



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

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **Современные методы**
учета стока

Исполнитель **Бочкарев Сергей Алексеевич**
(фамилия, имя, отчество)

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

Векшина Татьяна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«02» июня 2025г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

1. Физико-географическое описание	3
2. Гидрометрический учет стока	14
2.1 Характеристики гидрометрического учета стока.....	14
2.2 Задача учета стока	15
2.3 Построение и анализ комплексного графика.....	17
2.4 Аппроксимация зависимости расходов воды	18
2.5 Проверка исходных данных.....	22
2.6 Экстраполяция расходов воды	24
2.7. Однозначность зависимости расходов воды.....	27
3. Учет стока при однозначных зависимостях расходов	28
3.1 Годовая зависимость расходов воды	28
3.2 Многолетняя зависимость расходов воды	29
4. Анализ результатов расчетов.....	32
Заключение	38

Введение

Одной из ключевых задач в изучении гидрологического режима природных водных потоков является учет стока воды в них.

Современные методы учета стока включают в себя гидрометрические, гидравлические и организационные подходы. Учет стока представляет собой восстановление ежедневных расходов воды по измеренным расходам, которые проводятся несколько раз в месяц, и среднесуточным уровням.

Гидравлические методы используют уравнения гидравлики для расчета расхода воды, а организационные методы включают в себя установку приборов учета и организацию системы контроля.

Целью работы является учет стока при свободном русле современными методами. Для верификации полученных результатов расчета необходимо провести сравнение полученных расходов с ежедневными расходами, опубликованными в гидрологическом ежегоднике. Объектом исследования взята река Луга.

В качестве исходного материала в работе использовались данные наблюдений гидрологического ежегодника по посту Толмачево за 1972 год.

1. Физико-географическое описание

Рассматриваемый объект в работе – река Луга, находящаяся в Ленинградской области. Этот регион располагается на северо-западе Российской Федерации. По численности населения он находится на 2 месте среди всех регионов страны. По площади территории данный объект находится на 39 месте и занимает 0,49% от всей страны.

Столицей области является Гатчина, которая является местом нахождения высших органов региональной государственной власти.

«Границы объекта проходят через несколько регионов Российской Федерации, а также с некоторыми Европейскими странами:

на севере – с Республикой Карелия;

на востоке – с Вологодской областью» [1];

на юге – с Псковской областью.

Иностранные государства, с которыми граничит исследуемый объект:

Финляндия – граница проходит по северо-западу региона;

Эстония – граница проходит в юго-западной части региона.

На рисунке 1 представлена физическая карта Ленинградской области с указанными выше границами.



Рисунок 1.1 – Карта Ленинградской области

Общие сведения р. Луга

Бассейн реки Луга окружен бассейнами таких рек, как Нарва и Нева. По большей части в него входят мелкие реки. Общая доля их составляет более 90% среди всех рек, находящихся в нем. «Наиболее крупными реками являются р. Луга (длина 353 км) и р. Оредеж (длина 192 км)» [1].

По данным Невско-Ладожского Бассейнового водного управления, водосборы бассейна реки Луга составляет примерно 16800 км², имея вытянутую форму. Он расположен на территории несколько регионов страны: Псковская и Новгородская области, а также город Санкт-Петербург.

Как показано на рисунке 1.2, большая часть водосборов реки Луга и рек южного берега российской части Финского залива не превышает 25-50 метров. На северо-востоке территории находится Ижорская возвышенность, которая имеет высоту от 125 до 150 метров.

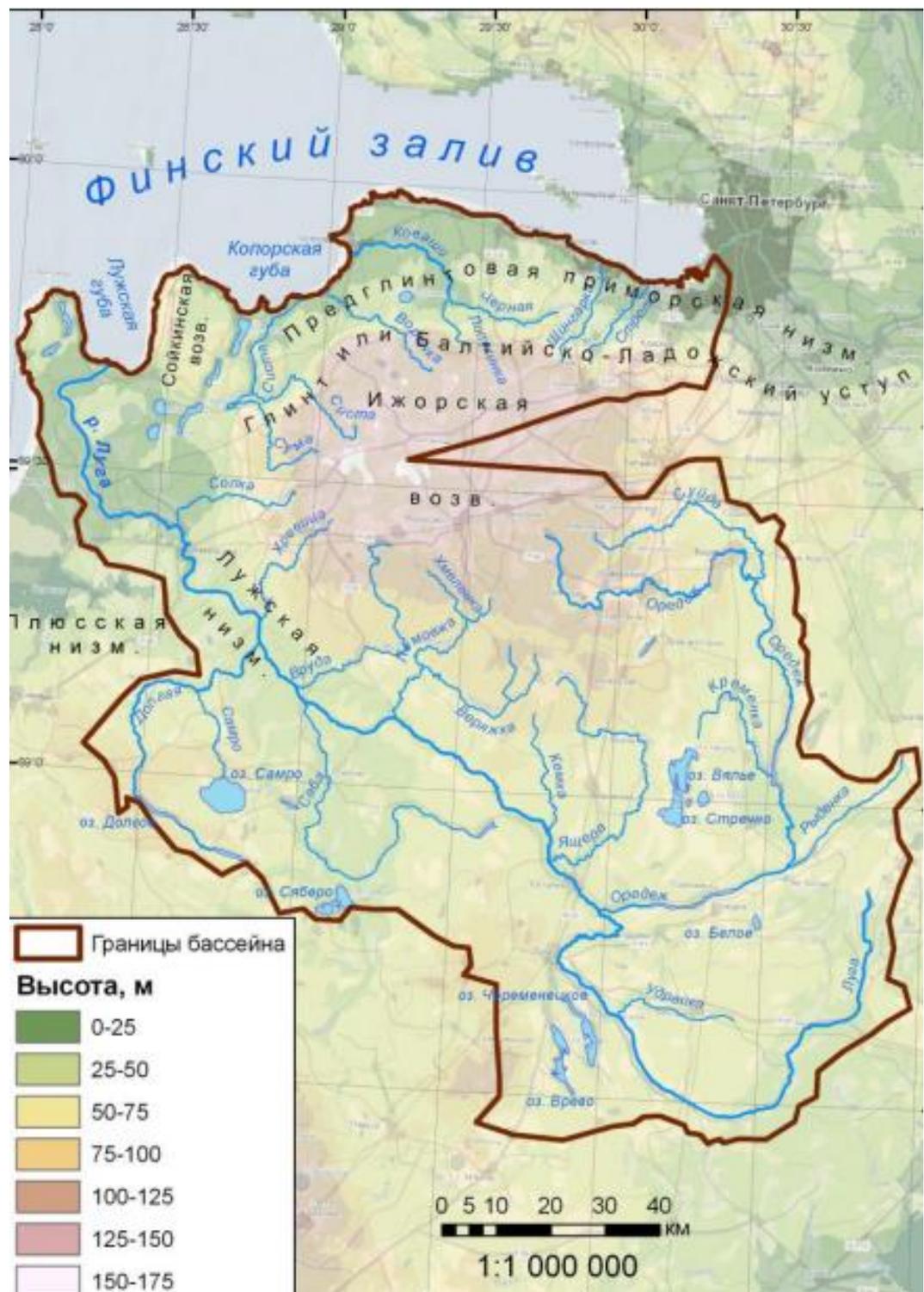


Рисунок 1.2 – Водосборы реки Луги и рек южного берега российской части Финского залива

Реки бассейна реки Луга, протекают через такие районы Ленинградской области, как Ломоносовский, Гатчинский, Лужский, Волосовский,

Кингисеппский, Сланцевский, а также через Батецкий район Новгородской области (рисунок 1.3).

