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 **Формирование скоростного поля водного потока**

Исполнитель Моргунов Максим Александрович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.г.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Голосовская Вера Алексеевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

к.г.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич

(фамилия, имя, отчество)

«1» июня 2026 г.

Санкт–Петербург

2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
Глава 1. Физико-географическое описание района 5
1.1 Природные условия реки Алатырь.....5
1.2 Рельеф.....6
1.3 Климатическая характеристика.....7
1.4 Гидрография.....8
Глава 2. Гидрологический режим рассматриваемого объекта 11
2.1 Характеристики водного режима.....11
2.2 Методика расчёта коэффициента K.....14
2.3 Полученные величины: расчётные значения, поперечные профили и зависимости.....15
2.3.1 Сечения фазы половодья и спада половодья.....17
2.3.2 Сечения летне-осенней межени.....25
2.3.3 Сечения осеннего паводочного периода.....32
2.3.4 Обобщённые зависимости и совмещённые профили.....35
2.3.5 Сопоставление измеренных и расчётных эпюр скоростей.....39
Глава 3. Анализ результатов 51
3.1 Анализ водного режима.....51
3.2 Стабильность гидравлического коэффициента K.....52
3.3 Применимость формулы Шези к расчёту распределения скоростей.…53
3.4 Сезонная динамика поперечного сечения.....54
3.5 Сопоставление измеренных и расчётных эпюр скоростей.....55
3.6 Ограничения работы и направления дальнейших исследований.....56
Заключение 58
Список использованных источников 60
Приложение 1. Основные гидрографические характеристики р. Алатырь 63

ВВЕДЕНИЕ

В качестве объекта исследования был выбран участок реки Алатырь в районе посёлка городского типа Тургенево, Ардатовский район, Республика Мордовия. Этот участок реки характеризуется тем, что в районе посёлка Тургенево на реке Алатырь расположено гидротехническое сооружение — плотина, формирующая Тургеневское водохранилище. Плотина существенно влияет на режим течения воды, безопасность жизнедеятельности на её берегах и рациональное использование прибрежных территорий.

Целью данной работы является исследование скоростной структуры потока, обобщение и анализ данных наблюдений за расходом воды на конкретном водном объекте — реке Алатырь — и выявление возможности использования формулы Шези для определения распределения скоростей по ширине потока.

Актуальность исследования обусловлена тем, что изучение скоростного поля реки Алатырь позволяет анализировать динамику водных потоков, их влияние на окружающую среду и использовать эти данные для проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений. Данные о скорости потока имеют практическое значение при строительстве и обслуживании мостов, плотин, каналов, мелиоративных систем и других гидротехнических объектов.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

— анализ и обработка исходных данных гидрологических наблюдений на реке Алатырь в районе посёлка Тургенево;

— построение комплексных гидрометрических зависимостей по принятым данным;

— использование существующей методики расчёта скоростной структуры потока, основанной на формуле Шези;

— построение поперечных профилей живого сечения и расчётных эпюр скоростей по 10 датам гидрометрических промеров 1969 г.;

— оценка применимости расчётной методики, согласованности результатов и стабильности обобщённого коэффициента K.

Методы исследования. В работе применены следующие методы: обработка данных измерений расходов воды на гидрологическом посту реки Алатырь — пгт Тургенево; вычисление коэффициента расхода по имеющимся данным; графический анализ зависимости коэффициента от характеристик водного потока; сопоставление расчётных и натурных характеристик режима.

Объём и структура работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Графический материал работы включает гидрографы, комплексные

гидрометрические графики, поперечные профили живого сечения и расчётные эпюры скоростей.

ГЛАВА 1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА

1.1 Природные условия реки Алатырь

Река Алатырь — левый приток Суры (бассейн Волги), относящийся к Верхневолжскому бассейновому округу. Согласно Большой Российской энциклопедии, длина реки составляет 296 км, площадь водосбора — 11,2 тыс. км². Река протекает по северной окраине Приволжской возвышенности по территории Нижегородской области, Республики Мордовия и Чувашской Республики. Питание преимущественно снеговое. Среднегодовой расход воды у пос. Тургенево составляет около 40 м³/с. Замерзание происходит в ноябре, вскрытие — в начале апреля.

Историческое описание реки приведено в Энциклопедическом словаре Ф. А. Брокгауза и И. А. Ефрона: «Алатырь — река, берущая начало в лесах Ардатовского уезда Нижегородской губернии, протекает через весь Лукояновский уезд, после чего входит в Симбирскую губернию, где пересекает весь Ардатовский уезд и часть Алатырского, и после 280 вёрст извилистого течения впадает в Суру с левой стороны под городом Алатырем. Берега Алатыря состоят из известняков и глины юрской формации; правый берег по большей части высок, крут, каменист и лесист; левый — низменный, на нём множество мелких озёр, а местами он покрыт болотами, поросшими сосновым лесом».

С тех пор прошло более ста лет, однако приведённое описание отражает основные физико-географические факторы, формирующие скоростную структуру потока реки и динамику её изменений. Усиливается антропогенное воздействие на реку Алатырь, что обусловливает необходимость продолжения изучения её гидрологического режима для прогнозирования гидрологических явлений и обоснования инженерных решений.

Гидрологический пост у пгт Тургенево (Ардатовский район Республики Мордовия) расположен в среднем течении реки, на участке, типичном для Алатыря этого отрезка. Среднее течение характеризуется сформированным меандрирующим руслом, наличием поймы, развитой системой стариц и устойчивым меженным режимом. Выбор этого створа в качестве объекта исследования обусловлен наличием многолетнего ряда наблюдений, доступностью данных Гидрологического ежегодника за 1963–1970 гг., а также практической значимостью участка — выше водпоста расположено гидротехническое сооружение, формирующее Тургеневское водохранилище, и оценка скоростного режима ниже плотины представляет инженерный интерес.

В природном отношении бассейн реки Алатырь относится к лесостепной зоне с преобладанием смешанных лесов в северной части и остепнённых ландшафтов в южной. Растительный покров водосбора, наряду с особенностями подстилающих пород, оказывает влияние на формирование стока: лесистость

водосбора способствует выравниванию гидрографа за счёт удержания талых вод в подстилке и почве, увеличивает долю подземного стока и снижает максимальные расходы половодья. Эти факторы объясняют относительно умеренные значения максимальных расходов 1963–1970 гг. (от 288 до 583 м³/с) при значительной площади водосбора и характерные для рек лесной зоны устойчивые меженные расходы.

1.2 Рельеф

Река Алатырь протекает в пределах северной части Приволжской возвышенности — крупной возвышенности, входящей в состав Восточно-Европейской равнины. По данным государственного водного реестра России, бассейн реки относится к Верхневолжскому бассейновому округу. Речной бассейн — (Верхняя) Волга до Куйбышевского водохранилища (без бассейна Оки); речной подбассейн — Сура; водохозяйственный участок — Алатырь от истока до устья.

Бассейн Алатыря расположен на стыке двух разнородных в геоморфологическом отношении территорий. Водораздельный массив между Сурой и Алатырем, имеющий дугообразную форму, достигает максимальных высотных отметок от 280 до 320 м. К северу и северо-западу от главного водораздела высоты резко снижаются до 240 м, образуя выраженный уступ высотой 80–100 м. В целом преобладающие высоты в северной части Приволжской возвышенности составляют 150–180 м, увеличиваясь к югу. Характерной чертой рельефа является асимметрия: правобережье бассейна значительно выше и составляет 74 % площади, тогда как левобережье — лишь 26 %.

Территория бассейна сложена породами преимущественно юрского, мелового и палеогенового возраста. В основании разреза залегают юрские глины, выше — меловые отложения (пески, песчаники, мел, мергели), перекрытые палеогеновыми породами, среди которых встречаются крепкие песчаники и опоки. На правобережье распространены известняки и глины юрской формации; выходы этих пород образуют крутые, обрывистые склоны долины. На левобережье, в пределах полосы водно-ледниковой равнины, преобладают песчано-глинистые отложения, подстилаемые нижнемеловыми и юрскими породами.

Рельеф бассейна отличается значительной эрозионной расчленённостью. Овражно-балочная сеть развита особенно широко на правобережье; крутые склоны до 25–30°, обращённые на юг и юго-запад, изборождены промоинами и оврагами. В долине реки и её притоков распространены оползневые процессы, особенно в местах выходов подземных вод у основания уступов. Карстовые формы рельефа развиты в гипсах и известняках пермской системы.

Долина Алатыря имеет чётко выраженную асимметрию склонов, характерную для рек Приволжской возвышенности: правый берег высокий (до 20 м), крутой, каменистый, часто обнажён, покрыт лесами; левый берег — низменный, пологий, сложенный рыхлыми отложениями, с многочисленными мелкими озёрами-старицами и низинными болотами. Ширина долины варьируется от примерно 210 м у села Тургенево до 5,3 км у города Алатыря. Пойма широкая, особенно в нижнем течении, где во время весеннего половодья разлив достигает 1,5–3 км и более.

Геоморфологические особенности бассейна оказывают непосредственное влияние на гидрологический режим реки. Асимметрия долины определяет асимметричную форму поперечных сечений русла с углублением, как правило, к подмываемому правому берегу. Овражно-балочная сеть правобережья обеспечивает быстрое поступление талых и ливневых вод в реку, что усиливает максимумы половодий и дождевых паводков. Карстовая дренированность отдельных частей водосбора способствует формированию устойчивого подземного питания и стабильности меженных расходов. Эти факторы рельефа, в сочетании с климатическими условиями, формируют наблюдаемый комплекс гидрологических характеристик.

1.3 Климатическая характеристика

Климат района исследования умеренно-континентальный. Природно-климатические условия благоприятны для жизни и хозяйственной деятельности. Зимы достаточно холодные и продолжительные. Средние температуры января составляют от минус 13 до минус 15 °С. Возможны морозные периоды с температурами ниже минус 30 °С общей продолжительностью не более 10–14 дней за холодный период. Снежный покров устойчиво ложится в первых числах ноября, его средняя высота достигает 45–55 см.

