воды гидрографы не обнаруживают резких различий. Однако рассчитанные на основе регрессионно-гидравлической модели ежедневные расходы воды сглаживают ряд измеренных расходов, а вариант $K_{\text{зар}}$ в день наблюдений дает ежедневные расходы воды, не отличающиеся от измеренных расходов воды. Этого и следовало ожидать, поскольку фактически интерполяция $K_{\text{зар}}$ в конечном счете сводится к интерполяции измеренных расходов воды.

Устойчивость параметров регрессионно-гидравлической модели создает возможность сокращения числа измерений расходов воды, без существенного снижения точности характеристик стока.

3.4 Интерполяция параметра Великанова

Несмотря на то, что в отдельных случаях модель РГМ в периоды дождевых паводков может давать удовлетворительные результаты, можно предположить, в целом для большинства рек регрессионно-гидравлическая модель будет занижать паводочный сток, так как процесс закономерного изменения пропускной способности при зарастании, описываемый моделью при существенных изменениях уровня воды нарушается.

Поэтому в периоды дождевых паводков, особенно если они не освещены измерениями расходов воды, возможно выполнение интерполяции параметра m , между значением, полученным по регрессионно-гидравлической модели на начало паводка и значением m , соответствующим

свободному руслу. Последнее назначается или по имеющимся расходам расчетного года, или по данным предшествующих лет с аналогичными условиями.

Указанный вариант расчета (еще недостаточно разработанный) по-видимому, имеет преимущества, по сравнению с интерполяцией Кзар, так как, во-первых, при вычислении стока дает практически такие же результаты, или для некоторых створов гораздо лучшие, во-вторых, не требует экстраполяции и использования КР.

4. Анализ результатов расчётов

Выполненный в третьей главе анализ современного состояния методов учета стока на зарастающих реках еще раз подтвердил необходимость перехода к более физически обоснованным методам, которые возможно использовать в компьютерной технологии вычисления стока.

Для обоснования применения новых методов выполнены сравнительные расчеты для 6 рек Европейской территории России; р. Олонец – п. Олонец, р. Кичменьга – п. Волома, р. Лекшма – п. Лядины, р. Ловать – п. Холм, р. Угра – п. Мокрое, р. Молога – г. Спас-Забережье.

В расчетах использовались данные наблюдений на реках, относящихся к характерным (имеющим необходимые термические условия для зарастающих рек) зонам Европейской территории России. Выбирались реки с различными площадями водосборов, наиболее освещенные измерениями расходов воды. В таблица 4.1 представлены гидрологические и географические характеристики расчетных рек.

Таблица 4.1 Гидролого-географические характеристики расчетных рек

| № | Река-пункт | Год | Qгод | F,км ² | Qмин.летн | Qнаиб.пав | Tпаводок |
|---|-------------------------|------|------|-------------------|-----------|-----------|----------|
| 1 | Олонец-Олонец | 2002 | 15,3 | 2200 | 3,06 | 35,3 | 29 |
| 2 | Кичменьга - Волома | 1971 | 2,15 | 2330 | 0,62 | 7,23 | 31 |
| 3 | Лекшма - Лядины | 1961 | 2,86 | 1070 | 0,82 | 5,12 | 38 |
| 4 | Ловать - Холм | 1968 | 101 | 21900 | 13,3 | 273 | 20 |
| 5 | Угра - Мокрое | 1971 | 77,6 | 15700 | 15,6 | 223 | 18 |
| 6 | Молога - Спас-Забережье | 1961 | 61,3 | 29700 | 10,9 | 73,7 | 32 |

В дальнейшем для каждой реки были рассчитаны параметры Великанова по натурным данным измеренных расходов воды, по формуле:

$$m = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}} \quad (4.1)$$

В таблице 4.2 приведены характерные значения параметров Великанова для исследуемых рек, на начало и конец периода вегетации, а также наименьшее значение параметра, соответствующее фазе максимального развития водной растительности в русле. Для периода прохождения паводка тоже были выбраны характерные значения параметров Великанова, на подъеме, на спаде и на пике паводка.