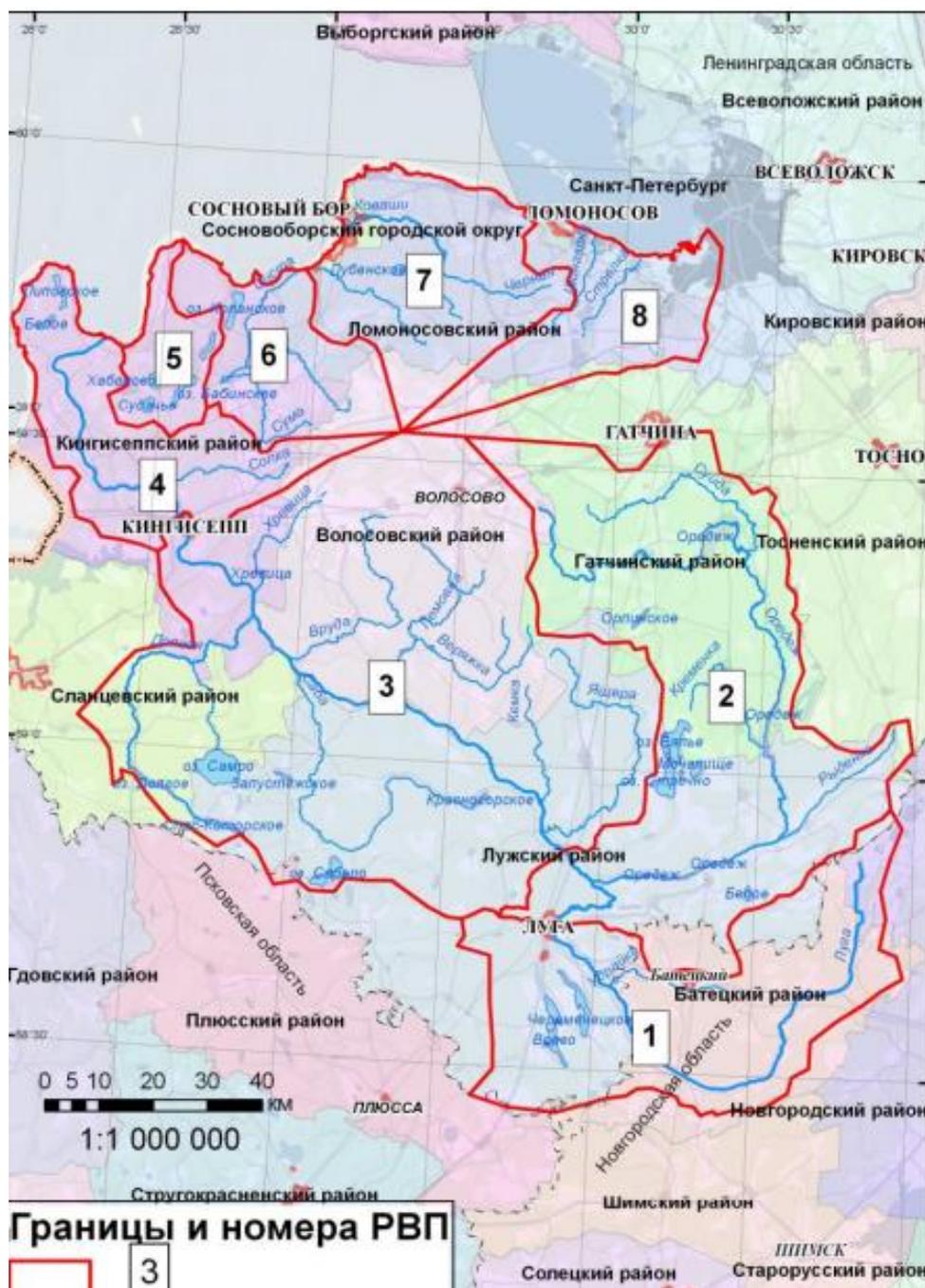


Рисунок 1.3 – Административное деление водосборов реки Луги и Финского залива

Рельеф Ленинградской области

На большей части региона находятся равнинные ландшафты с небольшими высотами. Также можно выделить Карельский перешеек, так как

он отличается более сложным рельефом, в этом районе имеется большое количество скал.

Среди наиболее значимых возвышенностей можно выделить Лемболовскую, Ижорскую, Лодейнопольскую возвышенности. Они произошли от древнего берега моря.

Участки с низкими высотами располагаются у берегов Финского залива и Ладожского озера, а также около крупных рек. Среди них можно выделить Выборгскую, Приозерскую, Приладожскую низменности.

На большей части области, высоты находятся в пределах от 0 до 100 метров. В восточной и юго-восточной частях находятся Тихвинская гряда и Ижорская возвышенность, имеющие высоту от 100 до 200 метров (рисунок 1.4).

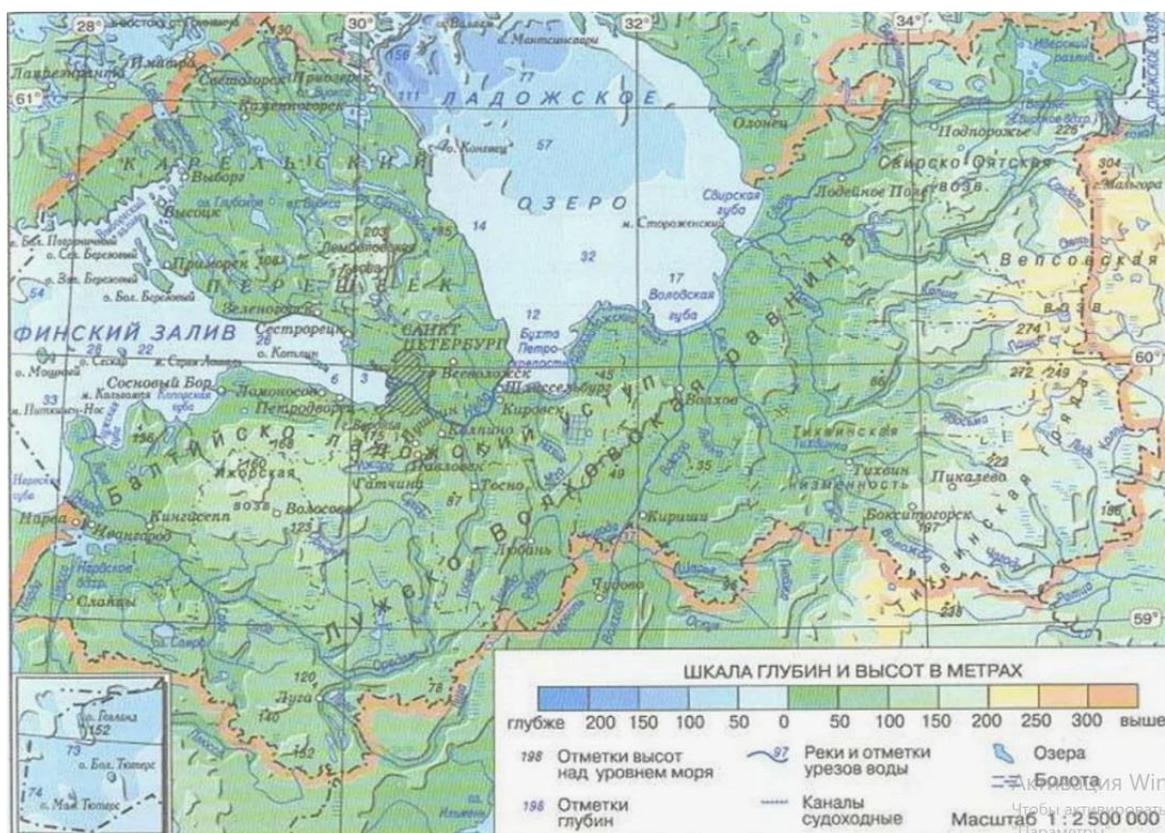


Рисунок 1.4 – Рельеф Ленинградской области

Геологическое строение и полезные ископаемые

На рисунке 1.5 указана геологическая карта, в которой указано, что большая часть геологических образований севера области относится к протерозойской группе, а именно, к котлинскому горизонту. Юг региона более

разнообразен, здесь распространены отложения палеозойской группы: девонского, ордовикского и кембрийского возрастов. Наибольшее распространение имеют Лонтоваская свита, Наровский горизонт, Хревицкий и Кегельский горизонты.