Весной погода неустойчива, однако температуры повышаются быстро, преобладают солнечные и сухие дни. Лето практически совпадает с календарным; средняя температура июля составляет +20,0…+20,5 °С. Количество осадков в летний период заметно выше, чем в южной части региона. Осень с неустойчивой и ветреной погодой наступает в конце августа — начале сентября. Первые заморозки на почве возможны с середины октября. Среднегодовое количество осадков составляет менее 500 мм.

Климатические условия бассейна Алатыря определяют характерный режим стока реки. Снежные ресурсы зимы — снегозапас высотой 45–55 см при средней плотности около 0,22 г/см³ — создают на территории водосбора 100–120 мм водного эквивалента. Этот объём, освобождающийся за 20–30 суток весеннего таяния, формирует основную часть годового стока (60–70 %) в виде весеннего половодья. Скорость таяния, темп подъёма уровней и пик половодья

определяются ходом температур в первой декаде апреля и наличием весенних оттепелей: ранние затяжные оттепели сглаживают пик, поздние резкие потепления формируют острые половодья с высокими максимальными расходами.

Летне-осенний период характеризуется балансом между осадками и испарением. Сумма осадков тёплого периода (май — октябрь) составляет 300–350 мм при суммарном испарении 350–400 мм, что создаёт умеренный дефицит увлажнения и обусловливает истощение запасов подземных вод к концу межени. Минимальный сток приходится на август — сентябрь. Дождевые паводки летнего периода обычно невысоки (10–30 м³/с над меженным фоном), но в отдельные годы интенсивные ливни могут формировать значимые подъёмы — например, в июне 1965 г. наблюдался дождевой паводок с расходом 41 м³/с при меженном фоне 16 м³/с.

Зимний период с устойчивыми отрицательными температурами длится 130–150 суток, в течение которых река покрыта ледовым покровом толщиной 30–60 см. Зимний сток формируется исключительно за счёт подземного питания, его величина — 9–12 м³/с — остаётся относительно стабильной от года к году, что отражает устойчивость подземного питания водосбора. Возможные зимние оттепельные паводки (декабрь 1965 г.: Q = 22,9 м³/с) связаны с проникновением южных циклонов и сопровождаются короткими подъёмами уровней при сохранении ледовых явлений.

Климатические факторы определяют также характер ледового режима реки. Замерзание начинается во второй половине ноября с появления заберегов и шуги; полное ледообразование происходит к концу ноября — началу декабря. Вскрытие проходит в первой декаде апреля с характерным ходом ледостава: разрушение ледового покрова, образование ледоходов с возможным заторообразованием в местах с прижимной правой береговой линией. Продолжительность ледовых явлений в среднем составляет 140–150 суток.

1.4 Гидрография

Река Алатырь — левый приток Суры (бассейн Волги). Берёт начало в 9 км северо-западнее села Алатырь Нижегородской области, на северной окраине Приволжской возвышенности. Гидрографическая характеристика реки меняется от верховьев к устью, формируя облик равнинной реки с преимущественно снеговым питанием.

Основные гидрографические характеристики реки приведены ниже:

длина — 296 км; площадь водосбора — 11 200 км²; среднегодовой расход у пгт Тургенево — около 40,3 м³/с; среднегодовой расход у устья — около 42,6 м³/с; средний уклон реки — около 0,18 м/км (падение от истока более 133 м до устья 79 м); коэффициент извилистости — 1,48; густота речной сети — 0,57

км/км²; минерализация воды — 300–450 мг/дм³; питание главным образом снеговое; ледовый режим — замерзает в ноябре, вскрывается в начале апреля.

Исток находится в Нижегородской области, в 9 км северо-западнее с. Алатырь Нижегородской области. Устье — река впадает в Суру с левого берега в 277 км от её устья, у северной окраины города Алатырь в Чувашии. Основные притоки: правые — Рудня, Инсар (самый крупный), Нуя, Ирсеть, Кемлятка, Инелейка; левые — Уксун, Ашня, Барахманка, Чанга.

Характер реки неоднороден на всём её протяжении. В верховьях это небольшой ручей шириной 0,5–1 м и глубиной 0,3–0,5 м, в межень нередко пересыхающий. После деревни Орловка река расширяется до 15 м, глубина достигает 2 м. В среднем течении русло становится более полноводным и извилистым (коэффициент извилистости 1,48), ширина варьируется от 25 до 50 м. Берега высокие (3–5 м) и крутые, встречаются обрывы до 20 м. В районе посёлка Тургенево река перегорожена плотиной, образующей Тургеневское водохранилище шириной 80–100 м и глубиной у плотины до 6 м. В нижнем течении скорость течения замедляется, пойма становится широкой, богатой старицами и озёрами.

Притоки Алатыря образуют разветвлённую речную сеть. Самый крупный правый приток — Инсар, впадающий в Алатырь у города Ардатов (длина 168 км, площадь водосбора 3860 км²). Другие правые притоки — Рудня, Нуя, Ирсеть, Кемлятка, Инелейка — имеют длину от 10 до 50 км и осушают правобережную часть Приволжской возвышенности. Левые притоки — Уксун, Ашня, Барахманка, Чанга — короче и маловоднее, что отражает асимметрию водосбора (26 % приходится на левобережье). Густота речной сети по бассейну составляет 0,57 км/км², что типично для зоны лесостепи.

Гидротехническое сооружение в районе пгт Тургенево — плотина Тургеневского водохранилища — является важным элементом, влияющим на гидрологический режим реки. Плотина построена в 1950-х гг. для целей энергоснабжения и водоснабжения; в настоящее время функционирует в режиме руслового водохранилища. Длина подпора по реке составляет 2–3 км, объём водохранилища при нормальном подпорном уровне — около 1,5 млн м³. Сброс воды через плотину регулируется в зависимости от водности года и потребностей нижнего бьефа. Водпост на Алатыре у пгт Тургенево расположен ниже плотины и фиксирует расходы и уровни в условиях, близких к естественным, поскольку регулирование плотины имеет внутрисуточный, а не сезонный характер.

Алатырь — равнинная река с извилистым руслом, песчано-галечным дном, минерализацией воды 300–450 мг/дм³ и преимущественно снеговым питанием. Гидрологический пост у пгт Тургенево располагает многолетними рядами наблюдений и обеспечивает данные, используемые в настоящей работе.

Качество воды реки, по данным гидрохимических исследований, в целом соответствует требованиям к водоисточникам хозяйственно-питьевого назначения после стандартной водоподготовки, однако в районах хозяйственной деятельности отмечаются превышения содержания органических веществ и биогенных элементов.

ГЛАВА 2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАССМАТРИВАЕМОГО ОБЪЕКТА

2.1 Характеристики водного режима

Анализ водного режима реки Алатырь у пгт Тургенево выполнен по данным Гидрологического ежегодника за период 1963–1970 гг. (пост № 452, р. Алатырь — пгт Тургенево). В качестве характерных лет выбраны: 1963 г. — многоводный (среднегодовой расход 63,5 м³/с), 1968 г. — средний по водности (52,6 м³/с) и 1965 г. — маловодный (42,1 м³/с). Среднемноголетний расход за восьмилетний период составляет 52,5 м³/с.

Среднемесячные расходы и уровни воды за рассматриваемые годы приведены на рисунке 2.1. Уровни восстановлены по кривой расходов Q = f(H), построенной по данным гидрометрических измерений на посту в меженный период; для пика весеннего половодья (апрель) применена оценка, согласованная с отметкой выхода воды на пойму — 850 см над «0» графика поста.

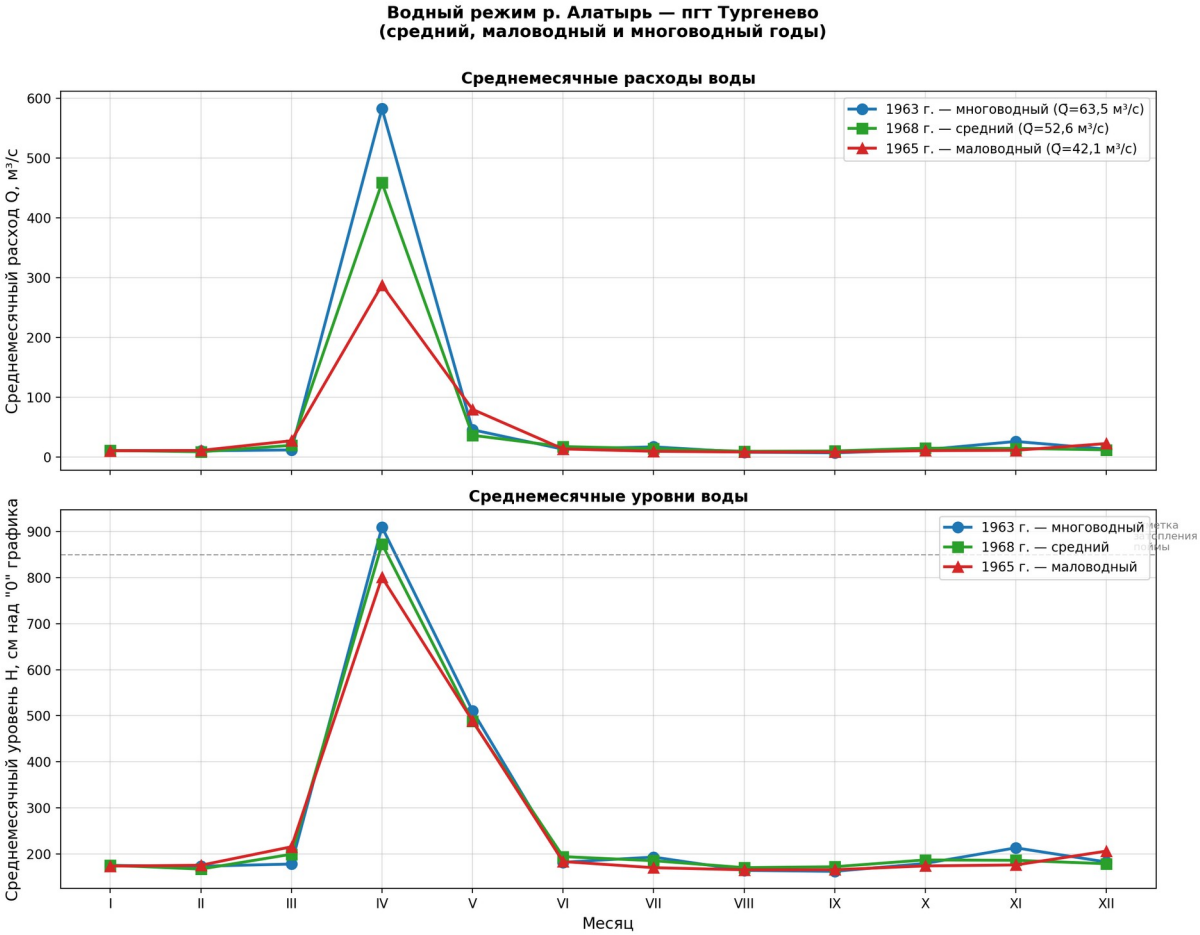


Рисунок 2.1 — Среднемесячные расходы и уровни воды р. Алатырь — пгт Тургенево за 1963, 1965 и 1968 гг.

