



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

Кафедра Гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(дипломный проект)

На тему **Современные методы учёта стока
в зимний период**

Исполнитель Гозбенко Александр Владимирович

Руководитель доцент, кандидат технических наук

Векшина Татьяна Викторовна

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

канд. геогр. наук, доцент


(подпись)

Исаев Дмитрий Игоревич

«15» июля 2016г.

Санкт-Петербург
2016



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

Кафедра Гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(дипломный проект)

На тему **Современные методы учёта стока
в зимний период**

Исполнитель Гозбенко Александр Владимирович

Руководитель доцент, кандидат технических наук

Векшина Татьяна Викторовна

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

канд. геогр. наук, доцент Исаев Дмитрий Игоревич

« » 20 г.

Санкт–Петербург

2016

Содержание	стр.
Введение	5
Глава 1. Режим рек в зимний период	8
1.1 Типы зимнего режима и замерзания рек	8
1.2 Оценки гидравлических сопротивлений.	10
1.3 Режим ледяного покрова в предледоходный период	14
1.4 Процесс вскрытия рек	19
1.5 Ледовый режим рек ЕТР	25
Глава 2. Методы учета стока в зимний период	29
2.1. Особенности вычисления стока в осенний переходный период	29
2.2. Особенности вычисления стока в весенний переходный период	31
2.3. Методы, применяемые на гидрологической сети	35
2.3.1 Интерполяция между измеренными расходами	36
2.3.2 Построение хронологического графика зимних переходных коэффициентов	37
2.3.3 Вычисление зимних переходных коэффициентов с учётом стеснения живого сечения потока ледяными образованиями	38
2.3.4 Зимние кривые расходов	40
2.3.5 Срезка подпорных уровней за подпорный период	41

2.3.6 Восстановление уровней по кривой связи с бесподпорным постом	41
2.4. Интерполяционно-гидравлические модели.	42
2.4.1. Регрессионно-гидравлическая модель	45
2.4.2. Модель спада зимних расходов и истощение стока	45
2.5. Метод, основанный на применении параметра Великанова	46
Глава 3. Анализ результатов расчетов	48
Заключение	72
Список использованной литературы	73

Введение

Повышение точности учета стока – одно из важнейших условий эффективного использования водных ресурсов. Надежные данные о расходах воды особенно необходимы в переходные периоды, когда происходит резкое изменение водности реки.

Нормативным документом для выполнения учета стока является устаревшее Наставление 1958 года [1], включающее в основном методы, опирающиеся на интуитивные приемы и формальные схемы и не отвечающие современным требованиям и современным возможностям.

Это в полной мере касается и методов учета стока в зимний и переходные периоды, к которым относится метод, использующий хронологический график переходных коэффициентов $K_{\text{зим}}$ и интерполяция измеренных расходов воды, также выполняемая графическим способом. Интерполяция измеренных расходов имеет существенные ограничения, так как дает надежные результаты только при большом числе измерений, выполнение которых в осенне-зимний период часто невозможно.

Более обоснованны физически и точны интерполяционно-гидравлические модели, получившие развитие в исследованиях И.Ф.Карасева [2]. Одним из результатов этих исследований был выход в 1980 году рекомендаций по учету стока на реках в зимний и переходные периоды, разработанных отделом гидрометрии ГГИ и сотрудниками ВВУГкс под руководством И.Ф.Карасева [3].

В частности, для рек с устойчивым ледоставом, рекомендовалась регрессионно-гидравлическая модель (РГМ), использующая в качестве предикторов не только гидравлические характеристики, но и фактор времени, тем самым учитывалась закономерность изменения гидравлических сопротивлений в зимний и переходные периоды.

Предлагаемые физико-математические модели проверялись в частности ВВУГКС [4] и оказались эффективней применяемых способов, но не получили распространения из-за отсутствия в то время на гидрологической сети вычислительной техники.

К настоящему времени большинство станций гидрологической сети оснащено компьютерами и имеет возможность использовать, методы учета стока требующие выполнения большого объема вычислений, что открывает перспективу повышения точности учета стока за счет внедрения современных методик и технологий, основы которых были заложены в конце прошлого века.

Цель данного исследования заключается в дальнейшем обосновании перехода при учете стока в осенне-зимний период на более физически обоснованные и отвечающие современным требованиям, методы.

В качестве объекта исследований выбраны реки Верхнего Поволжья, ледовый режим которых в осенне-зимний период, как правило, не осложненный заторами, является типичным для рек, течение которых ориентированно преимущественно с севера на юг.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выявить особенности учета стока в осенне-зимний период.
2. На основе сравнительного анализа результатов расчета оценить эффективность применения рассматриваемых методов.
3. Выполнить оценку методов с точки зрения их универсальности и пригодности для использования при разработке компьютерной технологии учета стока.

В качестве исходных данных использовались материалы наблюдений на гидрологической сети Росгидромета. Решение поставленных задач проводилось путем регрессионно-статистического анализа гидрометрических данных и численных экспериментов, выполняемых на ПЭВМ.

При вычислении стока в осенне-зимний период в отдельные годы (выбирались годы, достаточно освещенные измерениями расходов воды) расчеты производились следующими методами:

- метод переходных коэффициентов (данные ГЕ),
- регрессионно-гидравлическая модель,
- метод, основанный на интерполяции параметра Великанова.

Для оценки эффективности методов, выполнялись расчеты при наличии данных измерений расходов воды и при сокращенном их количестве.

Метод переходных коэффициентов, являющийся основным из применяемых в настоящее время методов, рассматривался как реперный.

Хотя очевидно, что более физически обоснованные новые методы (РГМ и интерполяция m) в отдельные периоды (например, в период вскрытия) могут давать более точные результаты.

Таким образом при наличии измерений РВ в качестве эталонных принимались ежедневные расходы воды, приведенные в гидрологическом ежегоднике ($Q_{ге}$).

Для расчетов по модели мы использовали уравнение регрессии, предикторами которого являются факторы, определяющие величину $K_{зим}$.

Глава 1. Режим рек в зимний период.

1.1 Типы зимнего режима и замерзания рек.

При классификации зимнего режима рек учитывают различные факторы: продолжительность ледостава и наличие наледей, степень устойчивости ледовых фаз, особенности ледообразовательных процессов и их влияние на режим свободного потока [5,6,7].

Многообразие характеристик зимнего режима наиболее полно учитывает классификация, предложенная Б.П.Пановым [8], но она не получила распространения ввиду слишком большой детализации.

Применительно к особенностям гидрометрического учета стока могут быть выделены четыре типа зимнего режима рек.

Для учета стока большое значение имеют такие особенности зимнего режима рек, как характер процессов замерзания и вскрытия, устойчивость ледостава, возможность образования заторов и зажоров, закономерности изменения водности зимой. В таблице 1.1 представлены основные типы характеристик процессов замерзания рек.

Замерзание рек, как правило, принимает две основные формы: путем постепенного расширения и смыкания заберегов (1 тип) или посредством одновременного образования ледяных перемычек в ряде мест с последующим заполнением пространств между ними плывущим льдом (2 тип).

Кроме этих основных форм, на реках с большими скоростями течения наблюдаются еще две: перемещение кромки льда снизу вверх по течению (3

тип) и образование ледяных перемычек, через которые проходит шуга и всплывший донный лед (4 тип).

Таблица 1.1. Типизация зимнего режима рек.

Типы зимнего режима	Характеристика
1. Длительный устойчивый ледостав а) без оттепелей б) с оттепелями	Сплошной ледостав при отсутствии шуги или наличия в небольших количествах при замерзании. а) изменение расхода носит характер постепенного уменьшения. б) колебания расхода разного знака
2. Неустойчивый ледостав	Отсутствие непрерывного сплошного ледостава, подвижки льда, временные вскрытия, полыньи, ограниченная шугоносность.
3. Подпор от зажора	Длительные периоды подпора от зажора на нижележащем участке
4. Перемерзание и наледи	Промерзание водотока и образование наледного течения воды.

Вскрытие рек может быть в виде [9]:

- Преимущественного теплового разрушения льда;

- Подвижек и разрушения льда под влиянием гидродинамического воздействия потока на ледяной покров;
- Одновременного термического и гидродинамического разрушения льда.

По характеру режима ледообразовательных процессов, уровней и расходов воды зимний сезон на реках подразделяют на следующие периоды [8]: предледоставный, зажорно-заторный, устойчивого-ледяного покрова, предвесеннего повышения уровней и расходов воды, подвижек ледяного покрова (предледоходный) и весеннего ледохода (вскрытия).

При этом все периоды кроме третьего следует отнести к двум переходным: осенне-зимнему (первый и второй) и зимне-весеннему (третий, четвертый и пятый).

Важно отметить, что процессы происходящие в так называемый “зимний сезон”, как правило, тесно взаимосвязаны и нельзя каждый из приведенных выше периодов рассматривать полностью обособлено. Так, например, от того как происходило замерзание реки порой зависит и характер процессов вскрытия реки.

1.2. Оценки гидравлических сопротивлений.

Водный поток подо льдом – это поток, движущийся под действием силы тяжести между двумя тормозящими поверхностями: неподвижной нижней – плоским дном и верхней – движущейся при ледоходе и неподвижной при ледоставе [10].

При этом он может быть а) равномерным в период ледостава, б) неравномерным при зажорах и заторах льда, в) напорным в речных наледях,

г) неустановившимся при прорыве заторов льда и зимой в нижних бьефах гидроузлов.

Одним из главных параметров такого потока является шероховатость нижней поверхности льда. Величину и характер ее изменения в течение зимы определяет тип замерзания реки. Он зависит от водности реки в период замерзания и направления ее течения относительно стран света.

Можно выделить в отдельную группу большие реки, текущие с юга на север. Это, в первую очередь, большие сибирские реки: Обь, Енисей и Лена, а также реки, протекающие по европейской территории страны: Печора, Северная Двина, Мезень и другие.

На большинстве из них наблюдается довольно интенсивный осенний ледоход (шугоход), обычно сопровождаемый образованием заторов и зажоров льда.

Ледяной покров на этих реках образуется в результате смерзания шуги и отдельных льдин различных размеров и ориентации (горизонтальных, вертикальных или промежуточных положений) и подвижек льда. Именно это приводит к большой шероховатости нижней поверхности ледяного покрова (n_l) в начале ледостава [11].

Немногочисленные полевые исследования на ряде рек страны (например, на Енисее и Ангаре), позволили получить графики зависимости $n_l = f(t)$. Эти данные представлены в графической форме на рисунке 1.1.

n_l

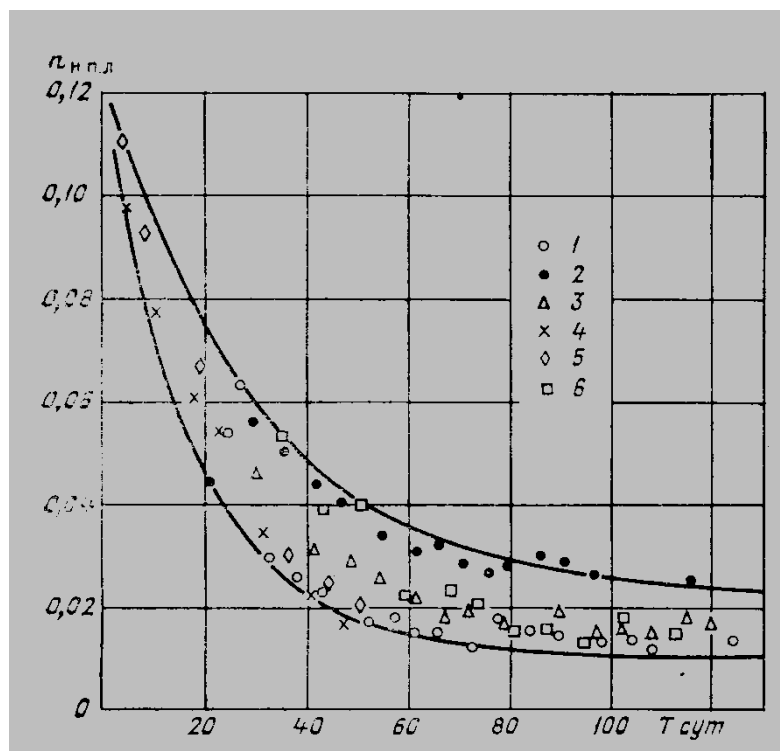


Рис 1.1. Изменение коэффициента шероховатости нижней поверхности льда в зависимости от числа суток, прошедших после установления ледостава на р.Ангара у с.Невон.

Как видно на рисунке 1.1, значения коэффициента шероховатости (n_n) после образования ледяного покрова находятся в пределах от 0,08 до 0,12 и уменьшаются по экспоненциальной зависимости до значений 0,016-0,022 в конце зимы.

Такой характер зависимости $n_n = f(t)$ обусловлен замерзанием реки, сопровождаемым зазорами, нижняя поверхность которых имеет очень большую шероховатость.

Затем под влиянием нарастания льда на его нижней поверхности и размыва текущей водой высота выступов шероховатости уменьшается, они как бы обтаивают, острые выступы сглаживаются, что приводит к постепенному уменьшению значений коэффициентов шероховатости.

Этот процесс практически продолжается весь зимний период и только весной перед вскрытием реки отмечается небольшое увеличение значений n_l , обусловленное изменением структуры льда.

График на рисунке 1.1 является типичным для рек с устойчивым ледоставом в зимний период, текущих на север.