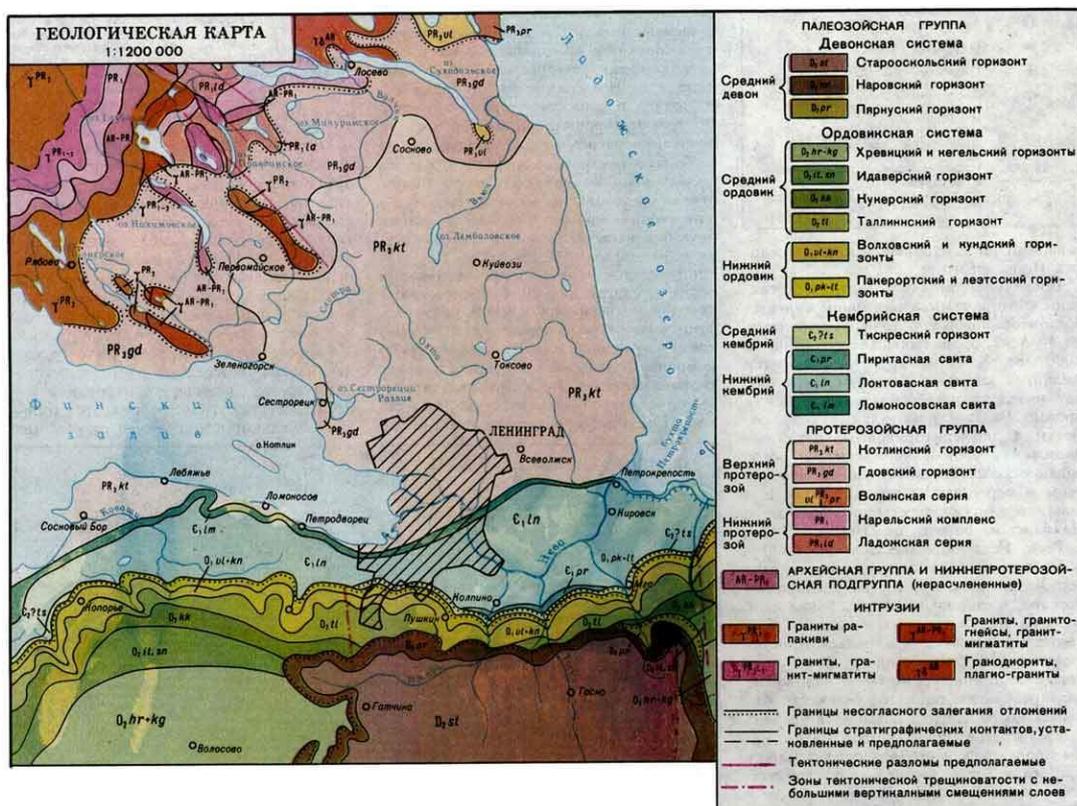


Рисунок 1.5 – Геологическое строение Ленинградской области

Если рассматривать геологическое строение региона с точки зрения наиболее распространенных горных пород на рисунке 1.6, то можно отметить преобладание интрузивных и метаморфических комплексов (граниты, гнейсы) в северной части региона, и широкое распространение пород осадочного чехла (глины, пески, известняки) в южной части.

Речная сеть

На территории бассейна реки Луга, протекает более 100 рек длиной более 10 км и свыше 4 000 коротких водотоков протяжённостью менее 10 км каждая. На рисунке 1.8, выделены такие реки, как Оредеж, Ящера, Вруда, Саба, Долгая и Лемовжа – они являются крупнейшими в Лужском бассейне.



Рисунок 1.8 – Речная сеть бассейна реки Луга

Почва

Так как рельеф, микроклимат, породы и флора в области имеют свое разнообразие, почва представляет собой весьма яркую картину. Одни из самых распространенных почв, находящихся в рассматриваемом бассейне, являются аллювиальные, дерново-карбонатные и дерново-подзолистые. Расположение этих почв представлено на рисунке 1.9.

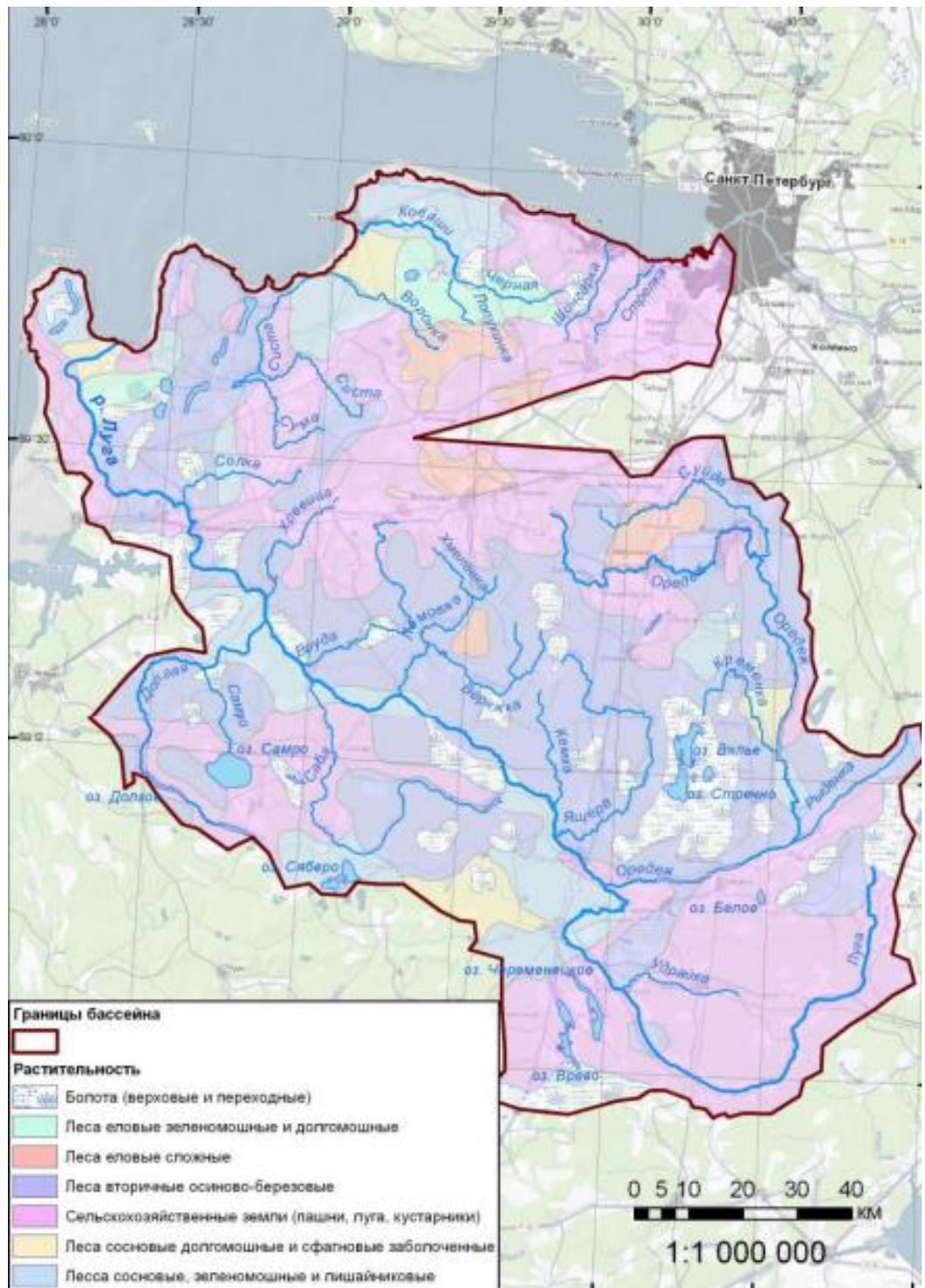


Рисунок 1.11 – Флора бассейнов реки Луги и Финского залива

2. Гидрометрический учет стока

2.1 Характеристики гидрометрического учета стока

Под стоком понимается объём жидкости, который за определённый временной период стекает с конкретного участка земной поверхности. При подготовке таблиц Водного кадастра необходимо рассчитать и представить следующие параметры водного стока:

- краткосрочные значения расходов воды
- усреднённые показатели расхода
- суточные средние величины
- декадные средние расходы воды
- месячные средние расходы
- годовой средний расход

Для вышеописанных временных промежутков, а также для периода, когда русло находится в естественном углублении и в зимнее время года, определяются экстремумы значений расходов воды. Величинами измерений являются литры в секунду или кубические метры в секунду.

Расчет стока воды проводится двумя способами:

- а) режимный учёт - необходим для анализа гидрологических свойств рек;
- б) оперативный учёт - используется при текущем контроле и прогнозировании состояния водных объектов для народного хозяйства.

В обоих случаях, описанных выше, расчёты основаны на гидрометрических данных (показатели уровня и расхода воды), но методы обработки этих данных различаются.

Режимные параметры перемещения воды рассчитываются по окончании года, по данным уровней и расходов воды, определяющим гидрологические характеристики реки за весь год. А с помощью данных о способности пропуска

количества воды в русле, когда проводятся измерения, можно восстановить эти параметры между замерами, то есть восполнить их отсутствие.

Оперативный контроль проводится при неопределённости, так как требует экстраполяции характеристик способности пропуска количества воды русла между параметрами по датам и текущим временем.

Основной расчетной величиной в гидрометрическом учёте является расход, который связан со значениями уровней вод. Прежде всего, каждому среднесуточному уровню воды относится в соответствии свой расход. Однако при резких колебаниях уровня воды в течение дня расход рассчитывается как среднее значение по расходам, соответствующим измерениям уровня воды. Такой метод обязателен при расчётах перемещения воды с водосборов малой площадью и на реках с суточным изменением уровня, где возможны быстро формирующиеся паводки. Для точного контроля перемещения вод на данных участках необходимо оснащение гидропостов, обеспечивающими многократные измерения уровня.