Анализ гидрографа показывает, что водный режим реки Алатырь имеет ярко выраженный одновершинный характер с резким весенним пиком и низкими

расходами в остальные месяцы. Такая конфигурация типична для рек восточноевропейского типа с преобладанием снегового питания, к которым относится Алатырь — доля талых вод в годовом стоке составляет 60–70 %.

Период половодья. Подъём расходов начинается в марте, пик во все три рассматриваемых года приходится на апрель. В многоводный 1963 г. пиковый среднемесячный расход составил 583 м³/с при уровне около 910 см над «0» графика — вода значительно превышает отметку выхода на пойму. В средний 1968 г. пиковый расход 459 м³/с, уровень около 873 см. В маловодный 1965 г. пик меньше почти вдвое относительно многоводного года — 288 м³/с и уровень около 801 см, при этом отметка бровки достигается лишь незначительно. В мае расходы и уровни остаются повышенными, но снижаются интенсивно; к началу июня река возвращается к меженному состоянию. Полная продолжительность половодья составляет около двух месяцев.

Меженный период. Чётко разделяются летне-осенняя и зимняя межени. Летне-осенняя межень (июнь–октябрь) характеризуется наиболее низкими расходами и уровнями; абсолютные минимумы наблюдаются в августе–сентябре (Q = 7,4–10,5 м³/с, H = 162–172 см), что обусловлено истощением запасов подземных вод и максимальным испарением. Зимняя межень (ноябрь–март) устойчивая; характерны расходы 9–12 м³/с и уровни 170–215 см. В отдельные годы наблюдаются второстепенные паводки: осенние перед ледоставом (например, 1963 г., ноябрь: Q = 26,4 м³/с) и зимние оттепельные (1965 г., декабрь: Q = 22,9 м³/с).

Синхронность колебаний расходов и уровней. Кривые $Q(t)$ и $H(t)$ идут синфазно: максимумы и минимумы совпадают по времени, что закономерно следует из однозначной связи $Q = f(H)$. При этом амплитуды различаются: уровни изменяются в течение года в 5–6 раз (от ~160 см в межень до 800–910 см на пике), а расходы — почти в 80 раз (от 7 до 580 м³/с). Эта нелинейность объясняется конфигурацией кривой расходов: при выходе воды на пойму малому приращению уровня соответствует значительный прирост расхода за счёт резкого увеличения смоченного сечения.

Различия между годами. Все три рассматриваемых года демонстрируют единый тип режима, обусловленный снеговым питанием; различия проявляются в высоте и продолжительности половодья, а также в наличии второстепенных дождевых и оттепельных паводков. Это характеризует естественную межгодовую изменчивость стока реки Алатырь, обусловленную колебаниями зимних запасов снега и темпами весеннего таяния на водосборе.

Дополнительно по данным меженных гидрометрических измерений был построен комплексный гидрометрический график, представляющий совмещённые зависимости расхода Q, площади живого сечения ω и средней скорости v от уровня воды H (рисунок 2.2).

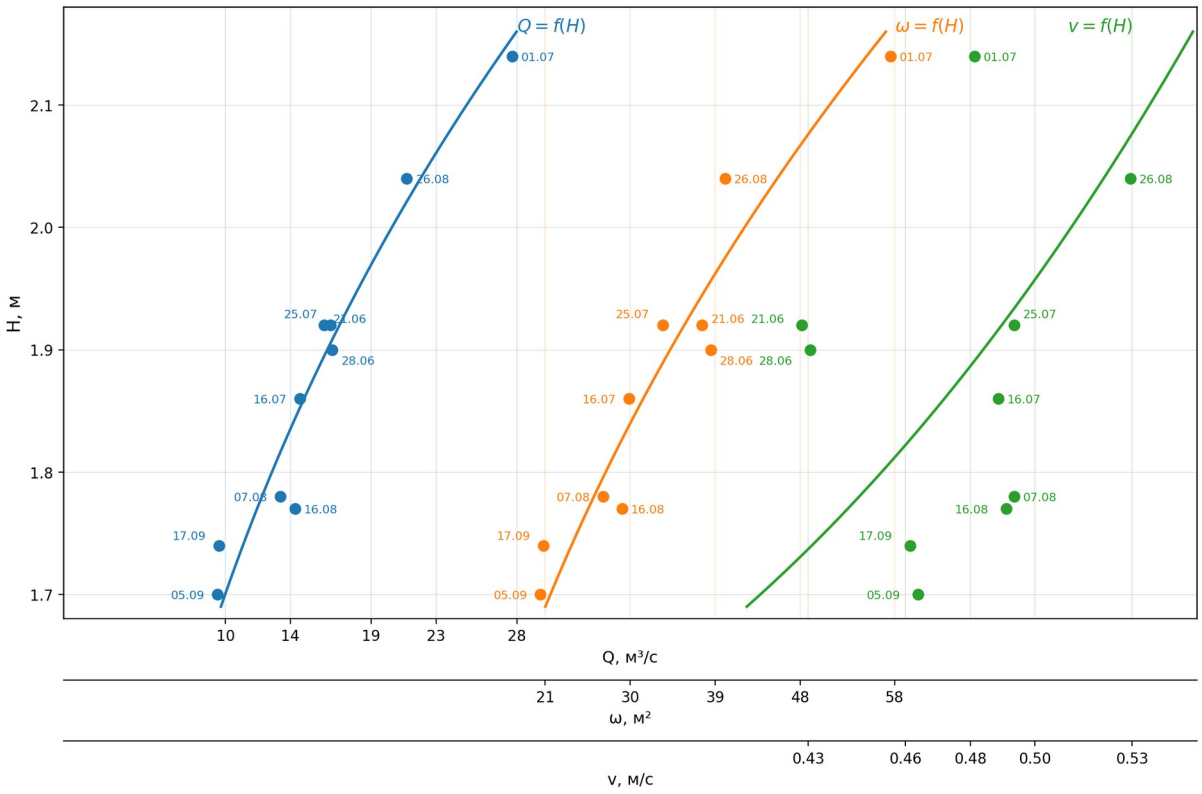


Рисунок 2.2 — Комплексный гидрометрический график р. Алатырь — пгт Тургенево по данным измерений (Q, ω, v = f(H))

Все три кривые имеют плавный однозначный характер и монотонно возрастают с уровнем, что свидетельствует о стационарности условий течения в створе и об отсутствии существенных русловых деформаций за период наблюдений. Кривая расходов аппроксимирована степенной зависимостью; в исследованном диапазоне уровней H = 1,70–2,14 м расход изменяется от 9,5 до 27,7 м³/с — почти в три раза при подъёме воды на 44 см. Кривая площадей ω = f(H) близка к линейной в этом интервале, что указывает на относительно прямостенное русло шириной 25–35 м без выхода воды на пойму. Кривая скоростей v = f(H) наиболее пологая: средняя скорость возрастает от 0,46 до 0,53 м/с (на 15 %), что согласуется с зависимостью v ~ R^(2/3) формулы Шези.

Перелом кривой площадей ω = f(H), маркирующий выход воды на пойму, в исследованном диапазоне не наблюдается. По данным гидрологического ежегодника, отметка затопления поймы составляет 850–870 см над «0» графика, что лежит значительно выше зоны выполненных измерений. Это означает, что отметку бровки русла по построенному графику определить нельзя; для её установления необходимы дополнительные измерения в период весеннего половодья.

2.2 Методика расчёта коэффициента K

В основу расчёта скоростей течения в живом сечении положена формула Шези для средней скорости потока в открытом русле, записанная в виде:

$$v = K \cdot h^{2/3}$$

где v — средняя скорость потока, м/с; h — глубина потока, м; K — обобщённый гидравлический коэффициент, размерность м^(1/3)/с, характеризующий гидравлические условия русла на исследуемом участке. Физически коэффициент K связан с уклоном водной поверхности I и шероховатостью русла n соотношением K = √I / n при условии, что гидравлический радиус приближённо равен средней глубине потока (R ≈ h_ср), что справедливо для широких равнинных русел, к которым относится река Алатырь на исследуемом участке (отношение B / h_ср составляет 17 и более). Расчётная схема следует методике А. В. Караушева [10]: коэффициент Шези C в формуле v = C · √(h · I) выражается через формулу Маннинга как C = (1 / n) · h^(1/6), откуда v = (1 / n) · h^(1/6) · (h · I)^(1/2) = (√I / n) · h^(2/3) = K · h^(2/3). Таким образом, обобщённый гидравлический коэффициент K = √I / n объединяет уклон водной поверхности и шероховатость русла, а распределение средних на вертикалях скоростей определяется только местной глубиной h.

Расчёт коэффициента K и эпюр скоростей выполняется в два этапа.