Несколько отличный процесс замерзания наблюдается на малых и средних реках, текущих с севера на юг. Замерзание их начинается с появления заберегов сначала у берегов, где скорости течения воды наименьшие.

В дальнейшем нижняя поверхность льда сглаживается и принимает волнистые очертания, подобные грядовому профилю песчаного дна. Коэффициент шероховатости постепенно снижается до конечных значений (от 0,008 до 0,012) при достаточно длительном ледоставе в течении T_l суток. Влияние фактора времени на сопротивление русла, закрытого льдом, отражает отношение $n_0/n_{зим}$.

В начале ледообразования и после вскрытия реки $n_0/n_{зим}=1$. В течение периода закрытого русла T_l соотношение коэффициентов шероховатости изменяется неоднозначно: сначала резко снижается до минимальных значений 0,4-0,6, а затем по экспоненте приближается к предельному значению $n_0/n_{зим}=1$.

Таким образом, изменение $n_0/n_{зим}$ во времени аналитически можно описать следующим выражением:

$$\frac{n_0}{n_{зим}} = 1 - m_2 \frac{T}{T_l} e^{-5 \frac{T}{T_l}} \quad (1.1)$$

где T – время в сутках от начала ледообразования; T_l – продолжительность зимнего периода; m_2 – коэффициент пропорциональности.

1.3. Режим ледяного покрова в предледоходный период

Изменения в состоянии ледяного покрова в предледоходный период могут существенно влиять на характер вскрытия реки. В то же время режим ледяного покрова в конце зимы остается мало освещенным исследованиями и поэтому здесь приводятся только некоторые сведения о режиме ледяного покрова в этот период.

На реках, протекающих с юга на север, например на Сев.Двине, Енисее и др., к моменту вскрытия ледяной покров почти полностью сохраняет свою мощность, что объясняется преобладанием в его разрушении механического фактора над тепловым.

Иначе говоря, вскрытие на таких реках совершается ранее, чем успевает проявиться в сколько-нибудь заметной мере фактор стаивания. Описываемое явление отмечено в работах Л.К.Давыдова [12], А.П.Бурдыкиной [13] и получило до некоторой степени количественное определение.

На крупных реках протекающих в широтном направлении или с севера на юг, стаивание льда до вскрытия развивается весьма продолжительное время. Так для р.Оби продолжительность периода стаивания может достигать месяц и более, а величина стаивания может изменяться в значительных пределах от 13 до 40% относительно максимальной толщины льда за зиму.

Перед началом весеннего уменьшения толщины ледяного покрова во многих случаях происходит некоторое ее увеличение, что может произойти от образующегося наслуда.

Уменьшение толщины ледяного покрова начинается еще до того, как стаивает на нем снег, но вскрытие крупных рек, как правило совершается при очистившейся от снега ледяной поверхности.

У средних по размеру рек также просматриваются вышеуказанные закономерности режима ледяного покрова. Так, например, у рек протекающих с севера на юг Унжа и Ветлуга величина слоя стаивания ледяного покрова довольно значительная – порядка 10-20 см (при максимальной толщине 50-70 см). Значительно меньшее стаивание наблюдается у рек противоположного направления, например, на реке Суре, где оно в большинстве случаев составляет 1-2 см.

На малых реках указанные закономерности могут не прослеживаться, так, например, малые реки бассейна Дона: Мамыра, Московская Ряса, Сосна, Умань, протекающие в различных направлениях, вскрываются при толщине ледяного покрова, почти не уменьшенной весенним таянием.

Строительство плотин, как правило, может существенно изменять режим ледяного покрова, увеличивая толщину льда и уменьшая стаивание в верхних бьефах и вызывая обратный эффект в нижних бьефах. Так ледяной

покров стал меньше стаивать в верхнем бьефе на р.Битюг у с.Бродово, например, в 1949 г. наибольшая толщина льда была порядка 72 см, а при вскрытии 70 см.

Как показал В.В.Пиотрович [14] для рек протекающих с севера на юг стаивание происходит не только с верхней, но и с нижней кромки льда. Вопрос о том какая доля стаивает снизу, а какая снизу остается открытым. Так М.А.Великанов [15] оценил стаивание снизу в 30% от суммарной величины. В то же время по данным В.В.Пиотровича [16] для р.Оки у с.Новинки стаивание снизу в период предшествующий очищению ледяного покрова от снега, представляет доминирующее явление.

Величина стаивания ледяного покрова с нижней поверхности зависит от интенсивности прихода тепла в реку, главным образом от грунтовых вод, от перехода механической энергии русловых вод в тепловую, от тепла грунта дна, а после схода снега с ледяного покрова и от проникающей сквозь него длинноволновой части солнечного спектра. Теплоприход последнего рода действует кратковременно, а первые два совершаются в течение всего сезона и на реках с большими уклонами и мощным грунтовым питанием проявляются весьма интенсивно.

Такие реки даже в условиях суровой зимы обладают ледяным покровом, значительно уменьшающимся в своей мощности уже начиная с февраля.

В качестве иллюстрации можно привести следующие данные по р.Зее у урочища Зейские Ворота, на которой в этом участке в зиму 1947/48 г.г., начиная с 5 февраля, к 31 марта толщина льда уменьшилась с 122 до 32 см, причем наибольшая интенсивность стаивания (17 см за пентаду) зарегистрирована в середине марта.

Произведенное рассмотрение сведений о величине стаивания ледяного покрова в весенний период приводит к ряду выводов:

- На реках, вскрывающихся под влиянием главным образом механического фактора, уменьшение мощности ледяного покрова если и происходит, то в незначительных размерах.
- На реках, вскрывающихся одновременно, стаивание ледяного покрова происходит на величину в 10-20% от максимальной мощности за зиму.
- На реках, вскрывающихся преимущественно под влиянием теплового фактора, стаивание льда в весенний период особенно велико – около 50% от максимальной его мощности за зиму.
- В верхних бьефах плотин образовавшийся за зиму мощный ледяной покров мало стаивает, так как вскрытие в них происходит под влиянием механических воздействий. В нижних бьефах плотин за зиму создается пониженной мощности ледяной покров и стаивание его к весне происходит в значительных размерах.

величины. В то же время по данным В.В.Пиотровича [16] для р.Оки у с.Новинки стаивание снизу в период предшествующий очищению ледяного покрова от снега, представляет доминирующее явление.

Величина стаивания ледяного покрова с нижней поверхности зависит от интенсивности прихода тепла в реку, главным образом от грунтовых вод, от перехода механической энергии русловых вод в тепловую, от тепла грунта дна, а после схода снега с ледяного покрова и от проникающей сквозь него длинноволновой части солнечного спектра. Теплоприход последнего рода действует кратковременно, а первые два совершаются в течение всего

сезона и на реках с большими уклонами и мощным грунтовым питанием проявляются весьма интенсивно.

Такие реки даже в условиях суровой зимы обладают ледяным покровом, значительно уменьшающимся в своей мощности уже начиная с февраля.

В качестве иллюстрации можно привести следующие данные по р.Зее у урочища Зейские Ворота, на которой в этом участке в зиму 1947/48 г.г., начиная с 5 февраля, к 31 марта толщина льда уменьшилась с 122 до 32 см, причем наибольшая интенсивность стаивания (17 см за пентаду) зарегистрирована в середине марта.

Произведенное рассмотрение сведений о величине стаивания ледяного покрова в весенний период приводит к ряду выводов:

- На реках, вскрывающихся под влиянием главным образом механического фактора, уменьшение мощности ледяного покрова если и происходит, то в незначительных размерах.
- На реках, вскрывающихся одновременно, стаивание ледяного покрова происходит на величину в 10-20% от максимальной мощности за зиму.
- На реках, вскрывающихся преимущественно под влиянием теплового фактора, стаивание льда в весенний период особенно велико – около 50% от максимальной его мощности за зиму.
- В верхних бьефах плотин образовавшийся за зиму мощный ледяной покров мало стаивает, так как вскрытие в них происходит под влиянием механических воздействий. В нижних бьефах плотин за зиму создается пониженной мощности ледяной покров и стаивание его к весне происходит в значительных размерах.

1.4. Процесс вскрытия рек.

Вскрытие рек является процессом длительным, начинающимся за много времени до видимого разрушения ледяного покрова. Стаивание ледяного покрова снизу, впервые охарактеризованное Ф.И.Быдиным [14], а затем подробно изучавшееся В.В.Пиотровичем [16], начинается еще в середине зимы и первое время слабо проявляется. Стаивание сверху и между кристаллами развивается в конце схода со льда снежного покрова и приводит к резкому снижению прочности всего ледяного покрова.

Для последующего периода – периода подвижек и весеннего ледохода – характерен целый комплекс явлений, в состав которых, с одной стороны, входят получившие начало в предшествующий, подготовительный период, с другой, вновь развивающиеся:

1. таяние ледяного покрова снизу,
2. таяние ледяного покрова сверху,
3. таяние ледяного покрова по плоскостям спайности между кристаллами,
4. деформации ледяного покрова от изменения уровней воды,
5. деформации от действия влекущей силы воды и ее скоростного напора

Из всех перечисленных видов процессов ни один не является строго обязательным. Например, на северных крупных реках, протекающих с юга на север, таяние ледяного покрова не успевает сколько-нибудь развиваться и вскрытие совершается под механическим воздействием талых вод, подходящих сверху.

Сам момент вскрытия, т.е. потеря ледяным покровом монотонности и приобретения подвижности, в большинстве случаев происходит в условиях достижения льдом температуры 0°C , если только оно не совершается под действием, главным образом, механического фактора.

Характер вскрытия различен у малых и больших, горных, полугорных и равнинных рек. На малых реках с усиленным грунтовым питанием сплошного ледяного покрова в обычные по суровости зимы не образуется, поэтому и вскрытия в обычном смысле этого слова не происходит. Забереги и местные ледоставы на них быстро взламываются и исчезают, создавая лишь редкий ледоход.

Малые реки с обедненным грунтовым питанием, как правило пересыхают на зиму и лед остается лежать на сухом дне, или же перемерзают в наиболее мелких местах. Значительные массы талых вод на таких реках проходят по ледяному покрову, который взламывается и всплывает, начиная с перекатных участков.

На порожистых реках первыми вскрываются сами пороги, что ведет за собой подвижку, торошение льда в прилегающих плесах. Дальнейшее повышение уровней и одновременное ослабление прочности льда приводят к ледоходу.

На больших горных реках вскрытие совершается по участкам, в общем случае, продвигаясь снизу вверх. Непромерзающие быстротоки в их верховьях становятся местными очагами раннего беспаводочного освобождения от ледяного покрова. В глубоких горных долинах от завалов снега надолго остаются снежные мосты, аркой нависающие над потоком.

На крупных реках, протекающих с севера на юг, фронт таяния движется навстречу течению и поэтому процесс вскрытия происходит спокойно, хотя в большинстве случаев и не бывает постепенного его продвижения; обычно такие реки вскрываются по участкам, охваченным одновременным таянием.

Так, например, на Нижней Волге вначале вскрывается дельтовая часть, затем участок Астраханского плеса и т.д.

На крупных реках, протекающих с юга на север, вскрытие продвигается вниз по течению, опережая подход талых вод с верховьев, если истоки заложены в горной местности.

Механическое воздействие на ледяной покров происходит за счет стока с ближайших верхних участков реки и иногда прилегающей части бассейна. Обычно местные притоки вскрываются несколько позднее и увеличивают в какой-то степени водность реки уже после вскрытия, как это, например, типично для р.Енисея.

Однако притоки р.Колымы, также протекающей с юга на север, вскрываются раньше, чем главная река. А.Г.Левиным [17] эта особенность объясняется наличием у притоков р.Колымы больших уклонов, следовательно, меньшей мощностью ледяного покрова, в некоторых случаях нарушенного существованием четкообразно расположенных полыней.

В период вскрытия на реках наблюдается большое количество весьма разнообразных по характеру явлений. К наиболее часто встречающимся явлениям относятся: «вода на льду», полыньи, закраины, отрыв от берегов и всплывание ледяного покрова, подвижки, заторы, густой ледоход, навалы на берега, перемежающийся ледоход, редкий ледоход.

Появление воды на ледяном покрове происходит по различным причинам. В зимний сезон в районах с мягким климатом вода скапливается от таяния снега и выпадающих дождей во время прохождения глубоких оттепелей.

В районах с суровым климатом это явление есть следствие ухудшения русловых условий протекания водных масс, особенно оно развито на промерзающих до дна реках, где становится причиной образования наледей.

На горных реках с развитым шугоходом «вода на льду» связана с образованием местных ледоставов и зажоров.

Подвижками ледяного покрова называются временные его перемещения вниз по течению, обычно на небольших участках реки. Следует различать подвижки, не переходящие в последующий ледоход, от таких, за которыми он следует как дальнейшее развитие процесса, а также подвижки льда, происходящие в зимний сезон от глубоких оттепелей.

Подвижки первого вида весьма часты на юго-западных реках и характеризуются тем, что развиваются в районах, охваченных оттепелями, и не имеют последовательного продвижения вдоль по рекам.

Подвижки весеннего периода – местные наблюдаются на реках со ступенчатым продольным профилем, в частности на р.р.Зап.Двине, Свири, порожистых реках Карелии, на Урале. Кроме того, такого же распространения подвижки могут быть в участках выходов грунтовых вод, ослабляющих своими запасами тепла ледяной покров.