Связь между уровнями и расходами воды может быть однозначной или многозначной в зависимости от морфологических особенностей реки и гидрологических условий. Поэтому одинаковые уровни воды могут соответствовать разным значениям расходов.

По данным ежедневных расходов воды рассчитываются усреднённые значения расходов воды по периодам. За каждый день фиксируются минимальные и максимальные расходы, на основании которых выявляются экстремумы за месяц, а также указываются даты их фиксирования.

2.2 Задача учета стока

Задачей режимного контроля речных вод является определение краткосрочных и суточных значений расходов воды на основе ежедневных данных уровней реки и периодических измерений расхода в течение года.

Режимные параметры стока речных вод рассчитываются по окончании года, по всем данным измерений уровня и расхода воды за год, учитывая данные наблюдений предыдущих лет.

Для режимного контролирования сточных вод, первым приближением для расхода при заданном уровне вод считается значение, полученное по усредненной кривой расходов (зависимости Q от H) для определенного уровня воды. Осреднение проводится по всем значениям уровней, полученных за год, с использованием данных измерений расхода, выполненных в тех случаях, когда русло находится в свободном состоянии русла. Кривая расходов показывает усредненные параметры способности пропуска русла за период.

«В общем случае значение расхода воды на дату (срок) t Q_{pt} , m^3/c , вычисляется по формуле

$$Q_{pt} = Q(H_t)(1 + \tilde{q}_t), \quad (2.1)$$

где $Q(H_t)$ – значение расхода воды по кривой расходов для расчетного уровня H_t , m^3/c ;

\tilde{q}_t – поправка, учета изменения пропускной способности русла на момент расчета t » [3].

Разница между расходами и значениями, полученными по кривой расходов, может быть вызвана такими факторами: ошибки измерений и изменения условий, обусловленные морфологическими факторами. К ним относятся зимние процессы, зарастание или влияние гидротехнических сооружений в русле и другие явления. Количественно оценить совокупное влияние всех факторов на изменение пропускной способности русла является возможным лишь путем совместного решения уравнения неустановившегося движения потока и уравнения деформации русла. На практике же такое решение обычно затруднено недостаточностью необходимых данных. Поэтому изменения пропускной способности русла, обусловленные неучтенными

факторами, в алгоритмах учета стока воды рассматриваются как случайная функция, и ее значения оцениваются статистическими методами.

$$\tilde{q}_и = \frac{Q_и - Q(H_и)}{Q(H_и)}, \quad (2.2)$$

«где $Q_и$ – измеренные расходы воды, м³/с; $Q(H_и)$ – расход воды, полученный по кривой расходов $Q(H)$ для уровня $H_и$, зафиксированного во время измерения расхода воды $Q_и$, м³/с» [3].

2.3 Построение и анализ комплексного графика.

Пропускная способность русла зависит от факторов, которые необходимо учитывать при методике расчета течения воды. Среди них находятся:

- «нестационарное движение воды
- переменный подпор
- неустойчивость русла
- ледяные образования и степень их развития
- зарастание русла» [3]

Для корректного определения метода расчета водного стока важно исследовать необходимые исходные данные за состоянием потока, информацию о факторах, влияющих на его режим на участке гидропоста, а также данные за предыдущие года.

Одним из важных методов анализа является комплексный график гидрометеорологических наблюдений. На него наносятся данные по различным гидрометеорологическим параметрам. Построенный график позволяет выявить взаимосвязь между климатическими и гидрологическими процессами.

При подготовке данных для расчёта количества воды необходимо принять во внимание точность используемых приборов, методики измерений, особенности места гидропоста и конкретные условия каждого замера. Также стоит уделить факторам, способным вызвать погрешности.

Выбор методики расчета требует анализа условий, формирующих уровень на участке. Эти условия зависят от двух причин: естественные явления и антропогенные воздействия. Среди них выделяются такие факторы:

«а) колебания уровней воды в притоках, впадающих ниже гидрометрического створа, или уровней водоприемника (река, озеро, море)

б) временное стеснение реки льдом

в) зарастание русла

г) подпор от плотин, расположенных ниже по течению» [3]

Основываясь на полученном комплексном графике и анализе его элементов, выделяются промежутки времени, характеризующиеся кратковременным подпором, который приводит к повышению уровня. Для таких временных интервалов выполняется корректировка расходов. Для точного определения этих периодов рекомендуется использовать схожие графики с гидрологических постов, находящиеся вблизи от места исследования.

В рамках режимного учета стока воды год разбивается на несколько фаз с разными окружающими факторами движения потоков воды. Для каждой из них применяется свой метод расчета. Границы этих периодов подразделяются по следующим факторам: зарастание русла, свободное русло, периоды подпора.

2.4 Аппроксимация зависимости расходов воды

Гидравлические и геометрические параметры течения в русле определяются от отметки уровня. По этой причине широко применяется связь между расходом воды и уровнем, которая может быть представлена аналитически как $Q = f(H)$ или графически. На практике удобнее использовать обратную зависимость $Q(H)$, поскольку измерения уровней проводятся ежедневно, а в случае применения приборов, самостоятельно фиксирующие значения, это происходит непрерывно. Образец такого прибора представлен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Самописец, фиксирующий значения

В изначальный массив данных должны входить измерения, полученные при русле, в период, когда оно находится свободным. Сюда входят:

- «измеренные расходы воды;
- наблюдаемые при измерениях расходов воды уровни;
- зафиксированные при измерениях площади живого сечения;
- средние скорости в гидростворе во время измерения расходов воды» [3].

Зависимость расходов от уровней воды может быть однозначной или неоднозначной. В большинстве случаев она неоднозначна, и это необходимо учитывать при расчете. Поэтому важно узнать причины неоднозначности связи $Q(H)$, чтобы выбрать наиболее действенные способы учета стока. Однозначная

зависимость встречается редко, обычно в створах с устойчивым руслом. Иногда такая связь сохраняется в течение продолжительного времени.

В графическом виде однозначная связь $Q(H)$ изображается в виде кривой. Однако такой метод устарел и не рекомендуется к применению при современных возможностях математического моделирования.

«При аналитической аппроксимации зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$ производится оценка их значений:

а) среднего квадратического стандарта рассеяния связи (среднее квадратическое значение абсолютных остатков регрессии) σ_p :

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_1^n [Y_{ni} - Y(H_{ni})]^2}{n - k}}, \quad (2.3)$$

где Y_{ni} – измеренная характеристика, для которой подбирается аналитическое уравнение регрессии;

$Y_{ni}(H_{ni})$ – характеристика, вычисленная по уравнению регрессии для наблюдаемого при измерении уровня H_{ni} ;

n – количество измеренных расходов воды;

k – число степеней свободы подбираемого уравнения;

б) выборочного множественного коэффициента корреляции, который определяется как коэффициент между Y_{ni} и $Y_{ni}(H_{ni})$, то есть

$$R = \frac{\sum_1^n (Y_{ni} - \bar{Y}_n) \cdot [Y_{ni}(H_{ni}) - \overline{Y_{ni}(H_{ni})}]}{\{\sum_1^n (Y_{ni} - \bar{Y}_n)^2 \cdot \sum_1^n [Y_{ni}(H_{ni}) - \overline{Y_{ni}(H_{ni})}]^2\}^{1/2}}, \quad (2.4)$$

где $\bar{Y}_n = \frac{\sum_1^n Y_{ni}}{n}$ – среднее значение ряда измеренных характеристик;

$\overline{Y_{ni}(H_{ni})} = \frac{\sum_1^n Y_{ni}(H_{ni})}{n}$ – среднее значение ряда характеристик,

вычисленных по уравнения регрессии для наблюдаемых при измерении уровней H_{ni} ;

в) среднего квадратического значения относительных остатков регрессии $\sigma_{\tilde{q}}$;

г) оценки математического ожидания относительных остатков регрессии $m_{\tilde{q}}$.

Относительные остатки регрессии \tilde{y} вычисляются по формуле» [3]:

$$\tilde{y} = \frac{Y_{ni} - Y(H_{ni})}{Y(H_{ni})}. \quad (2.5)$$

Для зависимости $Q(H)$ относительные остатки регрессии являются относительными отклонениями расходов воды от аппроксимирующей зависимости $Q(H)$, которые определяются по формуле (2.2).

Для аппроксимации связи $Q(H)$ применяются представленные ниже зависимости, из которых выбирается наиболее оптимальная.