Таблица 4.2 Характерные значения параметра Великанова

| Река-пункт | Год | Тзар | m при зарастании | | | | m в паводок | | | |
|-----------------------|------|------|------------------|-------|------|------|-------------|------|------|------|
| | | | нач. | наим. | кон. | dm | нач. | пик | кон. | dm |
| Олонец-Олонец | 2002 | 99 | 0,12 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,10 | 0,15 | 0,09 | 0,06 |
| Кичменьга-Волома | 1971 | 117 | 0,37 | 0,15 | 0,29 | 0,22 | 0,15 | 0,22 | 0,18 | 0,07 |
| Лекшма-Лядины | 1961 | 160 | 0,67 | 0,22 | 0,34 | 0,45 | 0,22 | 0,43 | 0,25 | 0,21 |
| Ловать-Холм | 1968 | 76 | 0,39 | 0,21 | 0,25 | 0,18 | 0,27 | 0,35 | 0,25 | 0,10 |
| Угра-Мокрое | 1971 | 113 | 0,35 | 0,17 | 0,27 | 0,18 | 0,22 | 0,26 | 0,20 | 0,06 |
| Молога-Спас-Забережье | 1961 | 139 | 0,40 | 0,26 | 0,32 | 0,14 | 0,29 | 0,26 | 0,30 | 0,03 |

Предварительно, на основе значений параметра Великанова, полученных по данным измерений расходов воды, производилась оценка изменения пропускной способности русел, исследуемых рек (значение dm в таблице 4.2). Анализ этих оценок показывает, что рассматриваемые реки можно разбить на две группы: для первой, к которой относятся реки Олонец и Молога, параметр m в паводочный период практически не меняется или уменьшается, что свидетельствует о том, что, по-видимому, при прохождении паводка на этих реках гидравлическое сопротивление зарастающего русла изменяется несущественно.

Для второй группы рек (в которую входят остальные реки) характерно закономерное увеличение значения параметра Великанова при прохождении паводка, что показывает на уменьшение гидравлического сопротивления.

При вычислении стока за паводочные периоды в отдельные годы (выбирались годы, где дождевые паводки были достаточно освещены измерениями расходов воды) применялись три способа: метод переходных коэффициентов, регрессионно-гидравлическая модель и метод, основанный на интерполяции параметра Великанова.

Для оценки эффективности методов выполнялись два варианта расчета: при наличии данных измерений расходов воды в паводочный период (вариант 1) и при их сокращении или отсутствии (вариант 2).

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) в отдельные периоды (например, вначале подъема или на спаде уровня) могут давать более точные результаты.

Таким образом при наличии измерений расходов воды (вариант 1) в качестве эталонных принимались ежедневные расходы воды, приведенные в гидрологическом ежегоднике ($Q_{ге}$), а во втором варианте при сокращении числа измерений выполнялась линейная интерполяция переходных коэффициентов, полученных по данным измерений до и после прохождения паводка.

Расчетное уравнение регрессионно-гидравлической модели получалось по данным измерений за весь период зарастания русла (т.е. в этом случае использовались данные измерений за весь период зарастания).

Параметры модели РГМ (a_0, a_1, a_2) при полном числе измерений расходов воды приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 Параметры уравнения регрессии РГМ

| Река-Пост | PВ | a_0 | a_1 | a_2 | R | S |
|------------------------|----|-------|--------|--------|-------|-------|
| Олонец- Олонец | 5 | 0.122 | 0.013 | -0.083 | 0.808 | 0.019 |
| Кичменьга-Волома | 8 | 0.304 | -1.371 | 1.358 | 0.868 | 0.028 |
| Лекшма-Лядины | 6 | 0.628 | -2.824 | 2.585 | 0.913 | 0.064 |
| Ловать-Холм | 5 | 0.347 | -0.532 | 0.491 | 0.557 | 0.040 |
| Угра-.Мокрое | 3 | 0.309 | -0.729 | 0.657 | 0.771 | 0.036 |
| Молога –Спас-Забережье | 4 | 0.399 | -0.798 | 0.718 | 0.960 | 0.012 |

В таблице 4.4 приведены расчеты параметров уравнения регрессии при сокращенном числе измеренных расходов воды.