Подвижки плесовые свойственны рекам, вскрытие которых совершается по отдельным участкам, и обычны для крупных рек, протекающих на юг или в широтном направлении, часто они наблюдаются в средних и верхних участках плесов, охваченных одновременным вскрытием, например на реках Волге, Дону, Днепре, среднем течении Оби.

Подвижки кромки ледяного покрова представляют собой явление более или менее равномерно передвигающееся вниз по реке по мере продвижения по ней вскрытия. Они свойственны рекам, текущим с юга на север, на которых механический фактор в уничтожении ледяного покрова является доминирующим, например, на р.р.Сев.Двине, Печоре, нижнем течении Оби, Енисея, Лены и т.д.

На средних по величине реках, протекающих в пределах одного и того же климатического района, т.е. вскрывающихся одновременно, подвижки являются типичной стадией этого процесса, предваряющего само вскрытие, например, на р.р.Ловать, Полисть, Луга.

Заторами льда называют временные, задерживающиеся на каком-либо участке реки в период ледохода скопления ледового материала, вызывающие подъемы уровней.

Весенние заторы формируются в условиях положительных температур воздуха и притока вод с повышающейся температурой, поэтому и слагающие их льдины не только не смерзаются, но и интенсивно теряют свою прочность.

Кроме того, формирование весенних заторов происходит при повышении водности рек, вследствие чего увеличивается пропускная способность русел и в то же время усиливается скоростной напор, действующий разрушительным образом.

Весенние заторы льда создаются в период ледохода и чем ледоход интенсивнее, тем более вероятно образование заторов. Высота подъема уровня воды при заторах зависит от уровня, при котором происходит ледоход.

Однако, чем выше уровень ледохода, тем больше ширина реки и тем менее вероятен затор. Но на реках с высокими крутыми берегами последний фактор не так уж существенен, в связи с чем на них формируются особо мощные, с большими подъемами уровней заторы.

Так как основным условием формирования заторов является наличие достаточного количества ледового материала, то они образуются на реках с интенсивными ледоходами, при сохранении льдом значительной прочности, что свойственно рекам, текущим с юга на север.

На реках, текущих с севера на юг, вскрытие которых более или менее постепенно распространяется от низовий вверх к истокам, значительных заторов не наблюдается.

В период вскрытия рек ледоход представляет наиболее обычное явление. Ледохода не бывает на очень малых водотоках типа ручьев, на промерзающих до дна небольших речках, на которых талые воды проходят поверх ледяного покрова, а также на реках, вскрывающихся под воздействием почти исключительно теплового фактора.

Ледоход представляет форму сброса ледового материала, сохранившегося от тепловых воздействий, и на транзитных участках густота ледохода и его продолжительность определяется количеством подающегося сверху к входному створу материала, интенсивностью таяния на протяжении участка, скоростью движения льда.

Так как характер поступления ледового материала определяется особенностями вскрытия реки и степенью совпадения по времени со вскрытиями притоков, то по этим последним признакам можно выделить типы рек, отличающихся своеобразными чертами режима ледохода:

1. малые и средние реки, вскрывающиеся одновременно, а также участки больших рек с одновременным наступлением ледоходного состояния;
2. крупные реки, протекающие с севера на юг, вскрытие которых распространяется от низовий к верховьям, сюда же относятся и горные реки;
3. крупные реки, протекающие с юга на север, вскрытие которых распространяется от верховий к низовьям.

Для рек первого типа (например, истоки рек Днепра и Дона) характерны ледоходы большой интенсивности, но малой

продолжительности, причем на притоках малого размера со значительным грунтовым питанием и интенсивность их не велика.

Для участков крупных рек, вскрывающихся одновременно, если они в своем течении ориентированы по широте, в местах большой прочности льда с северных берегов, вследствие несколько запаздывающего поступления льда из притоков, создается ледоход большой продолжительности.

На реках второго типа (реки Урал, Дон, Днепр) наблюдаются ледоходы большой продолжительности, но малой интенсивности.

Реки третьего типа (реки Сев.Двина, Лена, Енисей) характеризуются кратковременными большой интенсивности ледоходами, при этом часто наблюдается перемежающейся густоты ледоход, что вызывается стоком льда из притоков, обычно вскрывающихся позже главной реки.

1.5 Ледовый режим рек ЕТР

Ледовые явления на реках начинаются через 3-5 дней после перехода температуры воздуха через 0°C , в отдельные годы в зависимости от интенсивности понижения температуры воздуха длительность этого периода изменяется от 0 до 15 дней.

Первые ледяные образования – сало и забереги – появляются обычно в первой декаде ноября почти одновременно на всех реках бассейна независимо от величины реки и направления течения. Разница в датах появления сала и заберегов на разных реках составляет большей частью 4-10 дней.

Нередко первые ледовые образования разрушаются в результате повышения температуры воздуха, и появление их наблюдается повторно.

Размеры заберегов зависят от водности реки, скорости течения и погодных условий. При сильных морозах на небольших реках со спокойным течением забереги, увеличиваясь в размерах, соединяются и образуют

сплошной ледостав. Таким путём замерзают малые реки и верховья средних и крупных рек.

Осенний ледоход наблюдается не ежегодно и не на всех реках района, а преимущественно на средних и крупных (Волга, Ока, Клязьма, Сура, Унжа, Ветлуга, Мольга и др.). Средняя продолжительность осеннего ледохода на участках с естественным ледовым режимом 4-12 дней. На участках рек, ледовый режим которых искажён попусками вышележащих водохранилищ (Тверца, Алатырь и др.) средняя продолжительность ледохода около 20 дней.

Установление ледостава на реках разного размера происходит не одновременно. Крупные реки, такие как Ока и Волга вне зоны подпора замерзают позднее чем впадающие в них притоки. Средняя продолжительность периода ледообразования 8-15 дней, а на участках с нарушенным естественным режимом или усиленным грунтовым питанием 20-40 дней.

В сроках установления ледостава прослеживается широтная зональность. Крупные реки, обладающие большим запасом тепла, замерзают на 8-12 дней позднее. Крайние ранние и поздние даты установления ледостава отклоняются от средних до 10-20 дней.

При возвратах тепла в отдельные годы может наблюдаться временный ледостав или временное вскрытие реки после установления ледостава.

Для большинства рек района характерно наличие устойчивого ледостава, средняя продолжительность которого 120-170 дней. На участках с повышенным грунтовым питанием, а также на реках в бассейнах Верхней Оки, Цны, Мокши и Верхней Суры в период ледостава отмечаются полыньи и временные вскрытия, а в отдельные тёплые зимы наблюдается неустойчивый ледостав. Небольшая интенсивность роста толщины льда наблюдается в начале ледостава, когда снег на льду отсутствует или имеет небольшую высоту. Средняя интенсивность прироста льда в этот период 0,8-1 см/сутки, а максимальная 4 см/сутки. В последующие месяцы

интенсивность прироста льда постепенно уменьшается; в январе – 0,4 см/сутки, феврале – 0,3 см/сутки, марте 0,2-0,1 см/сутки.

В середине марта рост толщины льда обычно прекращается и только в отдельные годы в марте наблюдается увеличение толщины льда за счёт образования наслуда – замерзания талой воды поверх льда.

Наибольшая толщина льда на реках наблюдается в марте: в суровые зимы – 70-90 см и 30-40 см - в тёплые.

Один из основных факторов, определяющих толщину льда на реках, является температура воздуха.

Разрушение ледового покрова (стаивание льда) начинается с момента наступления положительных средних суточных температур воздуха. Ко времени вскрытия толщина льда на реках уменьшается на 20-30%

За 10-20 дней до вскрытия появляются промоины и закраины. Вскрытие рек по району происходит более дружно, чем замерзание. Начинается вскрытие на реках Верхней Оки в первых числах апреля и заканчивается в конце месяца в верховьях левобережных притоков реки Волги.

Средняя продолжительность периода от даты перехода температуры воздуха через 0°C до даты вскрытия изменяются от 2-8 дней на реках бассейнов Верхней Оки и Суры до 10-18 дней на реках бассейнов Мологи, Костромы, Унжи и Ветлуги.

Разрушение и таяние льда обусловлено действием теплового и механического факторов.

Под действием солнечной радиации и теплообмена с атмосферой, а также тепла, приносимого талыми водами и атмосферными осадками, происходит таяние льда.

Механический фактор – подъём уровня воды, или взламывающая сила потока – нарушает целостность ледяного покрова и ускоряет процесс таяния льда.

Весенний ледоход наблюдается ежегодно на всех реках бассейна с площадью водосбора больше 300 км².

Весенние заторы льда и осенние зажоры не характерны для рек района.

Осенние зажоры наблюдаются обычно в начале зимы. По данным наблюдения на постах шуга в среднем 1 раз в 2 года отмечена на 27 реках в 52 пунктах.

Наиболее шугоносные – Тверца, Молога, Песь, Суда, Унжа, Нея и др. На реках, где наблюдается шуга, периодически образуются зажоры. Подъёмы уровня воды, вызванные зажорами, изменяются в больших пределах от 2-3 дней до 1,5-2 месяцев. Наиболее мощные зажоры были отмечены на реках Молга(1957), Тверца(1953), Ока(1947).

Таблица 1.2. Характеристики периода вскрытия рек ЕТР(Верхнего Поволжья)

N	Река – пост	А,км2	Тип зимн. реж.	даты				продолжительность	
				Нач осен	нач. ледх.	Нач лдст.	Нач ледох.	Осен ледох	лдст.
1	р.Гжать – г. Гагарин	406	1	10.11	Нб	11.12	01.04	-	111
2	р.Дубна – с. Нушполы	1300	1	09.11	нб	22.11	11.04	-	140
3	р.Унжа –	18500	1	01.11	02.11	14.11	20.04	11(6)	157
4	р.Угра –	15300	1	13.11	нб	28.11	04.04	-	126
5	р.Ока – г.Дзержинск	245000	1	11.11	13.11	05.12	10.04	20(14)	126
6	р.Сура – г.Ядрин	66000	1	06.11	нб	19.11	11.04	9(5)	144

Глава 2. Методы учета стока в зимний период.

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.

2.1. Особенности вычисления стока в осенний переходный период.

В зимний и переходный периоды учёт стока осложняется изменчивостью и многообразием факторов, определяющих пропускную способность русла. Появление льда и ледяных образований на реках всегда сопровождается уменьшением пропускной способности русла.

Большое значение имеют такие особенности зимнего режима рек, как характер процессов замерзания и вскрытия, устойчивость ледостава,

возможность образования заторов и зажоров, закономерности изменения водности зимой.

Учет хода уровня в условиях переходных периодов и периодов временных вскрытий осложняется следующими обстоятельствами:

- Сложным влиянием ледяных образований на участке станции, отличающихся в рассматриваемые периоды большим разнообразием в качественном отношении и различным количественным развитием.
- Невозможностью в общем случае учесть степень стеснения сечения потока льдом посредством коэффициента стеснения α , поскольку сплошной ледостав наблюдается в рассматриваемые периоды редко, а если и наблюдается, то обычно сопровождается шугообразованием.
- Влиянием ледяных образований, главным образом зажоров и заторов, на нижележащем участке реки. Переменный подпор от зажоров и заторов является фактором, наиболее осложняющим учет уровня при вычислении стока. В некоторых случаях подпор от зажора или затора может настолько резко нарушить связь между расходом и уровнем, что учет хода уровня в подпорный период становится нецелесообразным. Поэтому в переходные периоды применение изложенных выше простых приемов учета хода уровня недостаточно.

Кроме хода уровня, должен учитываться ряд других элементов гидрологической обстановки, а кроме того, могут привлекаться косвенные соображения для уточнения вычислений в интервалах между измерениями расходов.

Рассмотрим основные варианты учёта стока.

Прежде всего проверяется возможность построения зимних кривых расхода. Для зимнего периода может быть получено несколько самостоятельных кривых, соответствующих:

- 1) переходному периоду осеннего замерзания,
- 2) периоду сплошного ледостава,
- 3) весеннему предледоходному периоду,
- 4) переходному периоду весеннего вскрытия.

При невозможности построения зимних кривых расхода наиболее простым решением задачи вычисления стока является интерполяция расходов воды в интервале между их измерениями.

Для построения зимних кривых расходов, а тем более для интерполяции измеренных расходов воды надо располагать достаточно большим количеством этих измерений, но их выполнение в холодное время года – нелёгкий труд.

Поэтому в практике учёта зимнего стока всегда стремимся опираться не только на измерения расходов, но и на некоторые дополнительные физические предпосылки.

К числу таких предпосылок относится предложенная С. Колупайло относительная характеристика пропускной способности русла – переходный коэффициент $K_{зим}$.

Описание упомянутых выше методов учета стока дается в следующем разделе.

2.2. Особенности вычисления стока в весенний переходный период.

В весенний период после зимы с устойчивым ледоставом, как правило, имеет место увеличение расхода, отражающееся на ходе уровня. В то же время подпорные подъемы в рассматриваемый период представляют сравнительно редкое явление (это может произойти только в условиях вскрытия реки на нижележащем участке и затем образования там затора).

Поэтому в общем случае в весенний период учет уровня необходим, и, следовательно, если вычисления в основной ледоставный период велось по интерполяции между измеренными расходами, то здесь необходимо переходить на вычисления с помощью хронологического графика $K_{\text{зим}}$. Впрочем, при весьма частых измерениях расходов интерполяция может быть продолжена и до момента вскрытия.

Другой иногда наблюдающейся особенностью периода весеннего подъема уровня и предледоходного периода является заметное снижение шероховатости нижней поверхности ледяного покрова. В указанных условиях для этих периодов может образоваться самостоятельная кривая неустойчивой связи, ответвляющаяся от кривой основного ледоставного периода, если такая была построена.