Этап 1. Определение коэффициента K по средним характеристикам сечения. Для каждой даты гидрометрических измерений по средней скорости и средней глубине в сечении вычисляется значение:

$$K_{\text{сеч}} = v_{\text{ср}} / h_{\text{ср}}{}^{2/3}$$

где v_ср — средняя скорость потока в живом сечении, полученная по результатам измерения расхода и осреднения скоростей по ширине, м/с; h_ср — средняя глубина в сечении, м (отношение площади живого сечения ω к ширине потока B: h_ср = ω / B). Значения v_ср и h_ср принимаются по исходным гидрометрическим данным. Полученные значения K_сеч характеризуют гидравлическое сопротивление участка русла на дату измерения. Следует различать среднюю глубину h_ср и уровень воды H: уровень H отсчитывается от нуля поста и используется в зависимостях вида Q = f(H), ω = f(H), v = f(H) (раздел 2.1), тогда как в расчёт коэффициента K входит именно средняя глубина h_ср = ω / B. Нуль поста заглублён ниже дна реки, поэтому числовые значения уровня превышают глубину: меженным средним глубинам h_ср = 1,09–1,50 м соответствуют уровни H = 1,70–2,14 м, а разность H − h_ср ≈ 0,6 м отражает превышение нуля поста над средним уровнем дна в створе.

Этап 2. Расчёт средней скорости на скоростных вертикалях. В пределах одного поперечного сечения коэффициент K принимается постоянным по ширине потока — это основное допущение формулы Шези для русловых участков. Тогда средняя на вертикали скорость рассчитывается по формуле:

$$v_{\text{расч,i}} = K_{\text{сеч}} \cdot h_i^{\,2/3}$$

где h_i — глубина на i-й скоростной вертикали по данным промеров поперечного профиля, м.

По принятым исходным данным гидрометрических измерений на посту р. Алатырь — пгт Тургенево по соотношению Этапа 1 вычислены значения K_сеч для всех десяти зафиксированных измерений (таблица 1).

Таблица 1 — Расчётные значения коэффициента K по принятым данным

№	Дата	v_ср, м/с	h_ср, м	h_ср^(2/3)	K, м^(1/3)/с
1	21.06	0,428	1,09	1,059	0,404
2	28.06	0,431	1,10	1,065	0,404
3	01.07	0,481	1,30	1,190	0,405
4	16.07	0,489	1,33	1,209	0,404
5	25.07	0,494	1,35	1,221	0,404
6	07.08	0,494	1,35	1,221	0,404
7	16.08	0,491	1,34	1,215	0,404
8	26.08	0,529	1,50	1,310	0,404
9	05.09	0,464	1,23	1,147	0,405
10	17.09	0,461	1,22	1,141	0,404
—	**Среднее**	**—**	**—**	**—**	**0,404**

Результат расчёта показывает, что в исследованном диапазоне средних глубин h_ср = 1,09–1,50 м (что соответствует уровням воды H = 1,70–2,14 м по нулю поста), отвечающем летне-осенней межени, значение коэффициента K практически постоянно — все десять значений совпадают до третьего знака после запятой. Среднее значение коэффициента составляет K = 0,404 м^(1/3)/с со стандартным отклонением менее 0,001. Это означает, что гидравлические условия створа в меженный период стабильны, и для последующего расчёта скоростей по сечениям может использоваться единое значение K = 0,404 м^(1/3)/с.

Принятые допущения и ограничения. Гидравлический радиус R заменён на среднюю глубину h_ср по соотношению R ≈ h_ср, что справедливо для широкого русла при B/h_ср ≥ 10. Коэффициент K в пределах одного поперечного сечения принят постоянным по ширине; межсезонная изменчивость K, обусловленная изменением шероховатости русла, в работе не учитывается. Влияние подпора от плотины Тургеневского водохранилища в расчёте не рассматривается; принимается, что измерения выполнены в створе, где режим определяется естественным уклоном водной поверхности.

Полученная сравнимая в исследованном диапазоне величина коэффициента K = 0,404 м^(1/3)/с принимается в качестве расчётного параметра для определения распределения скоростей по ширине потока в поперечных сечениях, рассмотренных в разделе 2.3.

2.3 Полученные величины: расчётные значения, поперечные профили и зависимости

В настоящем разделе приведены результаты построения поперечных профилей живого сечения реки Алатырь у пгт Тургенево по данным десяти гидрометрических промеров за период с мая по октябрь 1969 г., расчёт геометрических характеристик каждого сечения и расчётных эпюр скоростей по ширине потока по формуле Шези v = K · h^(2/3) при K = 0,404 м^(1/3)/с (раздел 2.2).

Сводные результаты расчёта геометрических и гидравлических характеристик десяти поперечных сечений приведены в таблице 2. Ширина потока B по урезам, площадь живого сечения ω и смоченный периметр P определены численным интегрированием по данным промеров. Средняя глубина h_ср вычислена как отношение площади к ширине, гидравлический радиус R — как отношение площади к смоченному периметру. Средняя расчётная скорость v_ср,расч получена по формуле Шези при K = 0,404, расчётный расход Q_расч определён методом средних скоростей в полосах между соседними скоростными вертикалями.

Таблица 2 — Геометрические характеристики и расчётные гидравлические параметры поперечных сечений

№ табл.	Дата	B, м	ω, м²	h_ср, м	h_max, м	R, м	v_ср, м/с	Q_расч, м³/с
3	24.05.1969	66,0	317,6	4,81	7,01	4,55	1,152	402,91
4	17.05.1969	55,9	73,8	1,32	2,15	1,31	0,486	39,04
5	27.05.1969	56,2	72,9	1,30	2,10	1,29	0,481	38,23
6	05.06.1969	57,4	81,8	1,43	2,30	1,41	0,512	45,35
7	28.06.1969	30,7	33,7	1,10	1,74	1,07	0,430	14,96
8	16.07.1969	30,2	40,1	1,33	1,75	1,29	0,488	20,02
9	16.08.1969	30,4	40,7	1,34	1,68	1,30	0,491	20,55

10	17.09.1969	30,2	36,6	1,21	1,58	1,18	0,460	17,25
11	17.10.1969	30,8	44,4	1,44	1,80	1,40	0,515	23,51
12	27.10.1969	30,8	43,9	1,42	1,77	1,39	0,511	23,06

Анализ таблицы 2 показывает, что десять рассмотренных сечений разделяются на три группы по характеру водности и по конфигурации створа. Таблица 3 (24.05.1969) выделяется из остального ряда: ширина потока составляет 66,0 м, максимальная глубина 7,01 м, площадь живого сечения 317,6 м². Эти характеристики существенно превышают значения, наблюдаемые в остальных сечениях, и не могут быть объяснены только различием уровней. Из текста гидрологического описания поста следует, что на створе располагается несколько гидростворов — основной (водомерный пост) и гидроствор № 6, расположенный в 30 м выше водпоста и используемый при высоких уровнях воды. Сечение Таблицы 3 относится к гидроствору № 6, что и объясняет существенное различие в его геометрии.

Сечения Таблиц 4–6 (17.05–05.06.1969) с шириной 55,9–57,4 м и максимальной глубиной 2,10–2,30 м соответствуют фазе спада весеннего половодья: основное русло уже сформировано, но левая часть створа ещё включает прирусловую часть поймы. Сечения Таблиц 7–12 (28.06–27.10.1969) с шириной около 30 м и максимальной глубиной 1,58–1,80 м описывают межгенный и осенне-паводочный режим, когда вода полностью находится в основном русле.

Ниже последовательно рассмотрены поперечные профили и расчётные эпюры скоростей по всем десяти сечениям 1969 г.

2.3.1 Сечения фазы половодья и спада половодья

Сечение Таблицы 3 (24.05.1969) — гидроствор № 6 в период спада весеннего половодья. Ширина потока по урезу 66,0 м, максимальная глубина 7,01 м, площадь живого сечения 317,6 м². Дно характеризуется выраженным углублением в центральной части створа; средняя глубина 4,81 м более чем в три раза превышает значения соседних меженных сечений. Расчётная средняя скорость 1,15 м/с, расход около 403 м³/с. Профиль и эпюра скоростей приведены на рисунках 2.3 и 2.4.

Таблица 3 — Промеры поперечного профиля, 24.05.1969 (гидроствор № 6)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	17,6	0,00

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
—	20,0	0,61
д1	22,0	1,08
—	24,0	1,13
—	26,0	3,26
3	28,0	3,80
—	30,0	3,79
—	32,0	4,03
д2	34,0	4,26
—	36,0	6,05
—	38,0	6,19
4	40,0	6,45
—	42,0	6,67
—	44,0	7,01
—	46,0	7,01
—	48,0	6,95
—	50,0	6,79
5	52,0	6,65
—	54,0	6,71
—	56,0	6,31
—	58,0	5,97
—	60,0	5,97
—	62,0	5,95
6	64,0	5,90
—	66,0	5,85
—	68,0	5,86
—	70,0	5,71
—	72,0	5,55
—	74,0	5,11
7	76,0	3,90
—	78,0	3,51
—	80,0	3,41
8	82,0	1,45
ур.л.б	83,6	0,00



Рисунок 2.3 — Поперечный профиль живого сечения р. Алатырь — пгт Тургенево, 24.05.1969 (Таблица 3, гидроствор № 6)



Рисунок 2.4 — Расчётная эпюра скоростей по ширине потока, 24.05.1969 (Таблица 3), K = 0,404

Сечение Таблицы 4 (17.05.1969) — основной створ в период спада половодья. Ширина 55,9 м, максимальная глубина 2,15 м, площадь 73,8 м². Глубины в основной части потока составляют 0,8–1,9 м с плавным понижением к левому берегу. Расчётная средняя скорость 0,49 м/с, расход 39,0 м³/с. Профиль и эпюра скоростей приведены на рисунках 2.5 и 2.6.