«Аппроксимация зависимости $Q(H)$ параболой Глушкова» [3]:

$$Q(H) = a(H - H_0)^b, \quad (2.6)$$

a и b – коэффициенты уравнения регрессии, представленные через параболу Глушкова.

Необходимо учитывать, что этот метод не всегда точно описывает кривую расходов по всему диапазону уровней.

«Аппроксимация методом полиномиальной регрессии:

$$Q = a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_mH^m, \quad (2.7)$$

где a_0, \dots, a_m – параметры уравнения регрессии расходов по уровням воды в форме полинома» [3].

Метод полиномиальной аппроксимации с учётом ограничений в экстремальных точках или кусочно-полиномиальный метод:

В этом случае уравнение принимает следующий вид

$$Q(H) = Q(H_{гр}) + (H - H_{гр})(a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_mH^m), \quad (2.8)$$

«где $H_{гр}$ – уровень воды, для которого задается ограничение на значение аппроксимирующей функции» [3].

Ограничения в полиномиальной аппроксимации определяются как для нижней, так и для верхней границы кривой расходов. При кусочно-полиномиальном методе ограничения задаются между участками кривой, причем для каждого участка может быть подобрано своё выражение.

Самой лучшей считается та приближенная модель, которая характеризуется такими свойствами:

- «среднее значение (оценка математического ожидания) относительных остатков регрессии должно быть близко к нулю» [3], это значит, что свидетельствует об отсутствии систематической ошибки в отклонениях
- «абсолютные и относительные средние квадратические значения остатков регрессии должны быть наименьшими по сравнению с другими алгоритмами аппроксимации» [3]
- «коэффициент корреляции должен быть наибольшим» [3], что говорит о высокой тесноте связи между теоретическими и фактическими данными

2.5 Проверка исходных данных

Построение зависимости $Q(H)$ производится на основе проведенных измерений расходов воды. После определения статистических характеристик этой зависимости, необходим анализ исходных данных для выявления возможных ошибок измерений.

Для чего выбираются точки измеренных расходов, значительно отклоняющиеся от усреднённой кривой. В случае, если максимальное расхождение измеренного значения расхода от расчётной зависимости, не выскакивает из диапазона значений, соответствующих вероятности

непревышения $P = 90 \%$, то такие отклонения являются допустимыми. Если максимальное отклонение значения измеренного расхода воды от рассчитанной зависимости находится в границах диапазона значений разброса значений с вероятностью непревышения $P = 90$,

$$\frac{Q_{и} - Q(H_{и})}{Q(H_{и})} \leq 2\sigma_{q}, \quad (2.9)$$

то такие данные можно использовать при построении годовой зависимости расхода от уровня. Если эти условия не соблюдаются, необходимо «установить причину значительного отклонения» [3], связано ли оно с расчетами по методике измерений или определено реальными изменениями условий потока в гидростворе.

Для определения возможных ошибок рекомендуется:

- Произвести проверку оценки корректности расчетов «средних скоростей течения и глубин потока» [3];
- проверить, что значения уровня воды, зафиксированного в день измерения расхода, соответствуют данным из таблицы ежедневных уровней воды;
- сравнить информацию по реке в момент измерения с аналогичной информации из ежедневных уровней воды.

Следует уделить внимание учету расхода воды: был ли рассмотрен весь сток, включая пойменный и проточный.

Причиной значительного отклонения может быть неточность измерения уровня. Поэтому при анализе проверяют корректность отметок нулей измерительных устройств и даты их корректировки. При необходимости данные подвергаются изменению.

Кроме того, проводится сравнение уровней воды на гидропосту и на соседних станциях, находящихся поблизости. Для этого используются «хронологические графики, на которые наносятся уровни» [3], зафиксированные во время измерений расхода. Несоответствия между

графиками на разных станциях могут указывать на серьезные ошибки в наблюдениях. При выявлении таких ошибок необходимо проведение дополнительной проверки всех данных.

После установления причин возникновения погрешностей измерений уровней, проводится корректировка исходных данных. При этом могут быть использованы связи соответствующих уровней, определенные на соседних постах. Корректировке подлежат данные с отклонением от осреднённой зависимости, выходящим за пределы «доверительного интервала»:

$$\Delta H_{и} > 2\sigma_{и}, \quad (2.10)$$

где $\Delta H_{и}$ – отклонение измеренного уровня воды от осредненной связи соответственных уровней воды, м;

$\sigma_{и}$ – стандарт рассеяния связи соответственных уровней воды» [3].

Критерий (2.10) может применяться только в случае отсутствия влияния ошибки со стороны временных факторов на режим уровней воды на соседних гидрологических постах.

По итогам проведённого анализа и проверки данных, те значения расхода, которые не соответствуют условию (1.9), следует отбросить, так как они содержат недопустимые погрешности.

После завершения проверки статистических погрешностей, связь корректируется с использованием ранее выбранного метода аппроксимации, но уже используя отредактированные исходные данные.

2.6 Экстраполяция расходов воды

В некоторых случаях нельзя выполнить измерения расхода воды, в частности в условиях больших значений уровня. Проведения замеров расходов затрудняются из-за ограниченных технических возможностей и кратковременности явлений.

Зависимость между уровнем и расходом воды надежна тогда, когда если она построена на основе данных, охватывающих не менее 80 % диапазона колебаний уровня. Если же часть диапазона не покрыта замерами, то для этих условий нужно выполнять экстраполяцию зависимости $Q(H)$. При этом недопустимо применение аппроксимирующего уравнения за пределами измеренного диапазона уровней.

Экстраполяция расходов должна строиться на установленных геометрических и морфологических параметрах русла и прилегающих территорий в районе гидрометрического створа. Для этого проводится нивелировка морфоствора до отметок самых высоких наблюдавшихся уровней воды. На основании полученных данных строится поперечный профиль русла, по которому рассчитываются параметры.

При проведении экстраполяции «рекомендуется использовать два типа гидравлических моделей:

- Формулы, применимые к квазиравномерному движению водного потока
- Уравнения, представляющие собой интегральные решения уравнений Знеустановившегося движения, например, уравнений Сен-Венана

Для решения первого примера применяется формула Шези

$$Q = \omega C \sqrt{RI}, \quad (2.11)$$

$$V = C \sqrt{RI}, \quad (2.12)$$

где C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус, равный средней глубине h для речных русел;

I – уклон водной поверхности» [3].

Также, коэффициент Шези используется как относительная ширина русла, рассчитываемая как

$$\bar{b} = \frac{B}{h}, \quad (2.13)$$

Помимо уравнения Сен-Венана, критериям «естественных паводков и половодий» [3] осуществляют простые модели, основанные на представлении о кинематических волнах, одном из видов неустановившегося движения жидкости при значительном влиянии сил трения. В случаях, когда отсутствуют данные об уклонах водной поверхности, следует применять следующую формулу

$$Q_3 = Q_i (\omega_3 / \omega_i)^{m_i}, \quad (2.14)$$

«где Q_3 – расход в любой фазе водного режима за пределами диапазона измерений, который следует определить, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_i – расход воды, вычисленный по УР $Q(H)$ в пределах диапазона измерений, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω_i – площадь живого сечения потока, соответствующая Q_i и рассчитанная на основе поперечного профиля гидроствора или по уравнению зависимости $\omega(H)$, м^2 ;

ω_3 – площадь живого сечения, соответствующая Q_3 , м^2 .

Параметр m_i вычисляется по формуле

$$m_i = \frac{\lg Q_i - \lg Q_{i-1}}{\lg \omega_i - \lg \omega_{i-1}}, \quad (2.15)$$

где Q_i и Q_{i-1} – смежные во времени на фазе подъема в верхнем диапазоне уровней или фазе спада в нижнем диапазоне уровней значения расходов воды, но не измеренные, а вычисленные по уравнению регрессии для значений уровней воды, наблюдавшихся при измерении, $\text{м}^3/\text{с}$;

ω_i и ω_{i-1} – соответствующие расходам Q_i и Q_{i-1} значения площадей живого сечения, полученные по зависимости $\omega(H)$, м^2 » [3].

2.7. Однозначность зависимости расходов воды

Как правило, кривая расходов или уравнение регрессии, связывающее уровень воды с расходом, показывает усредненные «характеристики пропускной способности русла» [3] за период. При этом такую зависимость нельзя назвать однозначной. Отклонения фактических измерений расхода воды от значений, рассчитанных по аппроксимирующей кривой, говорят о влиянии различных факторов, не учтённых в модели, но возможно связанных с изменениями гидравлической способности речного русла.