Таблица 4.4 Параметры уравнения регрессии РГМ

| Река-Пост | PВ | a_0 | a_1 | a_2 | R | S |
|-----------------------|----|-------|--------|-------|-------|-------|
| Олонец-Олонец | 2 | 0.116 | -0.181 | 0.127 | 0.950 | 0.025 |
| Кичменьга-Волома | 4 | 0.306 | -1.587 | 1.583 | 0.926 | 0.031 |
| Лекшма-Лядины | 3 | 0.642 | -3.231 | 2.958 | 0.960 | 0.071 |
| Ловать-Холм | 3 | 0.355 | 0.679 | 0.604 | 0.801 | 0.046 |
| Угра-Мокрое | 2 | 0.308 | -0.862 | 0.798 | 0.801 | 0.040 |
| Молога-Спас-Забережье | 2 | 0.398 | -0.771 | 0.691 | 0.967 | 0.012 |

В большинстве случаев при сокращении числа измерений расходов воды по которым выполнялись расчеты, значения параметров модели изменялись незначительно, т.е. данная модель дает устойчивые решения.

Вычисление стока на основе параметра Великанова производилась следующим образом:

- на каждый день измерения расхода воды, вычислялось значения параметра m ;
- для дней между измерениями PВ параметр 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:

$$Q = \frac{m\omega^{5/3}}{B^{2/3}}, \quad (4.2)$$

При отсутствии измерений расходов воды или их сокращении, для ветви подъема и спада паводка выполнялась линейная интерполяция между значениями m полученными в межень, соответственно перед и, после паводка, и для свободного русла перед зарастанием.

В таблице 4.5 представлены результаты расчетов средних за период зарастания расходов воды, рассчитанные тремя способами: по модели РГМ, по интерполяции параметра Великанова и методом переходных коэффициентов Кзим.

Результаты расчетов сопоставлены с данными гидрологических ежегодников и получены относительные погрешности в %, погрешности рассчитывались по всему ряду ежедневных расходов воды за период зарастания русла реки водной растительностью.

Таблица 4.5. Результаты расчета паводочного стока при зарастании

| N | Река-Пост | Год | РВ | $Q_{ге}$ | $Q_{ргм}$ | S% | $Q_{инт.м}$ | S% | $Q_{инт.К}$ | S% |
|---|----------------------|------|----|----------|-----------|-------|-------------|------|-------------|-------|
| 1 | Олонец- Олонец | 2002 | 5 | 13.3 | 11.4 | -14.3 | 13.0 | -2.3 | 13.1 | -1.5 |
| | | | 2 | 13.3 | 9.30 | -30.1 | 12.9 | -3.0 | 13.3 | 0.0 |
| 2 | Кичменьга- Волома | 1971 | 8 | 0.552 | 0.489 | -11.4 | 0.560 | 1.4 | 0.551 | -0.2 |
| | | | 4 | 0.552 | 0.435 | -21.2 | 0.612 | 10.9 | 0.557 | 0.9 |
| 3 | Лекшма-Лядины | 1961 | 6 | 4.46 | 3.69 | -17.3 | 4.43 | -0.7 | 4.45 | -0.2 |
| | | | 3 | 4.46 | 3.11 | -30.3 | 4.45 | -0.2 | 3.59 | -19.5 |
| 4 | Ловать-Холм | 1968 | 5 | 78.0 | 70.5 | -9.6 | 79.5 | 1.9 | 77.9 | -0.1 |
| | | | 3 | 78.0 | 70.5 | -9.6 | 74.2 | -4.9 | 80.5 | 3.2 |

| | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|------|---|------|------|-------|------|------|------|------|
| 5 | Угра-Мокрое | 1971 | 3 | 43.8 | 36.9 | -15.8 | 44.4 | 1.4 | 43.7 | -0.2 |
| | | | 2 | 43.8 | 35.1 | -19.9 | 42.9 | -2.1 | 42.5 | -3.0 |
| 6 | Молога – Спас-Забережье | 1961 | 4 | 58.7 | 56.6 | -3.6 | 55.7 | -5.1 | 58.7 | 0.0 |
| | | | 2 | 58.7 | 56.9 | -3.1 | 56.2 | -4.3 | 58.7 | 0.0 |

Результаты расчетов, представленные в таблице 4.5, где показаны средние за период паводка расходы, приведенные в ежегоднике ($Q_{ге}$) и рассчитанные по модели РГМ, на основе линейной интерполяции параметра m ($Q_{инт.m}$) и переходного коэффициента $K_{зар}$ ($Q_{инт.K}$), в столбце РВ указано количество измеренных расходов в месяц, по которым велись расчеты.