Таблица 4 — Промеры поперечного профиля, 17.05.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	6,8	0,00
—	8,0	0,60

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
—	10,0	0,67
1	12,0	0,80
—	14,0	0,83
2	16,0	0,85
—	18,0	0,85
3	20,0	0,85
—	22,0	0,90
4	24,0	1,00
—	26,0	1,12
5	28,0	1,35
—	30,0	1,43
6	32,0	1,56
—	34,0	1,60
7	36,0	1,60
—	38,0	1,60
8	40,0	1,71
—	42,0	1,90
9	44,0	1,85
—	46,0	2,00
10	48,0	2,15
—	50,0	2,10
11	52,0	1,95
—	54,0	1,79
12	56,0	1,80
—	58,0	1,33
13	60,0	0,71
ур.л.б	62,7	0,00

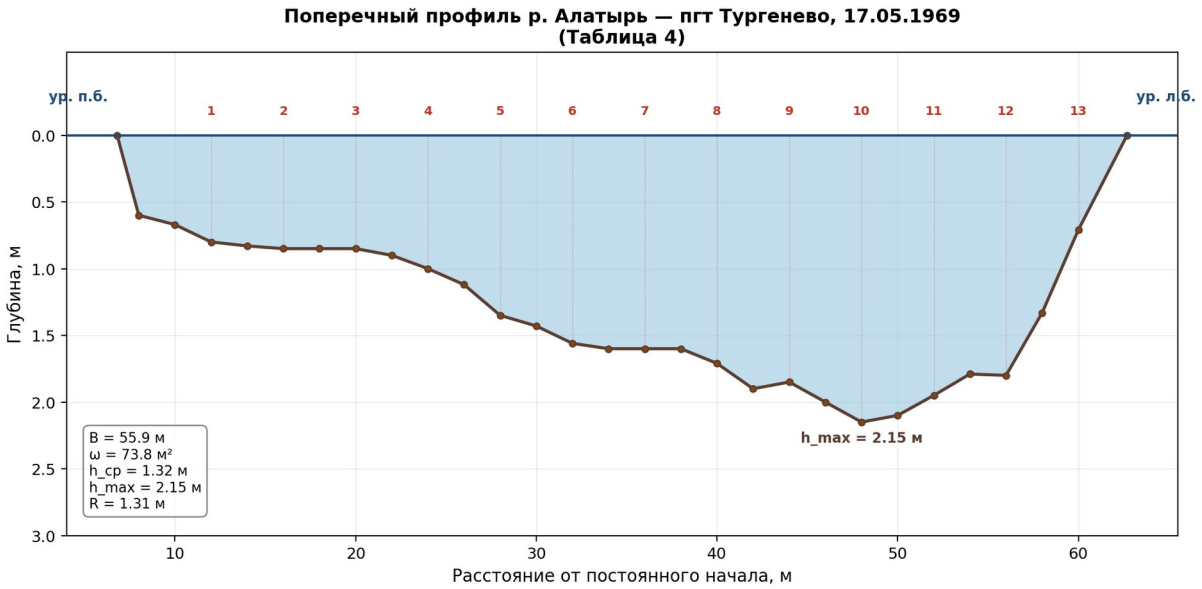


Рисунок 2.5 — Поперечный профиль живого сечения, 17.05.1969 (Таблица 4)



Рисунок 2.6 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 17.05.1969 (Таблица 4), K = 0,404

Сечение Таблицы 5 (27.05.1969) — спад половодья продолжается. Ширина 56,2 м, максимальная глубина 2,10 м, площадь 72,9 м². По сравнению с Таблицей 4 изменения минимальны — за 10 дней площадь сократилась лишь на 1,2 %, глубина — на 0,05 м, что свидетельствует о медленном спаде воды в этот период. Профиль и эпюра приведены на рисунках 2.7 и 2.8.

Таблица 5 — Промеры поперечного профиля, 27.05.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	6,6	0,00
—	8,0	0,58
—	10,0	0,65

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
1	12,0	0,80
—	14,0	0,80
2	16,0	0,85
—	18,0	0,84
3	20,0	0,84
—	22,0	0,90
4	24,0	1,00
—	26,0	1,10
5	28,0	1,30
—	30,0	1,40
6	32,0	1,54
—	34,0	1,58
7	36,0	1,58
—	38,0	1,60
8	40,0	1,70
—	42,0	1,88
9	44,0	1,84
—	46,0	1,98
10	48,0	2,10
—	50,0	2,06
11	52,0	1,90
—	54,0	1,80
12	56,0	1,80
—	58,0	1,30
13	60,0	0,70
ур.л.б	62,8	0,00

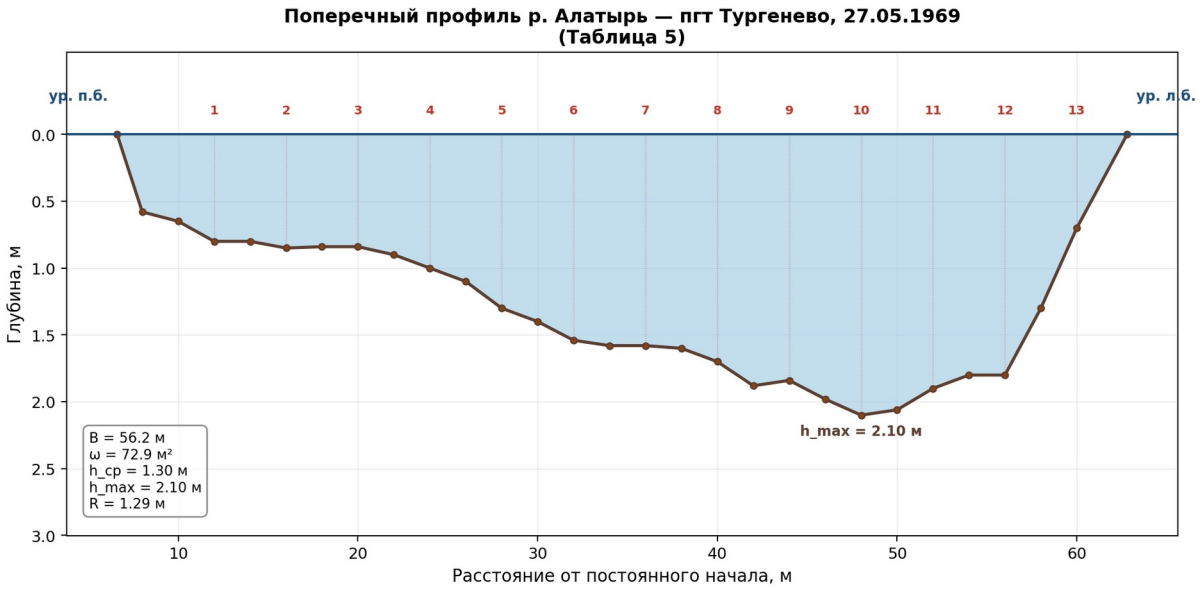


Рисунок 2.7 — Поперечный профиль живого сечения, 27.05.1969 (Таблица 5)



Рисунок 2.8 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 27.05.1969 (Таблица 5), K = 0,404

Сечение Таблицы 6 (05.06.1969) — завершение фазы спада половодья. Ширина 57,4 м, максимальная глубина 2,30 м, площадь 81,8 м². Несмотря на удалённость от пика половодья, площадь живого сечения в этот момент даже несколько возрастает по сравнению с Таблицами 4–5, что связано с локальным повышением уровня воды на фоне второстепенных дождевых притоков в водосбор. Расчётная средняя скорость составляет 0,51 м/с, расход 45,4 м³/с — максимум среди сечений основного створа в 1969 г. Профиль и эпюра приведены на рисунках 2.9 и 2.10.

Таблица 6 — Промеры поперечного профиля, 05.06.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	5,8	0,00
—	6,0	0,45
—	8,0	0,74
—	10,0	0,84
1	12,0	0,94
—	14,0	0,95
2	16,0	1,00
—	18,0	1,00
3	20,0	1,00
—	22,0	1,00
4	24,0	1,16
—	26,0	1,35
5	28,0	1,50
—	30,0	1,60
6	32,0	1,70
—	34,0	1,70
7	36,0	1,70
—	38,0	1,76
8	40,0	1,82
—	42,0	2,00
9	44,0	2,00
—	46,0	2,10
10	48,0	2,30
—	50,0	2,26
11	52,0	2,10
—	54,0	1,80
12	56,0	2,00
—	58,0	1,40
13	60,0	0,80
—	62,0	0,18
ур.л.б	63,2	0,00

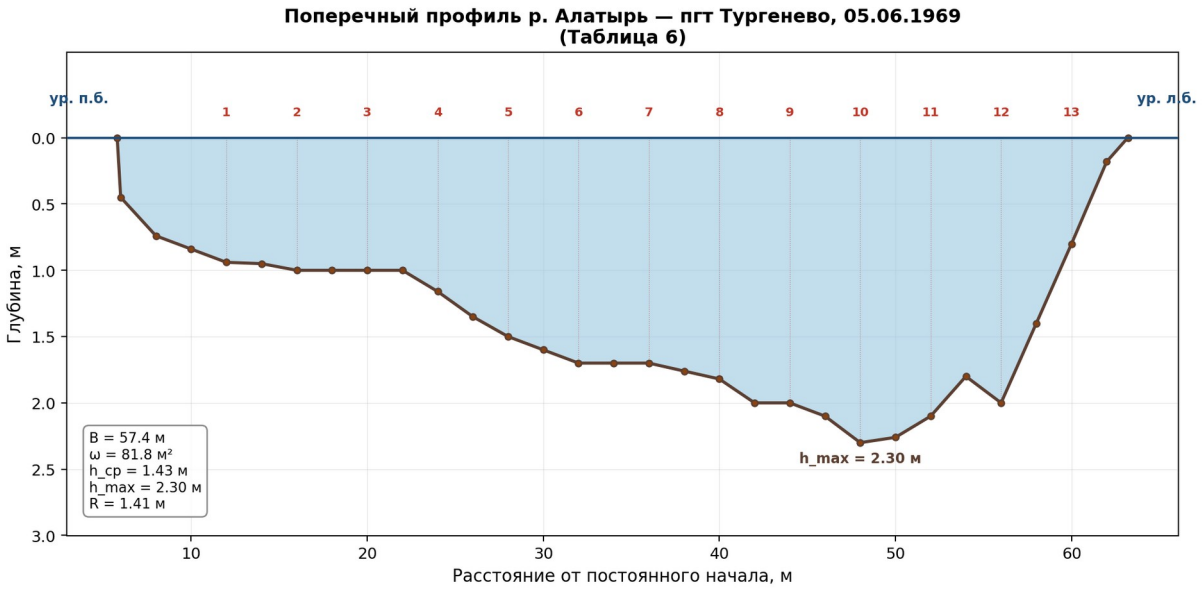


Рисунок 2.9 — Поперечный профиль живого сечения, 05.06.1969 (Таблица 6)