«Для оценки степени однозначности $Q(H)$ применяется критериальное соотношение, основанное на сравнении относительного среднеквадратического рассеяния зависимости и случайной погрешности измерений расхода воды» [3].

Одним из рекомендуемых методов анализа является критерий Фишера - отношение дисперсии и среднеквадратического значения должно быть меньше или равно «критическому значению распределения Фишера при заданном уровне значимости (5 %) и соответствующем числе измерений» [3]. Формула, по которой рассчитывается критерий Фишера представлен ниже

$$F = \frac{D_{\bar{q}}}{\sigma_{\bar{q}}^2} \leq F_{кр}, \quad (2.16)$$

Таблица 2.1 – «Критические значения распределения Фишера $F_{кр}$, $\alpha = 0,05$ » [3]

n-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{кр}$	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	2,01	1,94	1,88	1,83

Продолжение таблицы 2.1 «Критические значения распределения Фишера $F_{кр}$, $\alpha = 0,05$ » [3]

n-1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{кр}$	1,75	1,64	1,57	1,52	1,46	1,40	1,35	1,24	1,21	1,17

3. Учет стока при однозначных зависимостях расходов

3.1 Годовая зависимость расходов воды

Зависимость $Q(H)$ может соблюдаться не по всему году, а только при некоторых условиях. В течение года однозначность связи $Q(H)$ нарушается при наличии зарастания, а также при наличии ледовых явлений.

Данные о расходах, полученные в течение прошедшего года используются для нахождения годового аппроксимирующего уравнения регрессии. Если при определённом уровне начинает функционировать пойма, и в этих зонах были выполнены измерения, то в общей сложности включают суммарное значение расхода, рассчитанное сложением измеренных значений. При условиях, когда нельзя подобрать подходящее уравнение для $Q(H)$, зависимости строятся по гидравлическим расчётам.

Для анализа степени однозначности связи $Q(H)$ применяются дисперсии относительных отклонений и погрешностей измерения. Проверка проводится с использованием критерия Фишера. Если полученное значение не выходит за пределы значений из таблицы 2.1 и в ходе анализа не найдено отклонений, такая зависимость считается однозначной.

Аппроксимация связи $Q(H)$ изначально строится на основе всех имеющихся данных измеренных расходов, полученных при свободном русле. После анализа рассеивания $Q(H)$ проводится проверка исходной информации на наличие ошибок исходя из методики. После проведения этих действий, зависимость становится уже на отредактированной.

Если измерения охватили всю амплитуду колебаний уровня воды, полученное уравнение регрессии применяется для расчёта ежедневных расходов воды. В противном случае производится экстраполяция зависимости за границы имеющегося интервала.

При годовой аппроксимации уравнения регрессии, помимо основных данных по измеренным расходам, учитываются также сведения о погрешностях

измерений в различных фазах водной системы. Если начинают действовать пойменные участки, то в исходных данных учитываются суммарные значения расходов.

Для того, чтобы решить, применима ли полученная зависимость $Q(H)$, следует согласовать зависимости расхода, площади живого сечения и скорости потока от уровня воды. Скорости течения вне этого промежутка определяются методами экстраполяции. «Увязка зависимостей расхода воды и его элементов от уровня воды осуществляется по формуле» [3]

$$Q_y(H_i) = \omega(H_i) \cdot V(H_i). \quad (3.1)$$

Если вся амплитуда колебаний уровня воды была охвачена, то значения ежедневных расходов воды определяются на прямую по уравнению зависимости $Q(H)$, в которое подставляются соответствующие значения уровней воды.

3.2 Многолетняя зависимость расходов воды

Зависимость между уровнем воды и расходом $Q(H)$ может сохранять неизменный характер на протяжении нескольких лет. Такая многолетняя связь может считаться достоверной, если она базируется на основе данных измеренных расходов воды за не менее чем три года наблюдений. Для поста с более длительными наблюдениями предпочтительней использовать исходные данные за последние 10 лет. Значения, не входящие в этот период, применяются только в том случае, если они охватывают высокие паводки.

«В аппроксимацию многолетней связи $Q(H)$ » [3] входят те расходы воды, которые были получены без ледовых явлений, и других внешних факторов.

«Многолетняя однозначная зависимость расходов от уровней воды может считаться установленной, если:

а) обоснована 50-60 инструментальными измерениями расходов воды, в течение не менее трех лет в периоды свободного состояния русла;

б) ее экстраполяция не превышает вверх 15 %, вниз 5 % от полной амплитуды уровней за прошлые годы;

в) установлена ее однозначность в соответствии с критерием Фишера;

г) точки измеренных расходов воды в пределах полосы рассеяния не образуют хронологически обособленных групп, обусловленных, например, прохождением паводочных волн или однонаправленных деформаций русла.

При оценке однозначности многолетней связи $Q(H)$ выделяют, как минимум, две фазы водного режима потока, для которых вычисляют дисперсию относительных отклонений \tilde{q} :

- меженную, характеризующуюся малыми скоростями потока ($V < 0,5$ м/с);

- фазу средней водности; - фазу повышенной водности ($V > 0,5$ м/с)» [3].

Если выход воды на пойму связан с увеличением ошибки измерений, выделяется дополнительная фаза - повышенная водность. Для каждой из этих фаз определяются свои значения погрешностей измерений и «дисперсии относительных отклонений» [3]. Устойчивость многолетней зависимости подтверждается, если критерий Фишера выполняется для всех фаз.

Проверка исходных данных зависимостей $Q(H)$, $\omega(H)$ и $V(H)$ при построении многолетней кривой аналогичны тем, которые используются при формировании годовой зависимости.

Если на участке присутствует пойма, то на многолетней кривой должны присутствовать расходы воды, полученные «во всех русловых и прирусловых образованиях» [3].

«Для обоснования устойчивой многолетней связи» [3] стоит использовать те измерения, которые были выполнены с помощью приборов, прошедшие разные проверки.

При имеющийся многолетней зависимости ежедневные расходы воды рассчитываются по уравнению регрессии, в которое подставляются среднесуточные уровни.

Для постоянного контроля устойчивости многолетней зависимости должны проводиться «ежегодные замеры расхода воды в разных фазах гидрологического режима. После каждого контрольного измерения расхода воды вычисляется относительное значение его отклонения от УРМ – δQ » [3].

$$\delta Q = \frac{Q_{и} - Q_{УРМ}}{Q_{УРМ}} . \quad (3.2)$$

Уравнение регрессии, которые учитывают многолетние данные, можно применять в расчетах, «если относительное отклонение δQ остается в пределах доверительного интервала среднеквадратического значения рассеяния многолетней связи $Q(H)$ для соответствующей фазы режима, а именно: с доверительной вероятностью 90 %» [3] выполняется следующее условие

$$\delta Q \leq 2\sigma_{УРМ} \quad (3.3)$$

Также стоит учитывать такие факторы:

1) Случаи несоблюдения выражения (3.3), на это указывает несоответствие многолетней зависимости. В таком случае производятся новые измерения, а учет стока за очередной год осуществляется на основе предыдущей годовой зависимости.

2) Все отклонения δQ , положительные и отрицательные, отклонения встречаются примерно одинаково часто. Это говорит о надёжности многолетней зависимости, и расчет стока ведётся по уравнению регрессии по многолетним данным.

4. Анализ результатов расчетов

Для проверки целесообразности применения современных методов в данной работе были рассчитаны параметры Великанова для вычисления стока за годовой период.

Для этого был выбран пост Толмачево на реке Луга. Были взяты такие характеристики, как: измеренные и ежедневные расходы, среднесуточные уровни, площадь живого сечения, скорость течения, ширина и глубина реки из гидрологического ежегодника за 1972 год.