Сопоставление результатов расчетов по модели РГМ с данными ГЕ свидетельствует, о том, что для рек, на которых гидравлическое сопротивление при прохождении паводка практически не меняется (р. Олонец, р. Молога) модель дает удовлетворительные результаты в паводочный период.

В случае же существенных изменений сопротивления русла РГМ занижает сток, при этом относительное расхождение расчетных значений стока от данных ГЕ ($S\%$), весьма существенно и варьирует в пределах 9,6 – 17,3%.

Интерполяция параметра m при вычислении стока в паводочный период дает, закономерно лучшие результаты, чем метод переходных коэффициентов, так как более адекватно описывает изменения гидравлических условий при прохождении паводка.

Для наглядности на рисунке 4.1 представлен гидрограф стока для реки Лекшма - п. Лядины, за 1961 год, рассчитанный на основе линейной интерполяции параметра Великанова, за период зарастания русла водной растительностью, во время прохождения летнего паводка.

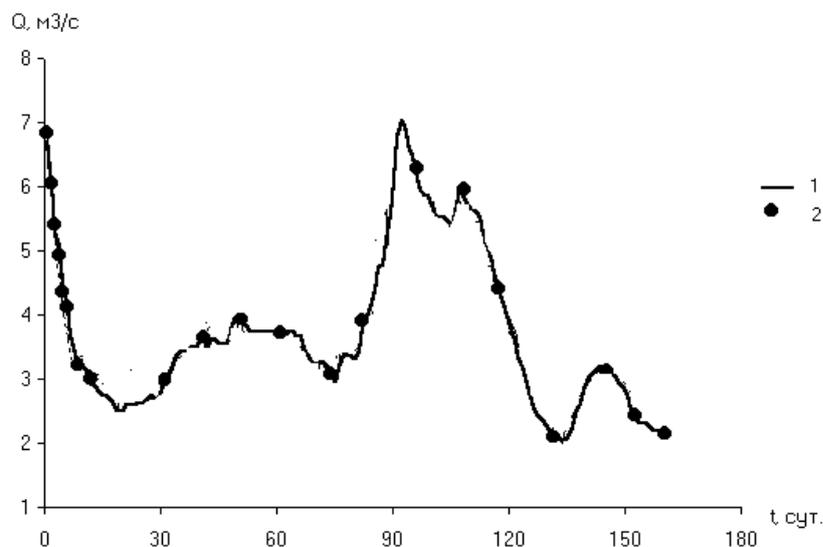


Рис. 4.1 Гидрограф стока, рассчитанный по хронологическому ходу параметра Великанова в период зарастания при дождевых паводках. р.Лекшма – д.Лядины, 1961.

Расхождение результатов расчета ($S\%$), выполненного на основе интерполяции параметра m , с данными ГЕ как правило не существенно (S варьировало в пределах $0,6 - 5,1 \%$, среднее $1,6 \%$).

Эффективность метода подтверждают и результаты, полученные при исключении из расчета данных измерений расходов воды в паводок, в этом случае погрешность вычисления стока, заметно не увеличивалась, хотя линейная интерполяция Кзар, например, для реки Лекшма приводила к значительному увеличению погрешности (с $-0,2$ до $-17,3\%$).