Рисунок 2.10 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 05.06.1969 (Таблица 6), K = 0,404

2.3.2 Сечения летне-осенней межени

Сечение Таблицы 7 (28.06.1969) — начало летне-осенней межени. Резкое сокращение ширины потока почти вдвое: с 57,4 м (05.06) до 30,7 м. Максимальная глубина уменьшается с 2,30 до 1,74 м, площадь живого сечения — с 81,8 до 33,7 м². Это означает выход воды из прирусловой части левого берега и формирование меженного русла. Профиль приобретает характерный для среднего течения реки облик: ровное дно с глубиной 1,0–1,2 м в основной части и углублением до 1,74 м у левого берега. Расчётная средняя скорость 0,43 м/с, расход 15,0 м³/с. Профиль и эпюра приведены на рисунках 2.11 и 2.12.

Таблица 7 — Промеры поперечного профиля, 28.06.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	5,0	0,00
—	5,5	0,12
1	7,0	1,00
—	8,5	1,08
2	10,0	1,06
—	11,5	1,06
3	13,0	1,15
—	14,5	1,16
4	16,0	1,10
—	17,5	1,02
5	19,0	1,04
—	20,5	1,06
6	22,0	1,12
—	23,5	1,12
7	25,0	1,15
—	26,5	1,20
8	28,0	1,28
—	29,5	1,36
9	31,0	1,36
—	32,5	1,74
10	34,0	1,26
—	35,5	0,15
ур.л.б	35,7	0,00

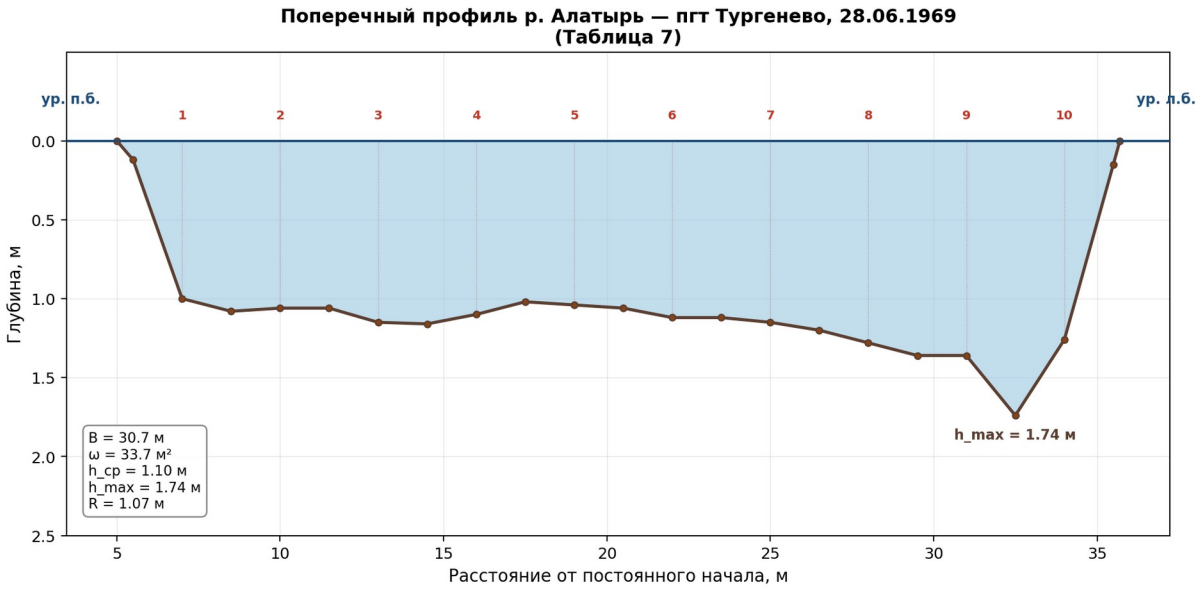


Рисунок 2.11 — Поперечный профиль живого сечения, 28.06.1969 (Таблица 7)



Рисунок 2.12 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 28.06.1969 (Таблица 7), K = 0,404

Сечение Таблицы 8 (16.07.1969) — установившаяся летняя межень. Ширина 30,2 м, максимальная глубина 1,75 м, площадь 40,1 м². По сравнению с Таблицей 7 площадь возрастает на 19 % при практически неизменной ширине, что означает локальное повышение уровня воды примерно на 0,2 м — результат летних дождевых паводков. Расчётный расход 20,0 м³/с. Профиль и эпюра приведены на рисунках 2.13 и 2.14.

Таблица 8 — Промеры поперечного профиля, 16.07.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	5,3	0,00
—	5,5	0,20

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
1	7,0	1,00
—	8,5	1,35
2	10,0	1,46
—	11,5	1,46
3	13,0	1,46
—	14,5	1,45
4	16,0	1,40
—	17,5	1,27
5	19,0	1,25
—	20,5	1,30
6	22,0	1,36
—	23,5	1,40
7	25,0	1,40
—	26,5	1,42
8	28,0	1,50
—	29,5	1,55
9	31,0	1,66
—	32,5	1,75
10	34,0	1,15
ур.л.б	35,5	0,00

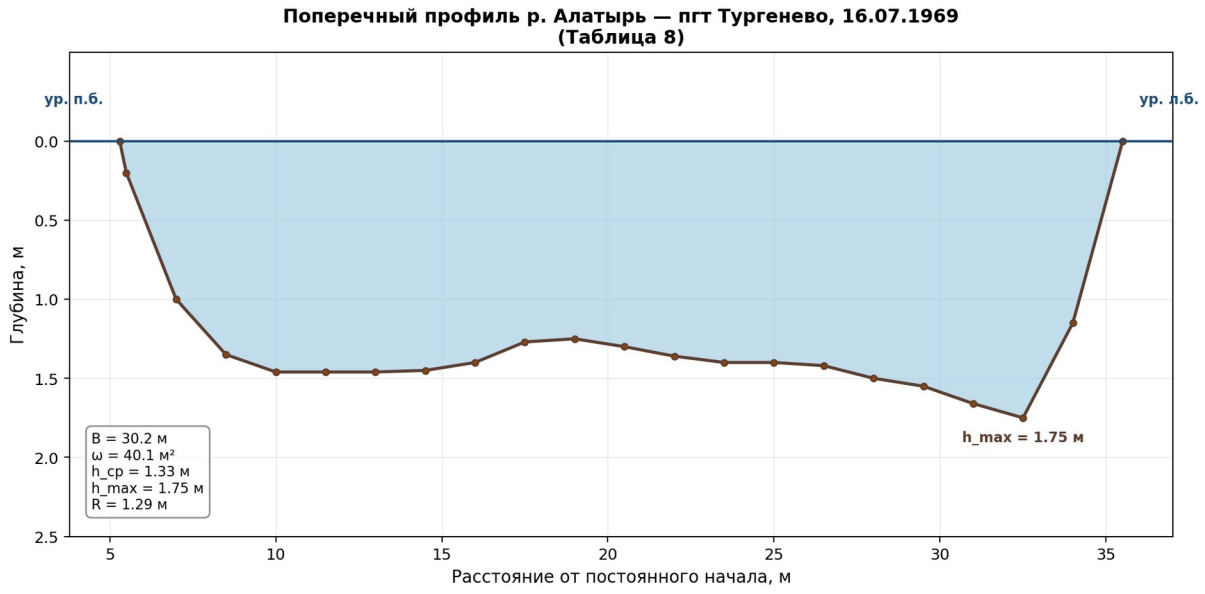


Рисунок 2.13 — Поперечный профиль живого сечения, 16.07.1969 (Таблица 8)



Рисунок 2.14 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 16.07.1969 (Таблица 8), K = 0,404

Сечение Таблицы 9 (16.08.1969) — продолжение летней межени. Ширина 30,4 м, максимальная глубина 1,68 м, площадь 40,7 м². Состояние потока стабильно: за месяц по сравнению с Таблицей 8 площадь практически не изменилась (рост менее 2 %), максимальная глубина уменьшилась на 0,07 м. Расчётный расход 20,6 м³/с. Профиль и эпюра приведены на рисунках 2.15 и 2.16.