В таблице 4.1 представлены ежедневные расходы воды, которые были взяты из гидрологического ежегодника бассейна Балтийского моря за 1972 год

Таблица 4.1 Ежедневные расходы воды на п. Толмачево – р. Луга за 1972 год

Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	15	11	12	30,7	102	30	11,8	7,8	7,47	10,9	12,4	13,3
2	15	11	12	32,4	93	29	11,6	7,8	7,33	11,5	12,9	13,3
3	15	11	12	34,5	84	29	11,4	7,65	7,33	11,8	12,7	13,5
4	14	11	11	41,3	75	28	11	7,75	7,19	12,3	12,4	13,8
5	14	11	11	39,9	68	27	10,9	7,9	7,28	12,4	12,7	14
6	14	11	11	37,7	64	26	10,7	7,75	7,42	12,4	12,4	14,2
7	13	11	12	36	60	25	10,4	7,6	7,71	12,4	12,4	14
8	13	11	11	35,4	59	25	10,1	7,6	7,71	12,2	12,7	14
9	13	11	11	35,2	58	24	9,8	7,33	8	12	12,4	14,2
10	13	11	11	36	56	22	9,44	7,33	7,71	12	12,4	14,2
11	13	11	11	38	55	21	9,44	7,75	7,71	12	12,4	14,4
12	13	11	11	40,6	53	20	9,44	7,85	7,81	11,6	12,4	14,6
13	12	11	11	43,6	52	19	9,29	7,7	7,95	11,6	12,9	14,9
14	12	11	11	50,7	51	18	9,29	7,56	7,95	11,6	13,3	15,1
15	12	11	11	79,6	50	17	9,14	7,7	8,05	11,8	13,3	15,5
16	12	11	12	116	49	16	9,29	7,7	7,9	11,6	13,1	16
17	12	11	12	138	49	15	9,29	7,7	7,85	11,6	13,3	16
18	11	11	13	161	47	15	9,58	7,56	8,3	11,4	13,3	16,4
19	11	11	13	182	46	14	9,71	7,56	8,4	11,4	13,3	16,6
20	11	11	14	195	45	14	9,71	7,56	8,5	11,2	13,3	16,4
21	11	11	15	200	43	13	9,42	7,52	8,5	11,2	13,6	16,6

Продолжение таблицы 4.1 Ежедневные расходы воды на п.Толмачево –
р.Луга за 1972 год

Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16	12	11	12	116	49	16	9,29	7,7	7,9	11,6	13,1	16
17	12	11	12	138	49	15	9,29	7,7	7,85	11,6	13,3	16
18	11	11	13	161	47	15	9,58	7,56	8,3	11,4	13,3	16,4
19	11	11	13	182	46	14	9,71	7,56	8,4	11,4	13,3	16,6
20	11	11	14	195	45	14	9,71	7,56	8,5	11,2	13,3	16,4
21	11	11	15	200	43	13	9,42	7,52	8,5	11,2	13,6	16,6
22	11	11	16	196	42	12	9,42	7,52	8,6	11	14	16,4
23	11	11	17	188	41	12	9,42	7,38	8,6	11,2	14	16,4
24	11	11	18	176	39	12	9,18	7,24	8,87	11,6	13,8	16,4
25	11	11	19	165	38	12	8,88	7,24	9,15	11,6	13,8	16
26	11	11	20	154	37	12	8,73	7,24	9,26	11,6	13,5	15,5
27	11	12	21	142	35	12	8,58	7,24	9,36	12	13,4	15,1
28	11	12	22	132	34	12	8,58	7,38	9,83	12,4	13,4	14,7
29	11	12	24	121	33	12	8,44	7,47	10,7	12,4	13,4	14,2
30	11		27	112	32	12	8,4	7,47	10,6	12,2	13,3	13,8
31	11		29		31		8,1	7,47		12,2		13,4

В 4.2 представлены исходные характеристики, а также рассчитанные по формуле (4.1) параметры Великанова.

Таблица 4.2 Измеренные характеристики и рассчитанные параметры
Великанова на п. Толмачева – р.Луга за 1972 год

Дата	Расход	Уровень воды, в см	Площадь живого сечения	Скорость течения	Ширина реки	Глубина	Параметр Великанова
2.1	74,4	60	64,7	0,29	47	1,06	0,93
12.1	53,4	54	53,4	0,29	41	1,11	0,84
23.1	16,5	54	52,6	0,26	45	0,96	0,28
2.2	17,6	58	53,7	0,26	39	1,02	0,26
11.2	18,7	59	54,5	0,28	39,5	1,07	0,28
22.2	11,7	44	56	0,28	40,2	11,1	0,17
2.3	21,9	66	54,1	0,28	40,8	1,14	0,34
11.3	26,9	69	55,7	0,28	41,7	1,21	0,40
22.3	26,2	96	69	0,28	42,6	1,27	0,28
11.4	40,6	129	67,5	0,33	45,4	1,47	0,46

Продолжение таблицы 4.2 Измеренные характеристики и рассчитанные параметры Великанова на п. Толмачево – р. Луга за 1972 год

Дата	Расход	Уровень воды, в см	Площадь живого сечения	Скорость течения	Ширина реки	Глубина	Параметр Великанова
20.4	69,6	442	100	0,42	48,6	1,93	0,43
24.4	101	469	100	0,49	44,5	1,66	0,59
27.4	91,2	360	300	0,52	46	1,54	0,09
29.4	86,3	362	239	0,5	46,1	1,39	0,12
1.5	62,2	264	135	0,49	46	1,36	0,22
10.5	45,3	175	125	0,46	40,9	1,19	0,17
22.5	45,4	132	110	0,3	38,1	0,93	0,20
2.6	30,5	85	68,3	0,3	38,8	1	0,31
12.6	19,8	34	54	0,3	38,6	0,96	0,29
22.6	11,7	32	44	0,25	35,8	0,8	0,23
1.7	11,5	29	42,5	0,27	35,1	0,8	0,24
13.7	10	14	30	0,27	34,7	0,8	0,37
21.7	7,48	15	35,9	0,23	34,7	0,85	0,20
2.8	6,18	2	28,9	0,23	34,7	0,81	0,24
14.8	7,48	-2	31,4	0,28	35,8	0,85	0,26
24.8	7,5	-3	29,1	0,32	36,8	0,87	0,30
4.9	6,58	-6	28,3	0,32	34	0,91	0,26
14.9	6,32	-2	29,8	0,35	34,9	0,92	0,24
22.9	7,32	-2	30,3	0,37	35	0,92	0,27
2.10	11,3	9	34,3	0,37	36,5	0,95	0,34
12.10	11,4	8	31,2	0,41	36	0,94	0,40
23.10	10,2	6	31,2	0,42	36	0,92	0,36
3.11	12,9	13	34,3	0,23	37	0,87	0,40
12.11	13,4	12	33,8	0,3	37	0,93	0,42
23.11	14,6	19	37,2	0,4	38	0,9	0,40
1.12	14	16	33,8	0,41	37,5	0,9	0,44
12.12	15,2	23	27,3	0,41	36,5	0,97	0,68
22.12	15,3	30	40,5	0,39	39	1,04	0,37

По исходным измеренным расходам, площади живого сечения и ширине русла были рассчитаны параметры Великанова по формуле

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

Далее были сделаны следующие шаги:

- Линейная интерполяция по параметрам Великанова по всему 1972 году для того, чтобы в дальнейшем с помощью них перейти к рассчитанным расходам
- Графики $\omega(H)$ и $B(H)$, с которых снимались значения, для того же перехода к рассчитанным расходам
- Сравнение расходов, с помощью снятых значений с графиков и параметров Великанова, с ежедневными расходами

Расходы, рассчитанные с помощью параметра Великанова площади живого сечения и ширины русла, определены по формуле

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

На рисунке 4.1 представлен график связей площади живого сечения к уровню воды, взятых из исходных данных. С помощью него были взяты значения площадей живого сечения, с помощью которых производился расчет параметров Великанова.

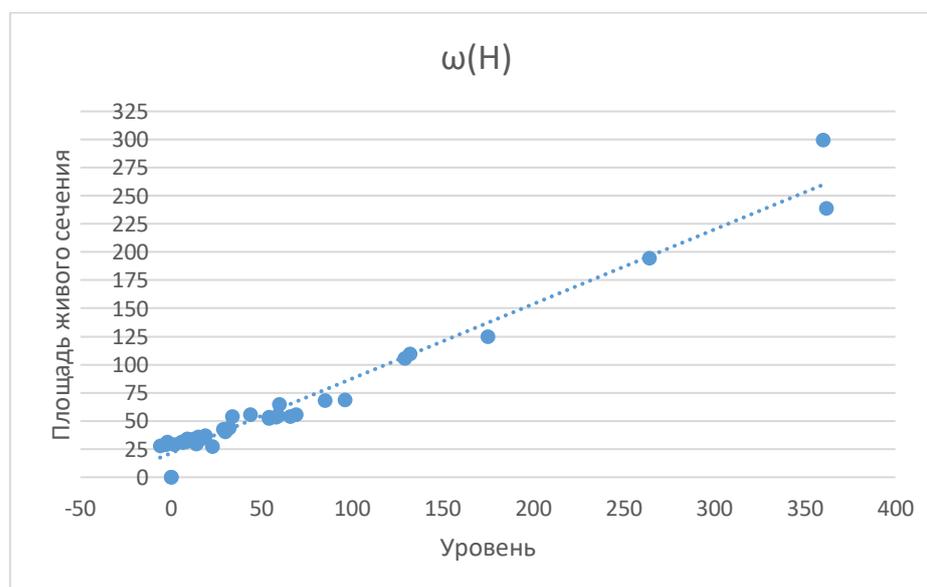


Рисунок 4.1 График зависимости $\omega(H)$ для п.Толмачево на 1972 год

На рисунке 4.2 изображен график связей площади ширины реки к уровню воды, взятых из исходных данных. С помощью него были взяты значения B , также участвующие в расчете параметров Великанова.