Как показали численные эксперименты, предложенная методика, основанная на хронологическом представлении параметра Великанова, в полной мере отражает изменения пропускной способности русла и является наиболее рациональной математической основой компьютерной технологии гидрометрического учета стока

Заключение

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- при прохождении дождевого паводка гидравлическое сопротивление зарастающего русла может существенно изменяться
- параметр Великанова позволяет количественно оценивать изменения гидравлических условий в зарастающем русле
- применяемые на сети методы вычисления стока в периоды дождевых паводков (переходных коэффициентов) не перспективны и не могут быть применены в компьютерной технологии, так как сводятся к графическим построениям и во многом опираются на опыт специалиста.
- модель РГМ адекватно описывающая изменение гидравлических условий при зарастании русла и эффективная в безпаводочный период, при прохождении паводка дает удовлетворительные результаты только для рек, на которых паводки не вызывают существенного изменения гидравлического сопротивления русла.
- применение интерполяции параметра Великанова при учете стока зарастающих рек в паводочный период дает возможность получать надежные и физически обоснованные результаты, как и в паводочный период, так и в года с неярко выраженными паводками.
- Таким образом методика, основанная на хронологическом представлении параметра Великанова (m), в полной мере отражающая изменения пропускной способности русла, служит наиболее рациональной математической основой для компьютерной технологии вычисления стока рек в период зарастания.

Список используемой литературы

1. Алекин О.А. Гидрохимия рек СССР – Л., Гидрометеиздат, 1948.
2. Алиев Д.С. Опыт использования белого амура для борьбы с зарастанием водоемов – Ашхабад.: Изд. АН Туркм., 1963.
3. Барышников Н.Б., Поташко Е.А., Скоморохова Е.М., Субботина Е.С. Антропогенное воздействие на пойменные процессы и гидравлику руслопойменных потоков // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 22. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2011. – С. 7-12.
4. Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В. Экологическое русловедение – М: ГЕОС, 2000.
5. Большаков В.А. Информационные технологии в прикладных задачах гидравлики //Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам XXVII международной научно-практической конференции/ Под общ. Ред. А.В. Туголукова – Москва: ИП Туголуков А.В., 2018. С 231– 233.
6. 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 – С. 217-219
7. Боровков В.С. Русловые процессы и динамика потоков на урбанизированных территориях -Л.: Гидрометеиздат, 1989.
8. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия – Л.: Гидрометеиздат, 1972.
9. 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.

10. Векшина Т.В. Микропроцессорные устройства в гидрометеорологии //Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам XXVII международной научно-практической конференции/ Под общ. Ред. А.В. Туголукова – Москва: ИП Туголуков А.В., 2018. С 234– 236.
11. 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. – С. 145-147
12. 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
13. Великанов М.А. Динамика русловых потоков -М.: Гидрометеиздат, 1954.Т1, М.: Гидрометеиздат 1955, Т2.
14. Веригин Б.В. Проблемы рыбохозяйственного использования растительных рыб в водоемах СССР – Ашхабад.: Изд. АН Туркм., 1963.
15. Голосов В.Н. Перераспределение наносов в верхних звеньях флювиальной сети земледельческих регионах: теория вопроса и опыт регионального анализа (на примере равнин умеренного пояса) В сб. «Эрозия почв и русловые процессы» вып.13, изд. МГУ, 2001, с.94-119.
16. Жадин В.И., Герд С.В. Реки, озера и водохранилища СССР их фауна и флора – М: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1961.
17. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов -Л.: Гидрометеиздат, 1980.

18. 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
19. Карасев И.Ф., Векшина Т.В. Режим гидравлических сопротивлений зарастающих русел. Труды Академии проблем водохозяйственных наук, вып.9 «Проблемы русловедения». – М., 2003, с.112-122.
20. Карасев И.Ф., Коваленко В.В. Стохастические методы речной гидравлики и гидрометрии.- СПб.: Гидрометеиздат, 1994
21. Карасев И.Ф., Сунцова Е.Б. Пропускная способность русла и учет стока зарастающих рек. Ж. «Гидротехническое строительство», №1, 2001.
22. Константинов А.С. Общая гидробиология – М: Высшая школа, 1986.
23. Наставление гидрометеорологическим станциям и потам, вып.6, ч. 1-3 - Л.: Гидрометеиздат, 1978.
24. Семенов В.А., Семенова И.В. Водные ресурсы и гидроэкология Калужской области. – Обнинск, 2002.
25. Флерова Р.А. Гидрологический анализ результатов наблюдений на речных станциях – Л., Гидрометеиздат, 1951
26. Эйпре Т.Э. Анализ способов вычисления ежедневных расходов воды рек.-Л.: Гидрометеиздат, 1981г.