В переходные периоды, а также при временных вскрытиях изменения расхода во времени, как правило, носят достаточно резкий характер и колебания расхода могут иметь разный знак.

В то же время проведение частых измерений расходов, позволяющее применить интерполяцию между измеренными расходами, нередко бывает невозможным по объективным причинам (густой ледоход, непрочный ледяной покров).

Поэтому учет хода уровня при вычислении стока в рассматриваемые периоды в большинстве случаев является необходимым.

Однако учет хода уровня в условиях переходных периодов и периодов временных вскрытий осложняется следующими обстоятельствами:

- Сложным влиянием ледяных образований на участке станции, отличающихся в рассматриваемые периоды большим разнообразием в качественном отношении и различным количественным развитием.

- Невозможностью в общем случае учесть степень стеснения сечения потока льдом посредством коэффициента стеснения α , поскольку сплошной ледостав наблюдается в рассматриваемые периоды редко, а если и наблюдается, то обычно сопровождается шугообразованием.
- Влиянием ледяных образований, главным образом зажоров и заторов, на нижележащем участке реки. Переменный подпор от зажоров и заторов является фактором, наиболее осложняющим учет уровня при вычислении стока. В некоторых случаях подпор от зазора или затора может настолько резко нарушить связь между расходом и уровнем, что учет хода уровня в подпорный период становится нецелесообразным. Поэтому в переходные периоды применение изложенных выше простых приемов учета хода уровня недостаточно.

Кроме хода уровня, должен учитываться ряд других элементов гидрологической обстановки, а кроме того, могут привлекаться косвенные соображения для уточнения вычислений в интервалах между измерениями расходов.

Основным способом вычисления стока в зимне-весенний переходный период является построение хронологического графика зимних переходных коэффициентов с учетом гидрологической обстановки и в сочетании со срезками уровней.

В отдельных случаях при весьма частых измерениях расходов, когда переломные точки гидрографа освещены измерениями (или имеются измерения, близкие к указанным точкам по времени), может применяться интерполяция между измеренными расходами воды для всего рассматриваемого переходного периода или наиболее освещенной его части. Также в отдельных случаях в период весеннего вскрытия при монотонном ходе изменения расхода воды (непрерывное нарастание,

например) для вычисления стока может быть построена кривая неустойчивой связи расхода и уровня.

Это особенно удобно в тех случаях, когда вычисление стока за период сплошного ледостава производилось по зимней кривой расходов, а также когда для свободного состояния русла характерна петлеобразная кривая.

В последнем случае для применения хронологического графика $K_{\text{зим}}$ требуется экстраполяция вниз ветви подъема паводочной петли, т.е. по существу лишняя операция, отпадающая при вычислении стока по кривой.

Применение кривой для вычисления стока в весенний переходный период удобно еще тогда, когда пик весеннего половодья проходит при ледовых явлениях.

Подпор от затора осложняет применение кривых, но если такой подпор носит кратковременный и ясно выраженный характер, то кривые все же могут применяться в сочетании со срезкой подпорных уровней.

Кривые расходов периода весеннего вскрытия являются кривыми неустойчивой связи, выражающими связь между расходом и уровнем, изменяющуюся во времени, вследствие постепенного убывания влияния ледообразований.

Описание упомянутых выше методов учета стока дается в следующем разделе.

2.3. Методы, применяемые на гидрологической сети.

В настоящее время согласно Наставлению [1] в зимний и переходные периоды применяются способы учета стока перечисленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Способы учёта стока для различного типа зимнего режима*.

Тип 1		Тип 2	Тип 3	Тип 4
А	Б			
1. Интерполяция между измеренными расходами	$K_{зим}=f(t)$	$K_{зим}=f(t)$ в сочетании со срезкой уровней	Интерполяция между измеренными расходами	Интерполяция между измеренными расходами
2. Интерполяция между измеренными расходами с использованием $K_{зим}$	Зимние кривые расходов	$K_{зим}=f(a)$	Срезка уровней	Зимние кривые расходов
3. Зимние кривые расходов	$K_{зим}=f(a)$	Интерполяция между измеренными расходами	Восстановление уровней по графику связи с бесподпорным постом	

* 1 тип - непрерывный ледостав (А- без оттепелей, Б- с оттепелями);

2 тип - неустойчивый ледостав; 3 тип - подпор от зажора; 4 тип – перемерзание и надледы.

2.3.1 Интерполяция между измеренными расходами

Применяют графическую криволинейную интерполяцию, т.е. непосредственное построение гидрографа по точкам (Q, t) измеренных расходов. При проведении линии гидрографа необходимо стремиться к осреднению случайных отклонений значений измеренных расходов, однако это возможно только при весьма частом измерении расходов (5-6 измерений в месяц).

Кроме того, при осреднении необходимо учитывать характер питания водотока в рассматриваемый период. При отсутствии притока поверхностных вод, т.е. при выраженном спаде осреднение является обязательным, а при колебаниях расходов разного знака осреднение не рекомендуется.

Важно отметить, что применение интерполяции между измеренными расходами прежде всего целесообразно во всех тех случаях, когда с одной стороны, учёт хода уровня не может дать уточнения вычислений, а именно при наличии переменного подпора от ледяных образований на нижележащем участке (тип 3), при движении потока поверх льда в результате перемерзания (тип 4), а с другой стороны, когда изменение расхода имеет характер монотонного однонаправленного изменения, т.е. для зимы с устойчивым ледоставом и без оттепелей (тип 1, вариант А), при постепенном уменьшении расходов (случай отсутствия поверхностного питания) и, что, для нас важно на подъеме половодья (даже если при этом имели место колебания разного знака).

Но в любом случае данный способ требует значительного числа измерений.

2.3.2 Построение хронологического графика зимних переходных коэффициентов

Переходный коэффициент $K_{\text{зим}}$ выражает степень нарушения связи между расходом и уровнем, свойственной свободному руслу, в результате суммарного влияния ледяных образований:

$$K_{\text{зим}} = Q_{\text{зим}} / Q_0, \quad (2.1)$$

где $Q_{\text{зим}}$ - расход воды при наличии ледяных образований; Q_0 - расход, снятый при том же уровне с кривой расходов свободного русла.

При применении этого способа предварительно вычисляются и наносятся на график $(K_{\text{зим}}, t)$ значения зимних переходных коэффициентов измеренных расходов. Затем по полученным точкам строится хронологический график зимних коэффициентов $K_{\text{зим}} = f(t)$.

Для построения хронологического графика используются схемы построения, разработанные Огиевским [20], предпринявшим попытку гидрометеорологического обоснования учета зимнего стока. Эти схемы построены на общих закономерностях в зависимости от температуры воздуха и гидрологических факторов.

Для периода сплошного ледостава линия графика проводится как плавная кривая, проходящая непосредственно по точкам значений $K_{\text{зим}}$; при очень частых измерениях линию графика проводят осреднённо.

Расчет стока с помощью хронологического графика зимних переходных коэффициентов целесообразен в тех случаях, когда учёт хода уровня может дать уточнение результатов

вычислений, следовательно, когда колебания уровня отражают изменения расхода, и в то же время колебания расхода имеют разный знак или же происходят не плавно.

Наиболее сложным случаем является использование переходных коэффициентов в переходные периоды. Так при построении Кзим в осенне-зимний период следует учитывать:

- а) ход температуры воздуха и осадков (по комплексному графику);
- б) сведения о характере и количественном развитии ледяных образований (балл ледохода, ширина и толщина заберегов, особенно данные о шуге и т.д.);
- в) сведения о ледовой обстановке на нижележащем участке реки, особенно сведения о заторах;
- г) ход уровня на других постах, расположенных на данной реке (по совмещенному графику);
- д) материалы вычислений стока, сведения о ледовых явлениях и комплексные графики прошлых лет

При отсутствии видимой связи между расходом и уровнем, что имеет место при зажорно-заторном режиме, использование зимних переходных коэффициентов недопустимо, так как может повлечь грубые ошибки.

Таким образом, как и в случае интерполяции расходов метод переходных коэффициентов строится на графических построениях (более сложных) и не имеет аналитического обоснования.

2.3.3 Вычисление зимних переходных коэффициентов с учётом стеснения живого сечения потока ледяными образованиями (методика Л.И. Ковалёва).

Л.И.Ковалев разработал [21] достаточно общие и простые схемы расчета зимних расходов воды. В их основу была положена зависимость $K_{зим}=f(\alpha)$, где степень стеснения живого сечения потока ледяными образованиями учитывается коэффициентом α , равным отношению площади живого сечения ω потока под ледяным покровом к полной площади поперечного сечения, ограниченной сверху линией уровня воды в лунке $\omega_{полн}$:

$$\alpha = \omega / \omega_{полн} = (\omega_{полн} - \omega_{пл}) / \omega_{полн} . \quad (2.2)$$

Величина $\omega_{полн}$ представляет площадь живого сечения потока для данного уровня при свободном состоянии русла, а $\omega_{пл}$ – площадь погруженного льда.

Кзим

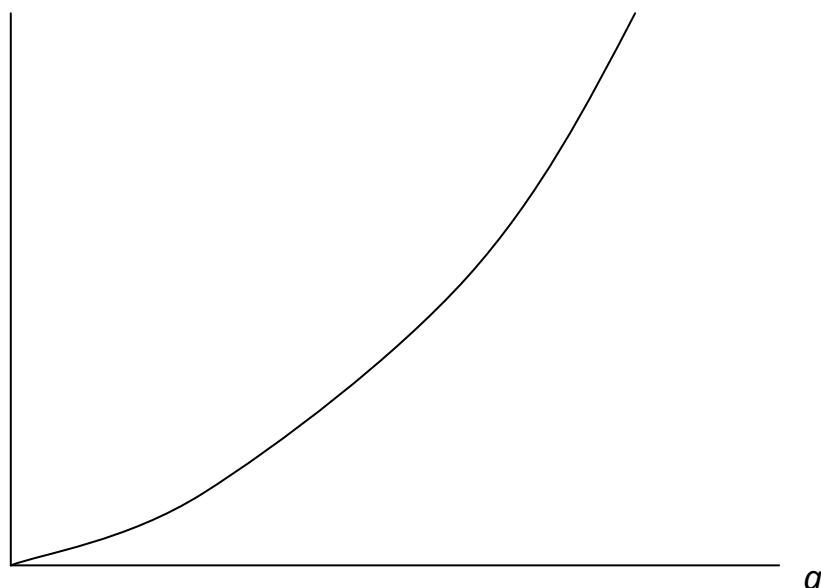


Рис. 2.1. Вид кривой $K_{\text{зим}} = f(a)$

Критерием применимости способа является величина отклонения вычисленных по измеренным расходам точек ($K_{\text{зим}}, a$) для основного ледоставного периода от кривой, при отклонениях по ординате свыше $\pm 15-20\%$ способ не может быть использован.

Опыт показал, что связь $K_{\text{зим}} = f(a)$ действительна для малых и средних по водности рек и не обладает необходимой общностью.

2.3.4 Зимние кривые расходов.

Вычисление по зимним кривым прежде всего целесообразно использовать в целях сокращения числа измеренных расходов в период сплошного ледостава, при устойчивом ледоставе без оттепелей и для получения однозначной связи в условиях сплошного ледостава при

наличии оттепелей, вызывающих увеличение расходов, но не нарушающих устойчивость ледяного покрова.

Однако нужно иметь в виду, что в данном варианте зимнего режима применение кривых оправдывает себя только для крупных рек. На средних и малых реках при рассматриваемом режиме могут иметь место колебания уровня, обусловленные только ходом ледообразования, учет которых при вычислении стока ошибочен.

Подпор от затора осложняет применение кривых, но если такой подпор носит кратковременный и ясно выраженный характер, то кривые все же могут применяться в сочетании со срезкой подпорных уровней.

Кривые расходов периода весеннего вскрытия являются кривыми неустойчивой связи, выражающими связь между расходом и уровнем, изменяющуюся во времени, вследствие постепенного убывания влияния ледообразований.

2.3.5 Срезка подпорных уровней за подпорный период.

Метод применяется, когда подпор от ледяных образований на нижележащем участке резко выражен, границы начала и конца подпорного периода чётко определяются по графику уровня и в то же время указанный период не освещён измерениями расходов.

Сущность рассматриваемого приёма заключается в том, что наблюждённые уровни за подпорный период не учитываются.

2.3.6 Восстановление уровней по кривой связи с бесподпорным постом.

Необходимым условием для применения этого способа, является отсутствие влияния подпора на уровне смежного поста, т.е. этот пост должен либо находиться ниже места возникновения подпора, либо быть вне зоны распространения подпора.

Способ применим, как правило, только в тех случаях, когда подпор от заторно-зажорных явлений возникает при свободном состоянии русла на обоих постах, так как кривая связи для несвободного состояния русла обычно не получается.

Ценность рассматриваемого приёма заключается в том, что он позволяет исключить влияние подпора даже в тех случаях, когда в подпорный период имеет место немонотонный и неплавный ход изменений расхода.

2.4. Интерполяционно-гидравлические модели.

Анализ применяемых в настоящее время методов учета стока в зимний период показал, что они в основном опираются на графические построения и имеют существенные ограничения. Более обоснованны физически и точны интерполяционно-гидравлические модели, получившие развитие в исследованиях И.Ф.Карасева [2].