Таблица 9 — Промеры поперечного профиля, 16.08.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	5,2	0,00
—	5,5	0,12
1	7,0	1,05
—	8,5	1,44
2	10,0	1,38
—	11,5	1,38
3	13,0	1,38
—	14,5	1,40
4	16,0	1,36
—	17,5	1,40
5	19,0	1,36
—	20,5	1,40
6	22,0	1,46
—	23,5	1,50
7	25,0	1,54

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
—	26,5	1,62
8	28,0	1,50
—	29,5	1,54
9	31,0	1,58
—	32,5	1,68
10	34,0	1,06
ур.л.б	35,6	0,00

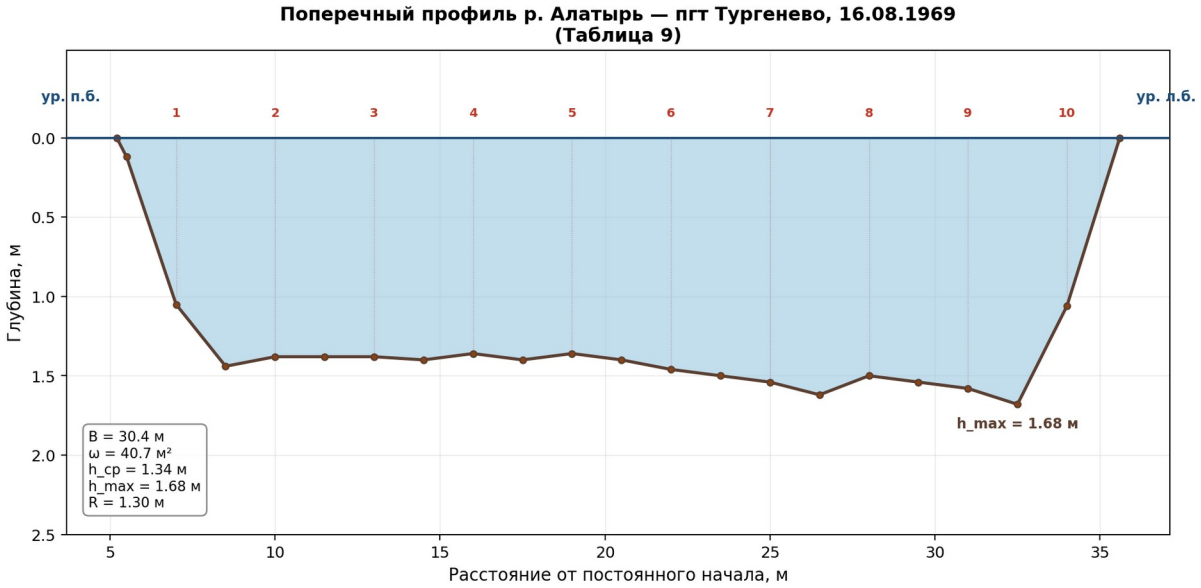


Рисунок 2.15 — Поперечный профиль живого сечения, 16.08.1969 (Таблица 9)



Рисунок 2.16 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 16.08.1969 (Таблица 9), K = 0,404

Сечение Таблицы 10 (17.09.1969) — поздняя летне-осенняя межень. Ширина 30,2 м, максимальная глубина 1,58 м, площадь 36,6 м². Это минимальные геометрические характеристики среди всех десяти сечений 1969 г.: площадь живого сечения сократилась на 10 % по сравнению с августом из-за продолжающегося истощения подземных запасов воды. Расчётная средняя скорость 0,46 м/с, расход 17,3 м³/с. Профиль и эпюра приведены на рисунках 2.17 и 2.18.

Таблица 10 — Промеры поперечного профиля, 17.09.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	5,4	0,00
1	7,0	1,00
—	8,5	1,30
2	10,0	1,20
—	11,5	1,20
3	13,0	1,25
—	14,5	1,25
4	16,0	1,30
—	17,5	1,22
5	19,0	1,30
—	20,5	1,22
6	22,0	1,30
—	23,5	1,23
7	25,0	1,35
—	26,5	1,40
8	28,0	1,50
—	29,5	1,42
9	31,0	1,45
—	32,5	1,58
10	34,0	0,90
ур.л.б	35,6	0,00



Рисунок 2.17 — Поперечный профиль живого сечения, 17.09.1969 (Таблица 10)



Рисунок 2.18 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 17.09.1969 (Таблица 10), K = 0,404

2.3.3 Сечения осеннего паводочного периода

Сечение Таблицы 11 (17.10.1969) — начало предзимнего повышения водности. Ширина 30,8 м, максимальная глубина 1,80 м, площадь 44,4 м². По сравнению с минимумом сентября (Таблица 10) площадь возрастает на 21 %, максимальная глубина — на 0,22 м. Это отражает осенний паводок, связанный с дождями и снижением испарения при сохранении подземного питания. Расчётный расход возрастает до 23,5 м³/с — максимум среди меженно-паводочных сечений. Профиль и эпюра приведены на рисунках 2.19 и 2.20.

Таблица 11 — Промеры поперечного профиля, 17.10.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	5,0	0,00
—	5,5	0,30
1	7,0	1,20
—	8,5	1,50
2	10,0	1,54
—	11,5	1,52
3	13,0	1,54
—	14,5	1,56
4	16,0	1,50
—	17,5	1,50
5	19,0	1,50
—	20,5	1,50
6	22,0	1,54
—	23,5	1,64
7	25,0	1,68
—	26,5	1,70
8	28,0	1,60
—	29,5	1,56
9	31,0	1,68
—	32,5	1,80
10	34,0	1,20
ур.л.б	35,8	0,00



Рисунок 2.19 — Поперечный профиль живого сечения, 17.10.1969 (Таблица 11)



Рисунок 2.20 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 17.10.1969 (Таблица 11), K = 0,404

Сечение Таблицы 12 (27.10.1969) — установившийся осенне-паводочный режим. Ширина 30,8 м, максимальная глубина 1,77 м, площадь 43,9 м². Изменения за 10 дней по сравнению с Таблицей 11 минимальны (площадь сократилась на 1 %, максимальная глубина — на 0,03 м), что указывает на стабилизацию гидрологической обстановки перед началом ледовых явлений. Расчётный расход 23,1 м³/с. Профиль и эпюра приведены на рисунках 2.21 и 2.22.

Таблица 12 — Промеры поперечного профиля, 27.10.1969 (основной створ)

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
ур.п.б	5,0	0,00
—	5,5	0,28

Скоростная вертикаль	Расстояние от пост. нач., м	Глубина, м
1	7,0	1,18
—	8,5	1,50
2	10,0	1,52
—	11,5	1,50
3	13,0	1,53
—	14,5	1,55
4	16,0	1,48
—	17,5	1,48
5	19,0	1,48
—	20,5	1,48
6	22,0	1,50
—	23,5	1,60
7	25,0	1,67
—	26,5	1,70
8	28,0	1,59
—	29,5	1,55
9	31,0	1,66
—	32,5	1,77
10	34,0	1,19
ур.л.б	35,8	0,00



Рисунок 2.21 — Поперечный профиль живого сечения, 27.10.1969 (Таблица 12)



Рисунок 2.22 — Расчётная эпюра скоростей по ширине, 27.10.1969 (Таблица 12), K = 0,404

2.3.4 Обобщённые зависимости и совмещённые профили

Совмещённое представление поперечных профилей за разные фазы режима 1969 г. приведено на рисунке 2.23. Сечения сгруппированы по сезонам: спад половодья (Таблица 4, 17.05), летняя межень (Таблица 7, 28.06; Таблица 10, 17.09) и осенне-паводочный режим (Таблица 11, 17.10). Видна качественная разница между «широкими» сечениями фазы спада половодья и компактными сечениями межени.

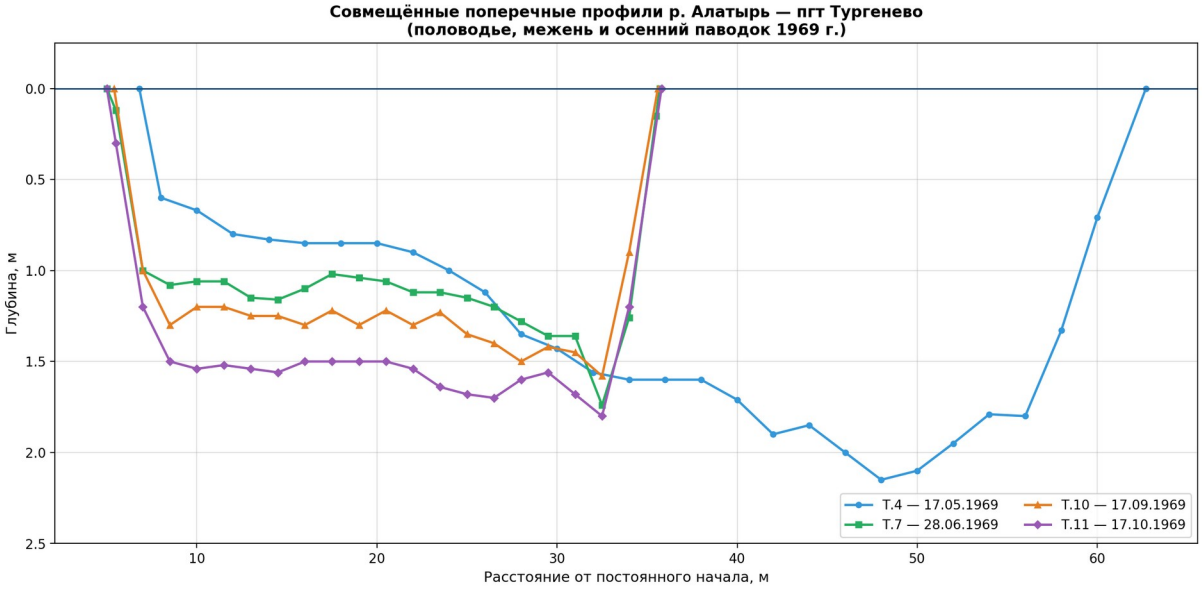


Рисунок 2.23 — Совмещённые поперечные профили р. Алатырь — пгт Тургенево за основные фазы режима 1969 г.

Графики зависимостей геометрических характеристик сечений от максимальной глубины приведены на рисунке 2.24. Точки группируются: основная серия (Таблицы 4–12, основной створ) демонстрирует устойчивые

соотношения, аномальная точка соответствует гидроствору № 6 (Таблица 3). На графиках видна закономерная связь ширины B, площади ω и средней глубины h_ср с максимальной глубиной h_max. Гидравлический радиус R при средней глубине h_ср = 1,1–1,5 м составляет 1,07–1,41 м, что подтверждает применимость приближения R ≈ h_ср для широкого русла.