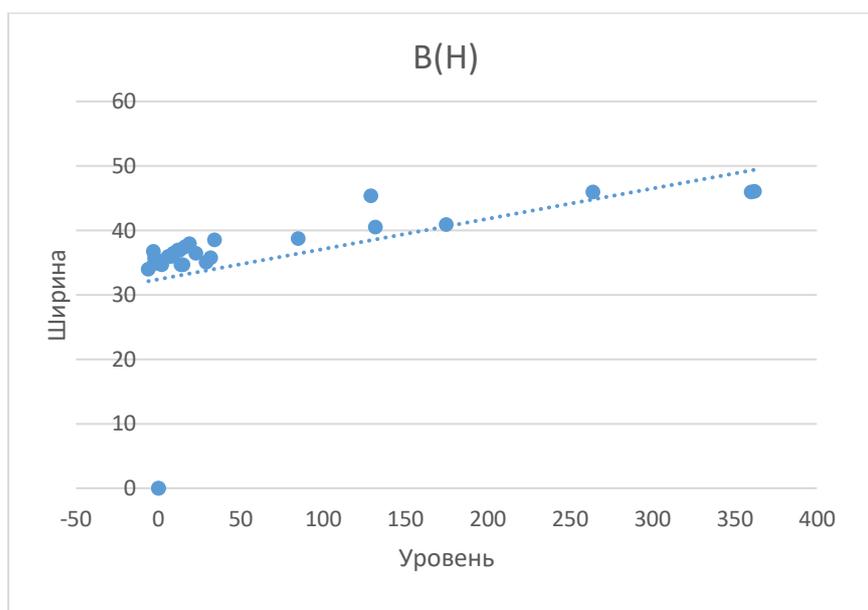


Рисунок 4.2 График зависимости $B(H)$ для п.Толмачево на 1972 год

Расчитанные по формуле (4.2) расходы, с помощью снятых с графиков 4.1 и 4.2, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 Полученные расходы с помощью графиков

Число	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	28,0	7,09	11,5	20,6	29,7	12,2	7,14	6,00	5,65	8,63	10,6	12,3
2	27,8	7,12	12,3	21,5	27,9	12,4	7,43	6,05	5,54	8,96	10,8	13,0
3	27,4	7,25	12,7	22,4	26,2	12,2	7,71	6,05	5,43	9,18	10,9	13,7
4	26,9	7,37	13,1	23,4	24,5	12,0	7,98	6,05	5,32	9,41	11,0	14,4
5	26,5	7,49	13,5	23,7	22,9	11,8	8,26	6,05	5,32	9,65	11,2	15,1
6	26,0	7,62	13,9	24,1	21,1	11,6	8,52	6,05	5,31	9,88	11,3	15,9
7	25,6	7,74	14,3	24,4	19,3	11,5	8,79	6,05	5,31	10,12	11,4	16,7
8	25,2	7,87	14,7	24,7	17,6	11,3	9,05	6,05	5,30	10,37	11,6	17,4
9	24,7	8,00	15,1	25,0	16,0	11,1	9,31	6,05	5,30	10,62	11,7	18,2
10	24,3	8,13	15,5	25,8	14,5	10,9	9,57	6,05	5,29	10,78	11,8	19,0
11	23,9	8,26	15,9	26,6	13,8	10,7	9,82	6,05	5,28	10,95	12,0	19,8
12	23,5	8,05	15,6	26,7	13,1	10,6	10,1	6,05	5,27	11,05	12,1	20,6
13	21,9	7,84	15,3	26,8	12,3	10,2	10,3	6,05	5,26	10,89	12,1	19,9
14	20,4	7,62	15,0	26,8	11,6	9,87	9,69	6,05	5,25	10,73	12,1	19,1
15	18,8	7,39	14,7	42,3	10,8	9,53	9,07	6,10	5,37	10,57	12,1	18,3
16	17,3	7,16	14,3	53,7	10,8	9,20	8,45	6,16	5,49	10,42	12,1	17,5
17	15,8	6,92	14,0	60,6	10,7	8,88	7,84	6,21	5,61	10,26	12,1	16,5
18	14,4	6,67	13,6	66,2	10,7	8,56	7,24	6,27	5,73	10,10	12,1	15,7
19	12,9	6,42	13,3	71,0	10,6	8,25	6,64	6,32	5,85	9,95	12,0	14,7

Продолжение таблицы 4.3 Полученные расходы с помощью графиков

20	11,5	6,16	12,9	75,1	10,5	7,94	6,05	6,37	5,97	9,80	12,0	13,7
21	10,1	5,90	12,7	83,5	10,5	7,64	5,47	6,43	6,10	9,65	12,0	12,8
22	8,75	5,62	12,6	88,2	10,4	7,35	5,52	6,48	6,22	9,49	12,0	11,8
23	7,43	6,32	13,3	92,5	10,6	7,27	5,58	6,52	6,35	9,43	12,0	11,8
24	7,38	7,02	14,1	96,5	10,9	7,26	5,63	6,57	6,48	9,56	12,0	11,8
25	7,33	7,74	14,8	67,2	11,1	7,24	5,68	6,45	6,78	9,69	12,0	11,7
26	7,28	8,47	15,7	39,4	11,3	7,22	5,73	6,33	7,07	9,81	12,1	11,6
27	7,24	9,21	16,4	13,1	11,5	7,21	5,77	6,22	7,38	9,94	12,1	11,4
28	7,19	10,0	17,2	14,3	11,7	7,19	5,82	6,10	7,68	10,1	12,2	11,3
29	7,14	10,7	18,0	17,0	11,8	7,18	5,87	5,99	8,00	10,2	12,2	11,2
30	7,10		18,9	23,6	11,9	7,16	5,91	5,87	8,31	10,3	12,2	11,0
31	7,05		19,7		12,1		5,96	5,76		10,5		10,9

Заключение

В ходе работы произведен расчет стока в реке Луга методом линейной интерполяции параметра Великанова, на базе исходных данных (ежедневные и измеренные расходы, уровень воды, площадь живого сечения, скорость течения, ширина и глубина реки) из гидрологического ежегодника по реке Луга пост Толмачево за 1972 год. На основе этих данных были рассчитаны параметры Великанова, а также сделана линейная интерполяция на весь год по этим параметрам.

На основе результатов, полученных после линейной интерполяции параметра Великанова, построения графиков зависимостей $\omega(H)$ и $V(H)$, можно сказать, что его применение допустимо в рассмотренном случае, так как полученные расходы после применения параметров очень близки к натурным значениям ежедневных расходов.

Вычисление стока на основе линейной интерполяции параметра Великанова дает надежные результаты при измерениях расходов воды в переходный период. Для повышения точности примененного метода при недостаточном количестве измерений требуется его проверка.

Список используемой литературы

1. Общая характеристика бассейна реки Луга и рек бассейна Финского залива от северной границы бассейна реки Луги до южной границы бассейна реки Невы // Невско-Ладожское Бассейновое водное управление URL: https://www.nord-west-water.ru/upload/skiovo/luga_132/skiovo_luga_132_book_1.pdf (дата обращения: 04.12.2024).
2. Быков В.Д., Васильев А.В. Гидрометрия – Л.: Гидрометеиздат, 1972
3. Обработка и обобщение данных наблюдений за стоком воды на реках и каналах при подготовке справочных изданий водного кадастра // ГГИ URL: https://hydrology.ru/storage/files/docs/rd_52.08.915-2021.pdf (дата обращения: 22.03.2025).
4. Эйпре Т.Э. Анализ способов вычисления ежедневных расходов воды рек.-Л.: Гидрометеиздат, 1981г
5. Гидрологический ежегодник бассейна Балтийского моря за 1972 г. Том 1, выпуск 4 – 6
6. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов -Л.: Гидрометеиздат, 1980.
7. Жадин В.И., Герд С.В. Реки, озера и водохранилища СССР их фауна и флора – М: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1961.
8. Великанов М.А. Динамика русловых потоков -М.: Гидрометеиздат, 1954.Т1, М.: Гидрометеиздат 1955, Т2.
9. Боровков В.С. Русловые процессы и динамика потоков на урбанизированных территориях -Л.: Гидрометеиздат, 1989.