Одним из результатов этих исследований был выход в 80 году рекомендаций по учету стока на реках в зимний и переходные периоды, разработанных отделом гидрометрии ГГИ и сотрудниками ВВУГкс под руководством И.Ф.Карасева [3].

Особое преимущество предлагаемых моделей состоит в возможности экстраполяции пропускной способности русла для получения оперативных данных о расходах воды в реках.

Предлагаемые физико-математические модели проверялись в частности ВВУГКС и оказались эффективней применяемых способов, но не получили распространения из-за отсутствия в то время на гидрологической сети вычислительной техники.

К настоящему времени большинство станций гидрологической сети оснащено компьютерами и имеет возможность использовать, методы учета стока требующие выполнения большого объема вычислений, что открывает перспективу повышения точности учета стока за счет внедрения современных методик и технологий, основы которых были заложены в конце прошлого века.

Поэтому возникла настоятельная необходимость в обосновании перехода на новые методы. Здесь рассматриваются два метода рекомендуемые [3] для учета стока в зимне-весеннего период на реках с устойчивым ледоставом: регрессионно-гидравлическая модель (РГМ) и модель, предназначенная для расчета ветви подъема гидрографа.

2.4.1 Регрессионно-гидравлическая модель

Данная модель использует уравнение регрессии, предикторами которого являются факторы, определяющие величину $K_{\text{зим}}$:

- фактор шероховатости, представленный как фактор времени, тем самым учитывается закономерность изменения гидравлических сопротивлений в зимний и переходные периоды

$$x_1 = \frac{T}{T_{\text{л}}} e^{-5 \frac{T}{T_{\text{л}}}},$$

где T – время в сутках от начала ледообразования; $T_{\text{л}}$ – продолжительность зимнего периода

- факторы, отражающие степень стеснения русла льдом

$$x_2 = \frac{\omega_l}{\omega_0}; \quad x_4 = \frac{\omega_l^2}{\omega_0^2},$$

где ω_l – площадь погруженного льда; ω_0 – полная площадь сечения

- смешанные факторы

$$x_3 = \frac{\omega_l}{\omega_0} \frac{T}{T_l} e^{-5 \frac{T}{T_l}}; \quad x_5 = \frac{\omega_l^2}{\omega_0^2} \frac{T}{T_l} e^{-5 \frac{T}{T_l}};$$

Таким образом, получаем уравнение множественной линейной регрессии

$$y = K_{зим} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5. \quad (2.3)$$

Включение в модель РГМ нелинейных членов (x_3 и x_5) считается весьма целесообразным, так как показано [22], что оно существенно расширяет возможности регрессионного анализа.

В уравнении (2.3) непосредственно не учтены факторы, определяющие процесс вскрытия ото льда: механическое воздействие воды на ледяной покров, нарушающее его целостность, и тепловое разрушение льда под действием солнечной радиации и положительных температур воздуха.

Их физическая оценка чрезвычайно затруднена [20, 23]. В структуре уравнения (2.3) совместное проявление механического и теплового факторов вскрытия рек в порядке первого приближения учтено фактором времени.

Для получения режимных данных учета стока предлагается использовать как годовые зависимости (полученные по данным измерений текущего года), так и многолетнюю зависимость (полученная по всей

совокупности наблюдений) или многолетние зависимости (полученные с учетом суровости зима).

При этом параметры уравнения определяются по данным измерений всего зимнего периода.

2.4.2 Модель спада зимних расходов и истощения стока

Одна из особенностей гидрографа в устойчивые зимы без оттепелей – спад расходов воды по мере убывания запасов влаги в бассейне реки. На основе этой физической тенденции построена одна из моделей гидрометрического учёта стока.

Уменьшение расходов воды с наступлением межени, в том числе и зимней, происходит по экспоненциальному закону. Он впервые был получен Буссинеском как частное решение линеаризованного уравнения неустановившегося движения грунтовых вод при большой мощности водоносного пласта.

В действительности же подземное питание рассредоточено по различным водоносным горизонтам, располагающимся на разных высотах. Применительно к этим условиям кривая спада гидрографа стока эффективно описывается формулой, выведенной Буссинеском как решение дифференциального уравнения фильтрации

$$Q=Q_0/(1+\alpha_0 T)^2 \quad (2.4)$$

где α_0 – константа истощения грунтового питания, T – время

Уравнение (2.4) относится к отдельному водоносному горизонту, при этом за Q_0 принимается расход, при котором река переходит на подземное питание.

Для рек с относительно малыми потерями стока на ледообразование при отсутствии интенсивного уменьшения расходов в начальный период ледостава будем иметь :

$$Q_0/Q=1+2 \alpha_0 T+ \alpha_0 T^2 \quad (2.5)$$

Ветвь подъема гидрографа стока требует особой аппроксимации. Задача упрощается тем, что нарастание расходов воды в предвесенний период во многих случаях описывается монотонной кривой.

В данном случае в качестве отправной величины служит минимальный расход воды, измеренный в начале подъема гидрографа, а ветвь подъема аппроксимируется зависимостью:

$$Q_t=Q_{мин} * e^{(a_0+a_1 T)}, \quad (2.6)$$

где T – время в сутках от начала подъема, a_0, a_1 – коэффициенты регрессионного уравнения:

$$\ln(Q_t/Q_{\min}) = a_0 + a_1 T. \quad (2.7)$$

Как показали численные эксперименты указанная зависимость неплохо аппроксимирует начало подъема гидрографа, но как правило существенно занижает расходы воды в период вскрытия, несомненно лучшие результаты для периода вскрытия дает модель РГМ.

2.5. Метод, основанный на применении параметра Великанова.

Как показано в первой главе гидравлическое сопротивление движению руслового потока в зимний период значительно меняется, особенно в период вскрытия.

На постах гидрологической сети измеряются уровни H , расходы Q , толщина льда и температура воды t , но, как правило, не выполняются измерения уклонов I и тем более не оцениваются коэффициенты шероховатости n , служащие основной характеристикой сопротивления русла, поэтому для оценки гидравлических сопротивлений целесообразно использовать комплекс:

$$m = \sqrt{I/n} = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}}, \quad (2.8)$$

где ω площади живого сечения потока под ледяным покровом, B – ширина русла;

Комплекс $m = \sqrt{I/n}$ играет особую роль в динамике русловых потоков. Его использовал М.А.Великанов [24] при разработке метода построения

плана течений, а в гидрометрии он принят в качестве основополагающего параметра интерполяционно-гидравлических моделей 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 параметра Великанова открывается возможность: во-первых, учета изменения гидравлических сопротивлений в зимне-весенний период (в том числе при вскрытии реки); во-вторых, получения расходов воды, при этом формула для вычисления EPB имеет следующий вид:

$$Q = \frac{m \omega^{5/3}}{B^{2/3}}, \quad (2.9)$$

где величины ω и B определяются для каждого расчетных суток по среднесуточным уровням H на основе зависимостей $\omega(H)$ и $B(H)$ (получаемых для каждого створа), а параметр m находится по результатам линейной интерполяции значений m , определяемых по данным измерений расходов воды.

Глава 3. Анализ результатов расчетов

Для дальнейшего обоснования применения новых методов в данной работе продолжена апробация модели РГМ и проверялась возможность применения параметра Великанова при вычислении стока в осенне-зимний период.

С этой целью выполнены сравнительные расчеты для 11 рек бассейна ЕТР. При этом использовались данные наблюдений на реках с устойчивым ледоставом.

Предварительно, на основе значений параметра Великанова, полученных по данным измерений расходов воды, производилась оценка изменения гидравлического сопротивления в осенне-зимний период (таблица 3.1).

Таблица 3.1 Динамика изменения параметра Великанова (m)

№	река-пост	год	при св русле		в начале лдст		при устойчивом лдст		
			m	dm	m	dm	m	m min	dm
1	р.Ветлуга-Ветлужский	1970	0,3554	0,0005	0,3549	0,0929	0,2620	0,2088	0,0532
2	р.Зуша-Мценск	1970	0,4070	0,0685	0,3385	0,0199	0,3186	0,3179	0,0007
3	р.Ловать-Холм	1968	0,3499	0,0587	0,2912	0,0592	0,2320	0,2309	0,0010
4	р.Луга-Кингисепп	1968	0,4180	0,0699	0,3481	0,0554	0,2927		0,0148
5	р.Опуха-Платоново	1961	0,4718	0,1098	0,3621	0,1346	0,2274	0,1375	0,0899
6	р.Полисть-Подтополье	1970	0,2581	0,0074	0,2507	0,0607	0,1900	0,1808	0,0091
7	р.Селижаровка-	1970	0,3628	0,0309	0,3319	0,0994	0,2325	0,1693	0,0632

	Яровинка								
8	р.Великая-Пятоново	1968	0,1995	0,0091	0,1904	0,0483	0,1421	0,1106	0,0314
9	р.Молога-Устина	1970	0,3809	0,0173	0,3637	0,0876	0,2761	0,2480	0,0281
10	р.Сура-Княжиха	1970	0,1744	0,0097	0,1647	0,0604	0,1043		0,0433
11	р.Уза-Чардым	1968	0,5095	0,0297	0,4798	0,0839	0,3959	0,3820	0,0140

Анализ этих оценок показывает, что в большинстве случаев характерно закономерное уменьшение значения параметра Великанова, это свидетельствует о значительном изменении гидравлических сопротивлений в осенне-зимний период.

При вычислении стока в осенне-зимний период в отдельные годы (выбирались годы, достаточно освещенные измерениями расходов воды) расчеты производились следующими методами:

- метод переходных коэффициентов (данные ГЕ),
- регрессионно-гидравлическая модель,
- метод, основанный на интерполяции параметра Великанова.

Для оценки эффективности методов, выполнялись расчеты при наличии данных измерений расходов воды и при сокращенном их количестве.

Метод переходных коэффициентов, являющийся основным из применяемых в настоящее время методов, рассматривался как реперный.

Хотя очевидно, что более физически обоснованные новые методы (РГМ и интерполяция m) в отдельные периоды (например, в период вскрытия) могут давать более точные результаты.

Таким образом при наличии измерений РВ в качестве эталонных принимались ежедневные расходы воды, приведенные в гидрологическом ежегоднике ($Q_{ге}$).

Для расчетов по модели мы использовали уравнение регрессии, предикторами которого являются факторы, определяющие величину $K_{зим}$:

- фактор шероховатости, представленный как фактор времени, тем самым учитывается закономерность изменения гидравлических сопротивлений в зимний и переходные периоды

$$x_1 = \frac{T}{T_{л}} e^{-5 \frac{T}{T_{л}}},$$

где T – время в сутках от начала ледообразования; $T_{л}$ – продолжительность зимнего периода

- факторы, отражающие степень стеснения русла льдом

$$x_2 = \frac{\omega_l}{\omega_0}; \quad x_4 = \frac{\omega_l^2}{\omega_0^2},$$

где ω_l – площадь погруженного льда; ω_0 – полная площадь сечения

- смешанные факторы

$$x_3 = \frac{\omega_l}{\omega_0} \frac{T}{T_l} e^{-5 \frac{T}{T_l}}; \quad x_5 = \frac{\omega_l^2}{\omega_0^2} \frac{T}{T_l} e^{-5 \frac{T}{T_l}};$$

Таким образом, получаем уравнение множественной линейной регрессии

$$y = K_{зим} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5. \quad (2.3)$$

Включение в модель РГМ нелинейных членов (x_3 и x_5) считается весьма целесообразным, так как показано [22], что оно существенно расширяет возможности регрессионного анализа.

В уравнении (2.3) непосредственно не учтены факторы, определяющие процесс вскрытия ото льда: механическое воздействие воды на ледяной покров, нарушающее его целостность, и тепловое разрушение льда под действием солнечной радиации и положительных температур воздуха.

Их физическая оценка чрезвычайно затруднена [20, 23]. В структуре уравнения (2.3) совместное проявление механического и теплового

факторов вскрытия рек в порядке первого приближения учтено фактором времени.

Расчетное уравнение регрессионно-гидравлической модели получалось по данным измерений не за весь период ледовых явления, как рекомендуется разработчиками метода, а только за расчетный осенне-зимний период, включающий период свободного русла, начала ледостава и устойчивого ледостава.

Как показали численные эксперименты в этом случае возможно использование только четырех и менее факторов.

Параметры модели РГМ при полном и сокращенном числе измерений приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Параметры модели РГМ при полном и сокращенном числе измерений

№	река-пост	год	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	R	σ %
1	р.Ветлуга-Ветлужский	1970	- 0,728	24,365	-1,491	0	0	0	1,00	11,66
2	р.Зуша-Мценск	1970	0,925	0,000	-0,225	0	0	0	1,00	11,54
3	р.Ловать-Холм	1968	1,151	0,795	-2,676	0	0	0	1,00	10,33
4	р.Луга-Кингисепп	1968	0,880	0,000	-0,699	0	0	0	1,00	13,43
5	р.Опуха-Платоново	1961	0,751	0,129	-2,074	0	1,964	0	1,00	20,76
6	р.Полисть-	1970	1,080	-	2,492	0	0	0	1,00	4,83

	Подтополье			13,176						
7	р.Селижаровка-Яровинка	1970	1,189	0,000	-10,214	0	0	0	1,00	11,42
8	р.Великая-Пятоново	1968	1,391	0,000	0,000	0	-3,6	0	1,00	49,48
9	р.Молога-Устина	1970	- 0,046	0,000	4,412	0	0	0	1,00	18,23
10	р.Сура-Княжиха	1970	- 4,984	51,361	132,261	0	0	0	1,00	52,89
11	р.Уза-Чардым	1968	- 2,432	20,976	-1,521	0	0	0	1,00	29,16

В таблице 3.3 представлены расчеты стока за зимний период по модели РГМ

Таблица 3.3 Река Ловать-Холм, расчета стока по модели РГМ

№	дата	Н	сост	Wo	Wл	Bo
1	2/XI	104	св	198,00	0	102
2	3/XI	100	св	193,31	0	102,00
3	4/XI	96	св	189,00	0	101,89
4	5/XI	90	св	182,53	0	101,72
5	6/XI	85	св	177,14	0	101,58
6	7/XII	78	св	169,60	0	101,38
7	8/XI	72	св	163,13	0	101,21
8	9/ XI	66	св	156,67	0	101,04
9	10/XI	62	св	152,36	0	100,93
10	11/XI	55	св	145,00	0	101,00

11	12/XI	53	св	142,66	0	100,68
12	13/XI	54	заб	143,74	4,29	100,70
13	14/XI	60	лдст	150,20	8,57	100,87
14	15/XI	65	лдст	155,59	12,86	101,01
15	16/XI	68	лдст	158,82	17,14	101,10
16	17/XI	69	лдст	159,90	21,43	101,13
17	18/XI	59	лдст	149,12	25,71	100,85
18	19/XI	56	лдст	145,00	30,00	101,00
19	20/XI	50	лдст	139,43	29,00	100,59
20	21/XI	42	лдст	130,00	28,00	100,00
21	22/XI	35	лдст	123,26	26,78	100,17
22	23/XI	30	лдст	117,87	25,57	100,03
23	24/XI	29	лдст	116,79	24,35	100,00
24	25/XI	30	лдст	117,87	23,13	100,03
25	26/XI	28	лдст	115,72	21,92	99,97
26	27/XI	30	лдст	119,00	20,70	100,00

Продолжение таблицы 3.3

т	X1	X2	X3	X4	X5
1	0,0478	0,02982	0,001424	0,000889	4,247E-05

2	0,0685	0,05707	0,003906	0,003257	0,0002229
3	0,0736	0,08263	0,00608	0,006828	0,0005024
4	0,0703	0,10794	0,007587	0,01165	0,0008189
5	0,063	0,13401	0,008437	0,017959	0,0011307
6	0,0541	0,17244	0,009335	0,029734	0,0016096
7	0,0453	0,2069	0,009363	0,042806	0,0019371
8	0,0371	0,208	0,007708	0,043263	0,0016032
9	0,0299	0,21538	0,006434	0,046391	0,0013858
10	0,0238	0,21729	0,005168	0,047215	0,0011229
11	0,0187	0,2169	0,004066	0,047047	0,0008819
12	0,0147	0,20849	0,003055	0,043467	0,0006369
13	0,0114	0,19626	0,002232	0,038517	0,0004381
14	0,0088	0,1894	0,001662	0,035872	0,0003148
15	0,0067	0,17395	0,001172	0,030258	0,0002039

Вычисление стока на основе параметра Великанова производилась следующим образом:

- на каждый день измерения расхода воды, вычислялось значения 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:

$$Q = \frac{m \varpi^{5/3}}{B^{2/3}}.$$

Для примера в таблице 3.4 представлены расчеты стока методом основанным на использовании Параметра Великанова для характерных рек Европейской территории России.

Таблица 3.4

Вычисление ежедневных расходов воды на основе параметра Великанова

р.Ловать - г.Холм
1968год, F=14700км²

№	дата	Н	состояние реки	Wo	Bo	m	Q	δ
1	2/XI	104	св	198,00	102	0,36675	113	-2,65487
2	3/XI	100	св	193,31	102,00	0,363573	107,6309	-4,05932
3	4/XI	96	св	189,00	101,89	0,360396	102,8306	-5,02706
4	5/XI	90	св	182,53	101,72	0,357219	96,28569	-4,89617
5	6/XI	85	св	177,14	101,58	0,354042	90,86466	-5,21142
6	7/XII	78	св	169,60	101,38	0,350865	83,85796	-5,17785
7	8/XI	72	св	163,13	101,21	0,347688	77,97267	-5,16506

8	9/XI	66	св	156,6 7	101,0 4	0,34451 1	72,3047 8	-5,24893
9	10/XI	62	св	152,3 6	100,9 3	0,34133 4	68,4340 5	-5,50304
10	11/XI	55	св	145,0 0	101,0 0	0,33815 7	62,4	-4,80769
11	12/XI	53	св	142,6 6	100,6 8	0,32474 5	58,4458 5	-8,47647
12	13/XI	54	заб	143,7 4	100,7 0	0,31133 2	56,7285 8	-2,24124
13	14/XI	60	лдст	150,2 0	100,8 7	0,29792	58,3500 2	5,05572 9
14	15/XI	65	лдст	155,5 9	101,0 1	0,28450 7	59,0393 9	10,3988
15	16/XI	68	лдст	158,8 2	101,1 0	0,27109 5	58,1853	13,5520 5
16	17/XI	69	лдст	159,9 0	101,1 3	0,25768 2	55,9230 3	14,7041 9
17	18/XI	59	лдст	149,1 2	100,8 5	0,24427	47,2803 3	4,39999 1
18	19/XI	56	лдст	145,0 0	101,0 0	0,23085 7	42,6	0
19	20/XI	50	лдст	139,4 3	100,5 9	0,22359 9	38,7554 7	1,94932 1
20	21/XI	42	лдст	130,0 0	100,0 0	0,21634 1	33,5	0
21	22/XI	35	лдст	123,2 6	100,1 7	0,22019 5	31,1668 7	2,13967 1
22	23/XI	30	лдст	117,8 7	100,0 3	0,22404 8	29,4633 1	6,66358 6
23	24/XI	29	лдст	116,7	100,0	0,22790	29,5203	5,48891

	I			9	0	2	5	9
24	25/X I	30	лдст	117,8 7	100,0 3	0,23175 6	30,4768 5	2,54898 6
25	26/X I	28	лдст	115,7 2	99,97	0,23560 9	30,0564 5	2,18404 4
26	27/X I	30	лдст	119,0 0	100,0 0	0,23946 3	32	0,625

Вычисление ежедневных расходов воды на основе параметра
Великанова

р.Зуша - г.Мценск 1970год,
F=6000км²

№	дата	H	состояние реки	Wo	Bo	m	Q
1	31/X	136	св	43,50	56	0,397188	14,6
2	1/XI	136	св	43,11	56,09	0,399216	14,44113
3	2/XI	139	св	44,82	56,41	0,401244	15,42992
4	3/XI	142	св	46,54	56,73	0,403272	16,44629
5	4/XI	143	св	47,11	56,83	0,4053	16,84736
6	5/XI	137	заб	43,68	56,20	0,407328	15,04224
7	6/XI	140	заб	45,40	56,52	0,409356	16,05733
8	7/XI	136	заб	43,11	16,00	0,411384	34,3433
9	8/XI	132	заб	40,83	55,67	0,413411	13,72716
10	9/ XI	144	заб	45,50	56,20	0,415439	16,41985

11	10/XI	140	заб	45,40	56,52	0,417467	16,37552
12	11/XI	138	заб	44,25	56,31	0,416058	15,68108
13	12/XI	138	заб	44,25	56,31	0,41465	15,62798
14	13/XI	136	св	43,11	56,09	0,413241	14,94845
15	14/XI	135	св	42,54	55,99	0,411832	14,58854
16	15/XI	134	св	41,97	15,50	0,410423	33,46567
17	16/XI	135	св	42,54	55,99	0,409014	14,48872
18	17/XI	136	св	43,11	56,09	0,407605	14,7446
19	18/XI	136	св	43,11	56,09	0,406196	14,69363
20	19/XI	138	св	44,50	56,31	0,404787	15,3979
21	20/XI	138	св	44,25	56,00	0,403378	15,25836
22	21/XI	138	св	44,25	56,31	0,400087	15,07912
23	22/XI	136	св	43,11	56,09	0,396795	14,35356
24	23/XI	136	св	43,11	56,09	0,393504	14,23449
25	24/XI	131	заб	40,26	55,57	0,390212	12,67239
26	25/XI	124	заб	36,26	54,83	0,38692	10,65138
27	26/XI	128	заб	38,55	55,25	0,383629	11,63229
28	27/XI	130	заб	39,69	55,46	0,380337	12,07653
29	28/XI	134	св	41,97	55,88	0,377045	13,0754
30	29/XI	134	св	41,97	55,88	0,373754	12,96125
31	30/XI	130	св	39,60	55,60	0,370462	11,7
32	1/XII	124	заб	36,26	15,50	0,36656	23,42803
33	2/XII	130	заб	39,69	55,46	0,362658	11,51518
34	3/XII	134	заб	41,97	55,88	0,358756	12,44115
35	4/XII	138	заб	44,25	56,31	0,354854	13,37431
36	5/XII	138	заб	44,25	56,31	0,350952	13,22724

37	6/XII	136	заб	43,11	56,09	0,34705	12,55408
38	7/XII	128	заб	38,55	55,25	0,343148	10,40483
39	8/XII	130	заб	39,69	55,46	0,339246	10,77179
40	9/XII	131	заб	40,26	55,57	0,335344	10,8905
41	10/XII	128	заб	38,20	55,50	0,331441	9,87
42	11/XII	127	заб	37,98	16,00	0,330086	22,30555
43	12/XII	127	заб	37,98	55,15	0,328731	9,735332
44	13/XII	126	заб	37,41	55,04	0,327376	9,465648
45	14/XII	125	заб	36,84	54,94	0,32602	9,199729
46	15/XII	127	заб	37,98	55,15	0,324665	9,614919
47	16/XII	130	заб	39,69	55,46	0,32331	10,26578
48	17/XII	156	заб	54,53	58,20	0,321954	16,80825
49	18/XII	161	заб	57,38	58,72	0,320599	18,11361
50	19/XII	152	лдст	52,24	57,78	0,319244	15,59542
51	20/XII	150	лдст	50,80	57,90	0,317888	14,8

Вычисление ежедневных расходов воды на основе параметра
Великанова

р.Молога - д.Устина 1970год, F=29000км²

№	дата	Н	состояние реки	Wo	Bo	m	Q

1	26/IX	153	CB	112,00	163	0,35202	30,70004
2	27/IX	154	CB	110,61	163,22	0,349351	29,81374
3	28/IX	155	CB	111,82	163,57	0,346681	30,08306
4	29/IX	156	CB	113,03	163,92	0,344012	30,34721
5	30/IX	158	CB	115,44	164,62	0,341343	31,10291
6	1/X	159	CB	116,65	164,97	0,338674	31,35498
7	2/X	156	CB	113,03	163,92	0,336004	29,64079
8	3/X	158	CB	115,44	164,62	0,333335	30,37324
9	4/X	159	CB	116,65	164,97	0,330666	30,61359
10	5/X	158	CB	115,44	164,62	0,327996	29,88679
11	6/X	158	CB	120,00	164,00	0,325327	31,70003
12	7/X	157	CB	114,23	164,27	0,33388	29,93698
13	8/X	157	CB	114,23	164,27	0,342433	30,70388
14	9/X	157	CB	114,23	164,27	0,350986	31,47079
15	10/X	159	CB	116,65	164,97	0,359539	33,28678
16	11/X	160	CB	117,85	165,32	0,368093	34,61953
17	12/X	162	CB	120,27	166,02	0,376646	36,53864
18	13/X	163	CB	121,48	166,37	0,385199	37,94231
19	14/X	166	CB	125,10	167,41	0,393752	40,5606
20	15/X	168	CB	127,51	168,11	0,402305	42,66445
21	16/X	168	CB	127,51	168,11	0,410858	43,57151
22	17/X	170	CB	129,92	168,81	0,419411	45,76414
23	18/X	171	CB	131,13	169,16	0,427964	47,35739
24	19/X	172	CB	132,34	169,51	0,436517	48,97974
25	20/X	173	CB	133,55	169,86	0,44507	50,63135
26	21/X	172	CB	115,00	170,00	0,453624	40,2

27	22/X	172	св	132,34	169,51	0,445056	49,93781
28	23/X	170	св	129,92	168,81	0,436488	47,62749
29	24/X	170	св	129,92	168,81	0,42792	46,69262
30	25/X	170	св	129,92	168,81	0,419353	45,75775
31	26/X	172	св	132,34	169,51	0,410785	46,0924
32	27/X	173	св	133,55	169,86	0,402217	45,75633
33	28/X	174	св	134,75	170,21	0,393649	45,39605
34	29/X	175	св	135,96	170,56	0,385081	45,01138
35	30/X	175	заб	135,96	170,56	0,376514	44,00991
36	31/X	175	заб	135,96	170,56	0,367946	43,00844
37	1/XI	174	заб	134,75	170,21	0,359378	41,44388
38	2/XI	186	заб	149,24	174,40	0,35081	47,18839
39	3/XI	186	лдст	149,24	174,40	0,342243	46,03592
40	4/XI	188	лдст	151,65	175,09	0,333675	45,97731
41	5/XI	186	лдст	149,24	174,40	0,325107	43,73098
42	6/XI	181	лдст	143,20	172,65	0,316539	40,01521
43	7/XI	177	лдст	138,37	171,25	0,307972	36,96885
44	8/XI	176	лдст	137,17	170,90	0,299404	35,46764
45	9/ XI	176	лдст	137,17	170,90	0,290836	34,4527
46	10/XI	178	лдст	139,58	171,60	0,282268	34,3308
47	11/XI	178	лдст	139,58	171,60	0,273701	33,28875
48	12/XI	180	лдст	141,99	172,30	0,265133	33,0918
49	13/XI	178	лдст	139,58	171,60	0,256565	31,20465
50	14/XI	180	лдст	144,00	173,00	0,247997	31,6
51	15/XI	184	лдст	146,82	173,70	0,249572	32,7579
52	16/XI	186	лдст	149,24	174,40	0,251146	33,78231

53	17/XI	188	лдст	151,65	175,09	0,252721	34,82257
54	18/XI	192	лдст	156,47733	176,4911	0,254295	36,72332
55	19/XI	194	лдст	158,89126	177,18942	0,25587	37,80595
56	20/XI	198	лдст	163,7191	178,58608	0,257444	39,7756
57	21/XI	200	лдст	166,13303	179,2844	0,259018	40,90054
58	22/XI	202	лдст	168,54695	179,98273	0,260593	42,04137
59	23/XI	201	лдст	167,33999	179,63357	0,262167	41,84593
60	24/XI	194	лдст	158,89126	177,18942	0,263742	38,96911
61	25/XI	187	лдст	150,44253	174,74528	0,265316	36,12251
62	26/XI	185	лдст	148,0286	174,04695	0,266891	35,46489
63	27/XI	186	лдст	149,23556	174,39611	0,268465	36,11193
64	28/XI	185	лдст	155	173	0,27004	38,9

Вычисление ежедневных расходов воды на основе параметра
Великанова

(р.Оптуха - д.Платоново
1961год)

№	дата	Н	состояние реки	Wo	Bo	m	Q	
1	9/ XI	84	св	5,85	15,5	0,50406	1,54	1,54

2	10/XI	82	св	5,72	15,40	0,471819	1,396178	1,34
3	11/XI	82	св	5,72	15,40	0,439578	1,300772	1,34
4	12/XI	86	лдст	6,30	15,53	0,407337	1,404985	0,98
5	13/XI	93	лдст	7,30	15,74	0,375096	1,638867	1,16
6	14/XI	92	лдст	7,15	15,71	0,342855	1,451341	1,04
7	15/XI	96	лдст	7,72	15,84	0,310614	1,48673	1,26
8	16/XI	98	лдст	7,99	16,00	0,278375	1,4	1,4
9	17/XI	94	лдст	7,44	15,78	0,284324	1,281391	1,13
10	18/XI	94	лдст	7,44	15,78	0,290274	1,308204	1,16
11	19/XI	86	лдст	6,30	15,53	0,296224	1,021733	0,81
12	20/XI	94	лдст	7,44	15,78	0,302173	1,361831	1,6
13	21/XI	91	лдст	7,01	15,68	0,308123	1,262852	1,53
14	22/XI	92	лдст	7,15	15,71	0,314072	1,329501	1,75
15	23/XI	85	лдст	6,15	15,50	0,320022	1,063806	1,18
16	24/XI	87	заб	6,64	15,50	0,325971	1,23	1,23
17	25/XI	101	заб	8,44	15,99	0,338591	1,865859	1,17
18	26/XI	84	заб	6,01	15,46	0,351211	1,124156	1,22
19	27/XI	88	заб	6,58	15,59	0,363831	1,347685	1,26
20	28/XI	96	заб	7,72	15,84	0,37645	1,801852	1,39
21	29/XI	97	заб	7,87	15,87	0,38907	1,917505	1,43
22	30/XI	98	заб	8,01	15,90	0,40169	2,037319	1,46
23	1/XII	92	заб	7,15	15,71	0,41431	1,753817	1,51
24	2/XII	88	заб	6,58	15,59	0,426929	1,581413	1,66
25	3/XII	86	заб	6,30	15,53	0,439549	1,516092	1,7
26	4/XII	98	заб	8,01	15,90	0,452169	2,293343	1,84
27	5/XII	88	заб	6,58	15,59	0,464789	1,72165	2,01

28	6/XII	86	заб	6,30	15,53	0,477409	1,646676	1,79
29	7/XII	88	св	6,58	15,59	0,490028	1,815141	2,05
30	8/XII	88	св	6,58	15,59	0,502648	1,861887	2,03
31	9/XII	87	св	6,44	15,56	0,515268	1,842529	1,92
32	10/XII	86	св	6,29	15,50	0,527888	1,82	1,82
33	11/XII	86	заб	6,30	15,53	0,49488	1,706939	1,58
34	12/XII	104	заб	8,87	16,09	0,461873	2,753599	1,89
35	13/XII	96	лдст	7,72	15,84	0,428865	2,052732	2,16
36	14/XII	98	лдст	8,01	15,90	0,395858	2,00774	2,08
37	15/XII	108	лдст	9,44	16,21	0,36285	2,388256	1,79
38	16/XII	110	лдст	9,73	16,27	0,329843	2,275819	1,5
39	17/XII	100	лдст	8,30	15,96	0,296836	1,591929	1,23
40	18/XII	96	лдст	7,72	15,84	0,263828	1,262794	1,1
41	19/XII	98	лдст	8,01	15,90	0,230821	1,170693	1,07
42	20/XII	100	лдст	8,30	16,00	0,197813	1,06	1,06
43	21/XII	99	лдст	8,15	15,93	0,192331	1,003339	0,94
44	22/XII	100	лдст	8,30	15,96	0,186848	1,002068	0,91
45	23/XII	100	лдст	8,30	15,96	0,181366	0,972665	0,83
46	24/XII	98	лдст	8,01	15,90	0,175883	0,892058	0,72
47	25/XII	98	лдст	8,01	15,90	0,170401	0,864252	0,7
48	26/XII	98	лдст	8,01	15,90	0,164918	0,836445	0,67
49	27/XII	98	лдст	8,01	15,90	0,159436	0,808639	0,66
50	28/XII	108	лдст	9,44	16,21	0,153953	1,013311	0,68
51	29/XII	100	лдст	8,30	15,96	0,148471	0,79625	0,7
52	30/XII	100	лдст	8,30	15,96	0,142989	0,766847	0,69
53	31/XII	104	лдст	8,85	16,00	0,137506	0,82	0,82

Результаты расчетов представлены в таблице 3.5, где сравниваются средние за осенне-зимний период расходы, приведенные в ежегоднике ($Q_{ге}$) и рассчитанные: по модели РГМ ($Q_{ргм}$) и на основе линейной интерполяции параметра Великанова ($Q_{инт.м}$) и измеренных расходов воды ($Q_{инт.рв}$).

Таблица 3.5. Результаты расчета стока в осенне-зимний период

№	река-пост	год	$Q_{ге}$	$Q_{ргм}$	σ	$Q_{вел.}$	σ	$Q_{кзим}$	σ
1	р.Ветлуга-Ветлужский	1970	53,32	47,44	11,66	53,78	4,65	52,73	4,10
2	р.Зуша-Мценск	1970	13,43	12,15	11,54	13,47	4,90	12,37	10,79
3	р.Ловать-Холм	1968	60,56	63,30	10,33	60,27	4,80	61,25	6,41
4	р.Луга-Кингисепп	1968	104,84	98,82	13,43	115,17	14,10	99,87	11,51

5	р.Опуха-Платоново	1961	1,33	1,37	20,76	1,46	17,95	1,53	23,87
6	р.Полисть-Подтополье	1970	5,39	5,33	4,83	5,08	7,38	5,38	3,33
7	р.Селижаровка-Яровинка	1970	11,53	10,86	11,42	12,58	13,74	10,65	8,91
8	р.Великая-Пятоново	1968	107,81	152,70	49,48	110,03	13,04	118,14	20,66
9	р.Молога-Устина	1970	37,92	33,26	18,23	38,28	6,09	40,05	6,17
10	р.Сура-Княжиха	1970	108,10	56,77	52,89	107,92	10,65	109,75	4,87
11	р.Уза-Чардым	1968	5,33	5,93	29,16	5,28	34,29	5,02	12,21

Сопоставление результатов расчета по модели РГМ с данными ГЕ свидетельствует, о не достаточной близости результатов, так как относительные расхождения (σ) варьировали в пределах 10,3-50,9% и в среднем составили 21,5%.

Характерный пример расчета гидрографа по модели РГМ представлен на рис 3.1.

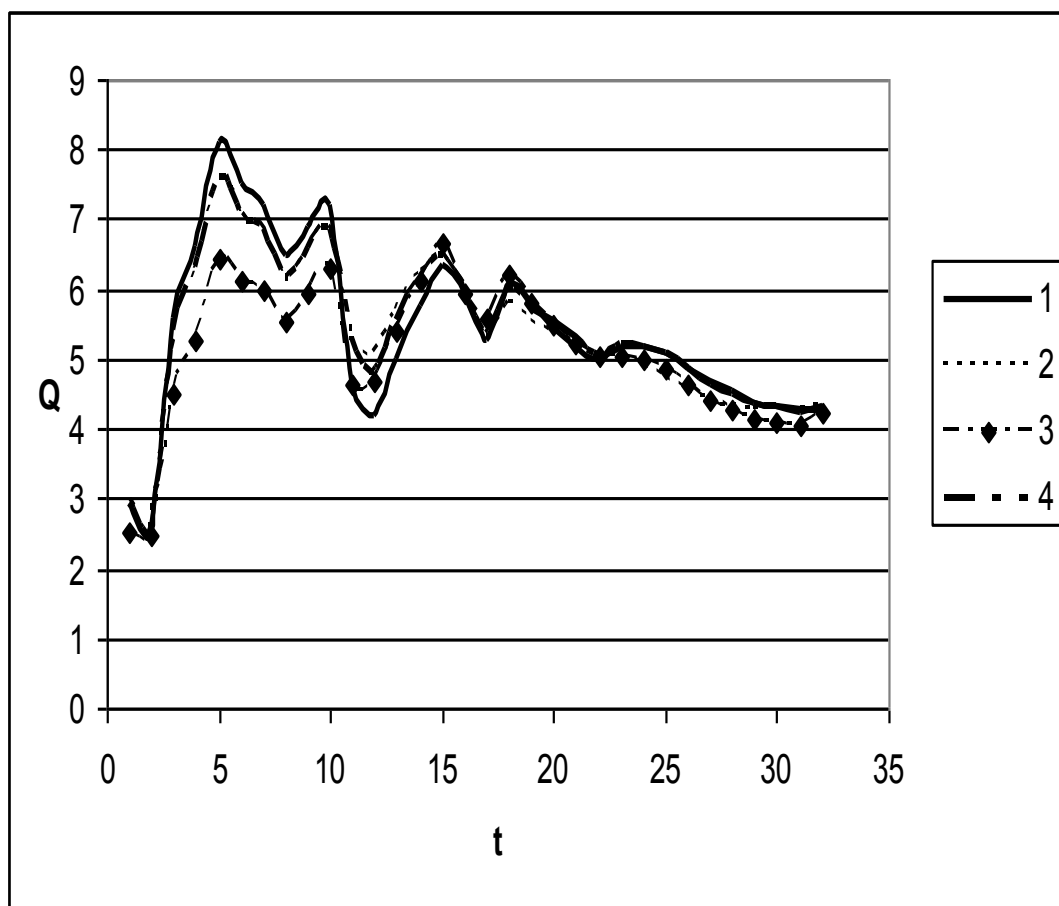


Рис.3.1. Гидрограф р.Полисть-д.Подтополье в осенне-зимний период,
1970 г.

1 – данные ГЕ; 2 – РГМ; 3 - интерполяция m ; 4- интерполяция Кзим;

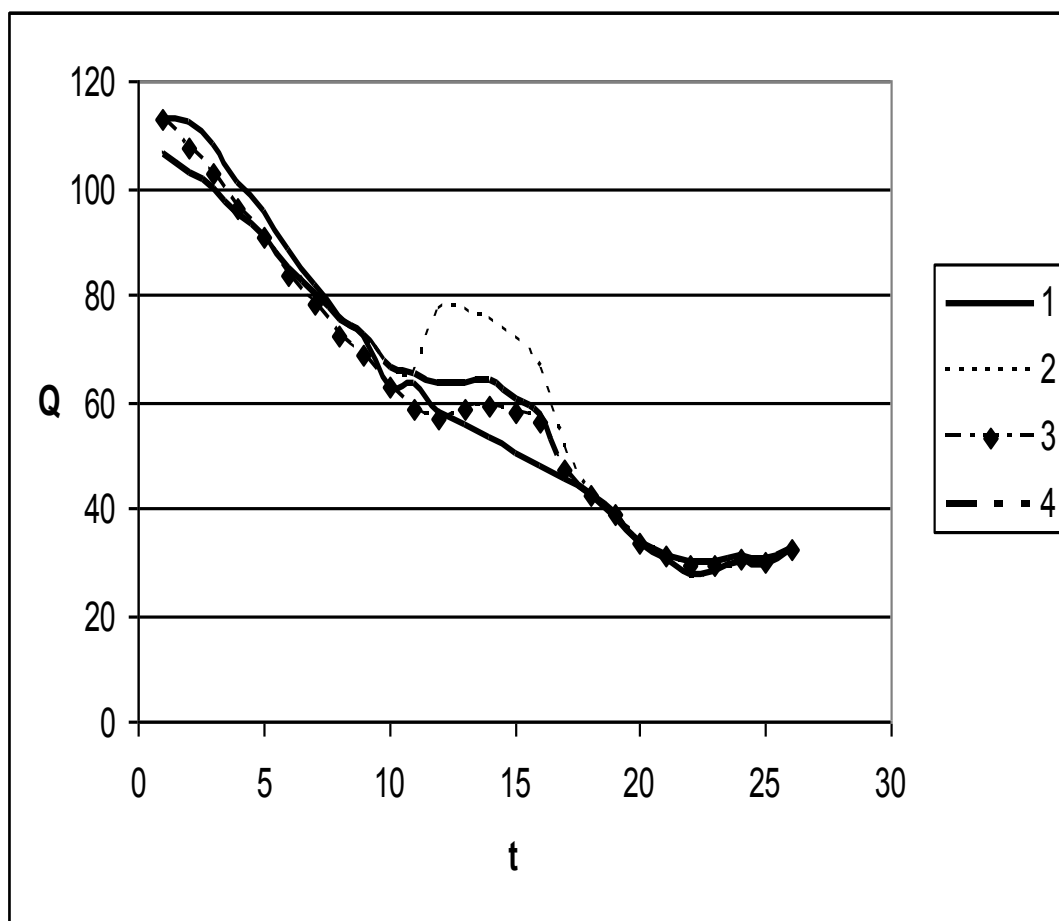


Рис.3.2. Гидрограф р.Ловать – г.Холм в осенне-зимний период, 1968 г.

1 – данные ГЕ; 2 – РГМ; 3 - интерполяция m ; 4- интерполяция Кзим

Применение параметра Великанова (m) при вычислении стока в осенне-зимний период, оказалось более эффективным (рис 3.2).

Расхождение результатов расчета ($Q_{\text{инт.}m}$) с данными ГЕ варьировало в пределах 4,6-14% (среднее 11,96%), и лишь для реки Уза оказалось не допустимым 36%.

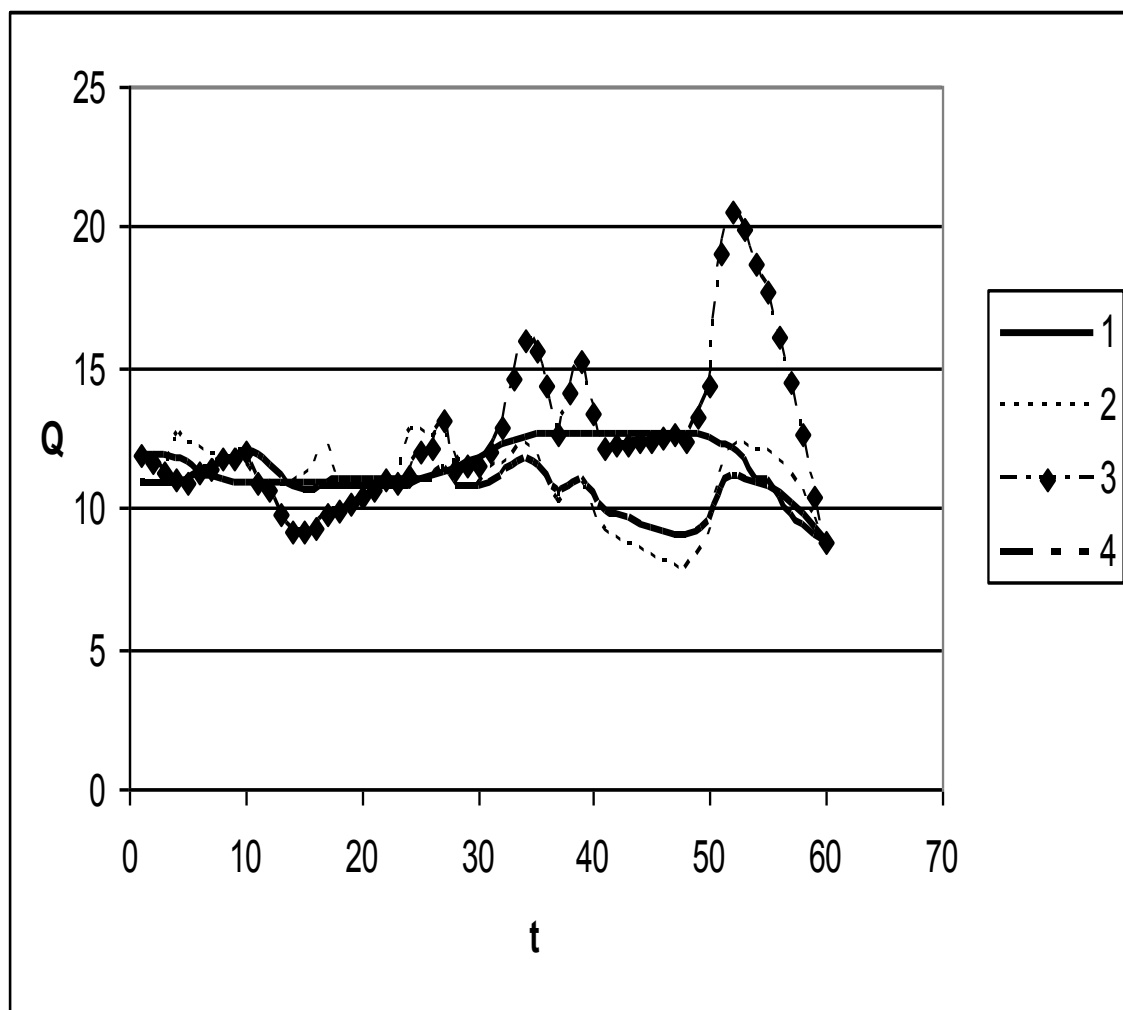


Рис.3.3. Гидрограф р.Селижаровка-д.Яровинка в осенне-зимний период, 1970 г.

1 – данные ГЕ; 2 – РГМ; 3 - интерполяция m ; 4- интерполяция Кзим

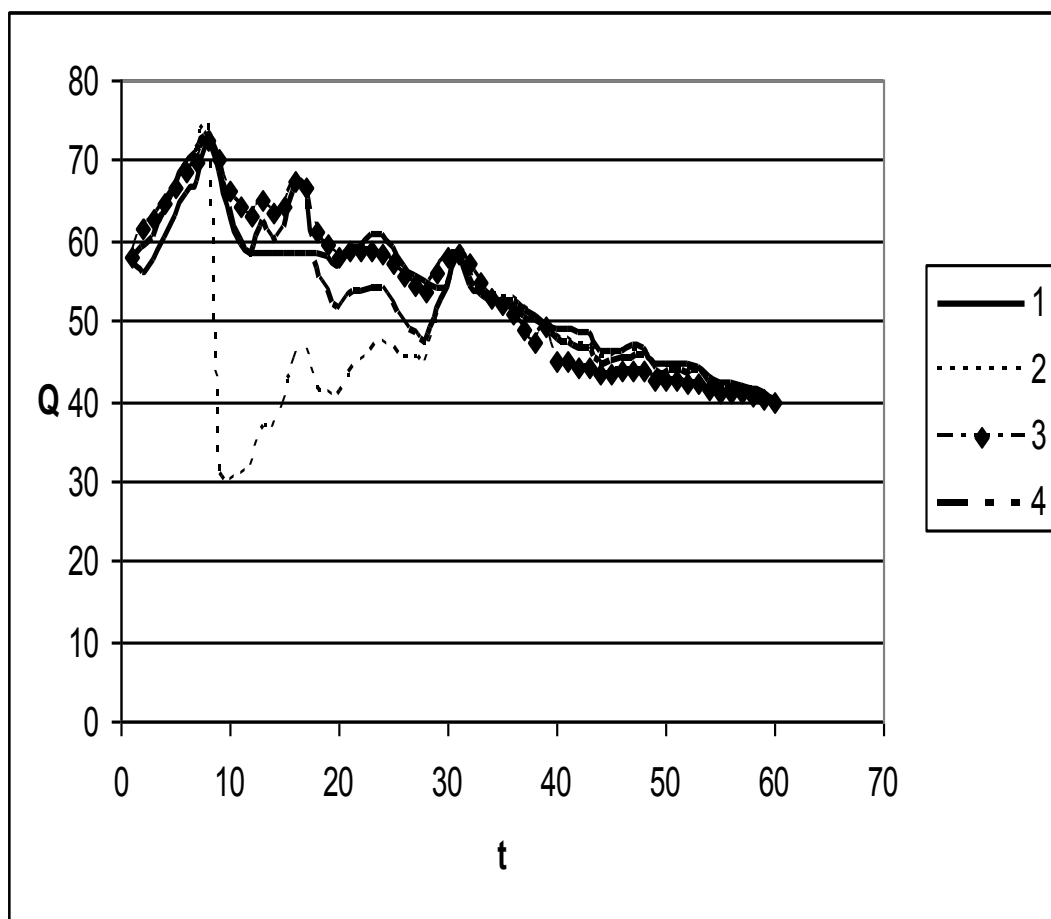


Рис.3.4. Гидрограф р.Ветлуга-п.Ветлужский в осенне-зимний период,
1970 г.

1 – данные ГЕ; 2 – РГМ; 3 - интерполяция m ; 4- интерполяция Кзим

Заключение

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- применяемые на сети методы вычисления стока в осенне-зимний период (переходных коэффициентов), могут давать существенные погрешности при учете стока и мало пригодны для использования в компьютерной технологии вычисления стока, так как сводятся к графическим построениям и во многом опираются на опыт специалиста.
- модель РГМ хоть и более физически обоснована и должна достаточно адекватно описывать изменение гидравлических условий в осенне-зимний период, но надежных результатов для большинства рек по ней получить не удалось. Возможно это произошло из-за изменения гидравлического режима этих рек или неточности исходных данных (в частности толщины льда в период заберегов и начала ледостава и соответственно площади сечения ледяного покрова).
- параметр Великанова позволяет оценить характер изменения гидравлического сопротивления русла в осенне-зимний период.
- вычисление стока на основе интерполяции параметра Великанова дает надежные результаты при нормативном числе измерений расходов воды в переходный период (4-6 расходов в месяц); для повышения точности метода при недостаточном числе измерений необходима дальнейшая его апробация.
- метод, основанный на интерполяции параметра Великанова, следует рекомендовать в качестве наиболее рациональной математической основы для компьютерной технологии вычисления стока в осенне-зимний период.

Литература

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и потам, вып.6, ч. 3 - Л.: Гидрометеиздат, 1978.
2. Карасев И.Ф. Математические модели гидрометрического учета речного стока.- Труды ГГИ, 1978, вып.256, с.3-35.
3. Методические рекомендации по учету стока на реках в зимний и переходные периоды.- Л.: 1980, 50 с.
4. Рязанов В.С. Вычисление стока воды в зимний и переходные периоды. – Метеорология и гидрология, 1980, №7.
5. Конкина Н.Г. К вопросу о квалификации рек СССР по ледовому режиму. – Вестник ЛГУ, 1957, №18, серия геологии и географии, вып.3, с.119-127.
6. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 190 с.
7. Флерова Р.А. Гидрологический анализ результатов наблюдений на речных станциях – Л., Гидрометеиздат, 1951. – 62 с.
8. Панов Б.П. Зимний режим рек СССР. – издательство ЛГУ, 1960. - 239 с.
9. Нежиховский Р.А. Типы замерзания рек и типы зажоров льда. – Метеорология и гидрология, 1974, №2, с.68-74.
10. Бузин В.А.
11. Нежиховский Р.А. Коэффициенты шероховатости нижней поверхности шуголедного покрова.- Труды ГГИ, 1964, вып.110, с.15-35.
12. Давыдов Л.К. Вскрытие рек арктической и субарктической зоны. Л.: Изд. Главсевморпути, Ж. «Проблемы Арктики», №1, 1939.
13. Бурдыкина А.П. Значение механического фактора при вскрытии сибирских рек. Л.: Изд. Главсевморпути, Ж. «Проблемы Арктики», №4, 1946.
14. Быдин Ф.И. Зимний режим рек и методы его изучения. “Исследования рек СССР”, вып.5. Л., Изд. ГГИ, 1933.

15. Великанов М.А. Гидрология суши. М.; Гидрометеоиздат, 1948.
16. Пиотрович В.В. О притоке тепла к нижней поверхности ледяного покрова рек. Л.: Гидрометеоиздат, Тр. ЦИП, вып.2, 1947
17. Левин А.Г. Водные ресурсы Колымы. М.: Гидрометеоиздат, 1954.
18. Водные пути бассейна Лены. Под общей редакцией Р.С.Чалова, В.М.Панченко, С.Я.Зернова., М., МИКИС, 1995. – 600 с.
19. Основные гидрологические характеристики.
20. Огиевский А.В. Гидрометрия и производство гидрометрических работ. – М., Л.: ОГИЗ, 1937. – 342 с.
21. Ковалев Л.М. Расчеты зимнего стока рек с ледяным покровом. - М., Л.: Гидроэнергоиздат, 1950. – 104 с.
22. Румянцев В.А., Зорин М.В. Некоторые особенности применения аппарата множественной линейной регрессии при построении нелинейных моделей. – В кн. Труды IV Всесоюзн. гидролог. Съезда. Т.7. Л.: Гидрометеоиздат, 1976, с.30-40.
23. Пиотрович В.В. Аминева В.Я. Расчет толщины ледяного покрова на реках и водохранилищах для целей прогноза ледовых явлений. - В кн. Труды IV Всесоюзн. гидролог. Съезда. Т.7. Л.: Гидрометеоиздат, 1976, с.288-295.
24. Великанов М.А. Динамика русловых потоков - М.: Гидрометеоиздат, 1955.