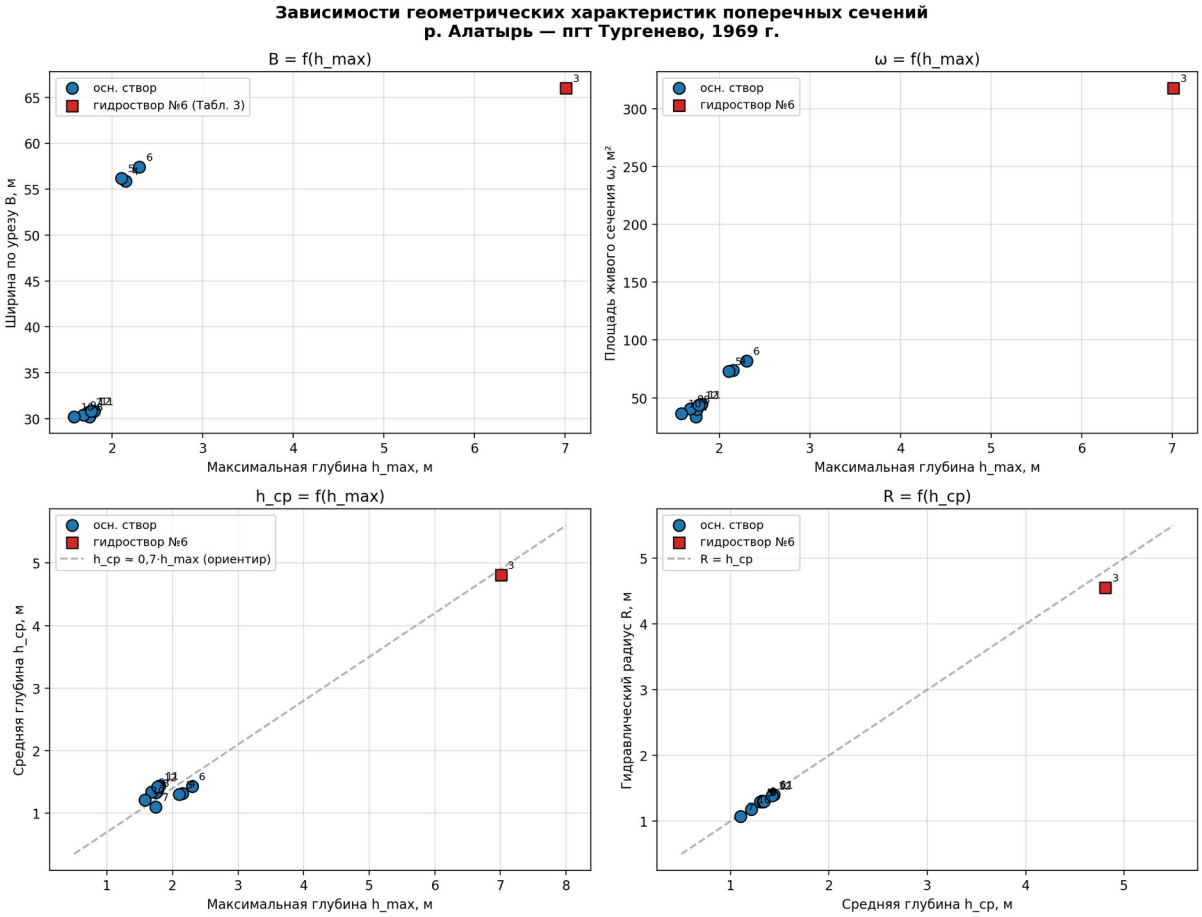


Рисунок 2.24 — Зависимости геометрических характеристик поперечных сечений (B, ω, h_ср, R) от максимальной глубины и средней глубины

Зависимость средней расчётной скорости от средней глубины приведена на рисунке 2.25. Точки идеально ложатся на теоретическую кривую v = 0,404 · h_ср^(2/3), что отражает методику расчёта (по построению), но также подтверждает согласованность принятой модели: формула Шези даёт монотонную возрастающую зависимость скорости от глубины с убывающим темпом, что качественно согласуется с физикой движения воды в открытом русле.

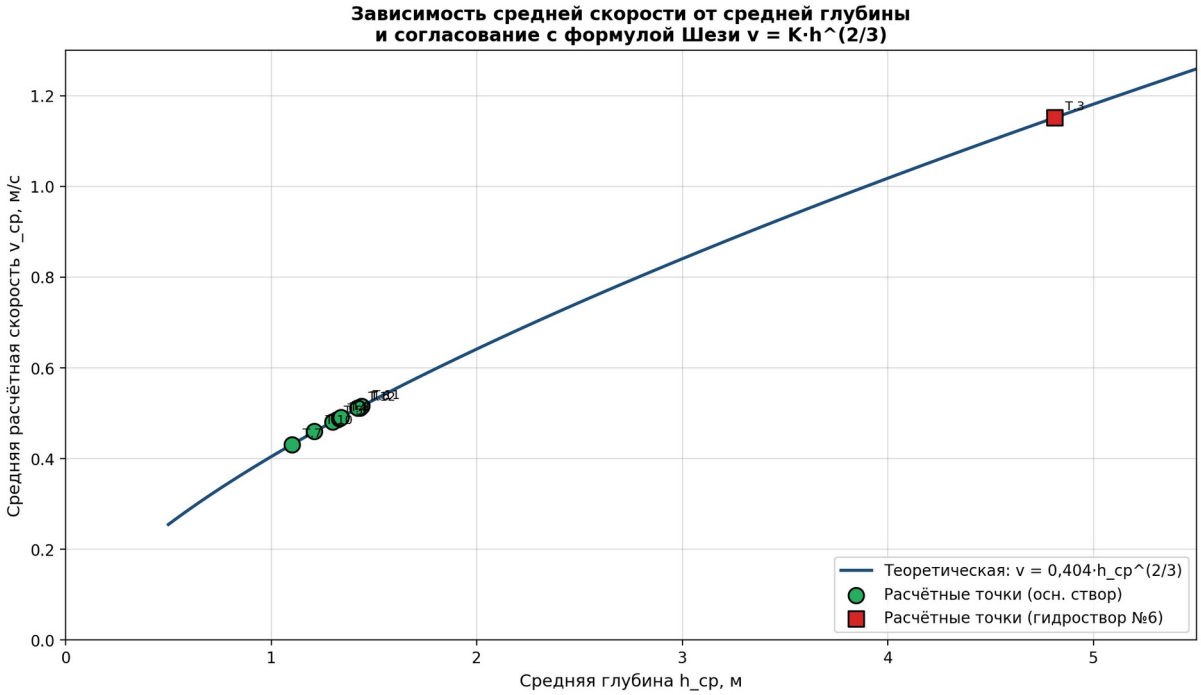


Рисунок 2.25 — Зависимость средней расчётной скорости v_ср от средней глубины h_ср и сопоставление с формулой Шези

Зависимость расчётного расхода от площади живого сечения приведена на рисунке 2.26. Все точки группируются вдоль линии тренда Q ≈ 1,11 · ω, что соответствует средней скорости порядка 1,1 м/с при усреднении по всем десяти сечениям (включая глубокий гидроствор № 6). Без учёта аномального сечения (Таблица 3) среднее значение скорости снижается до 0,48 м/с, что характерно для русловой части потока.

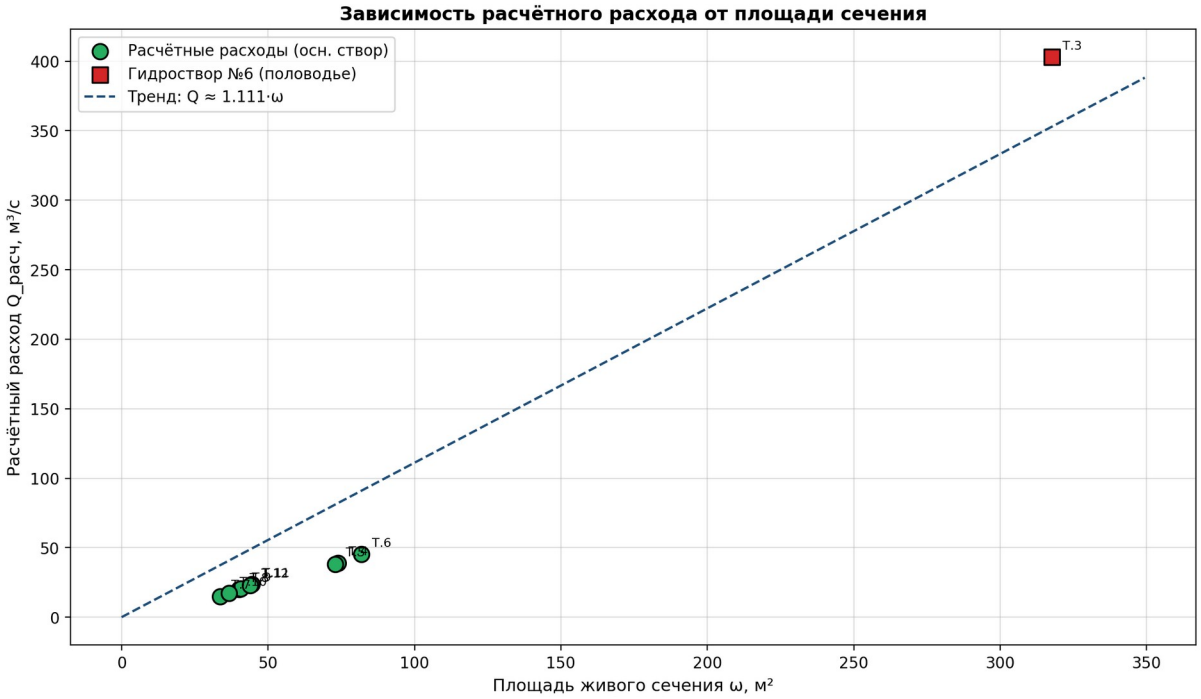


Рисунок 2.26 — Зависимость расчётного расхода Q от площади живого сечения ω

2.3.5 Сопоставление измеренных и расчётных эпюр скоростей по ширине потока

Для оценки применимости формулы Шези к описанию распределения скоростей по ширине потока было выполнено сопоставление измеренных и расчётных эпюр скоростей для десяти дат гидрометрических измерений 1969 г. (21.06–17.09). По данным полевых измерений скоростей вертушкой на скоростных вертикалях получены значения средней на вертикали измеренной скорости v_изм; расчётные значения v_расч вычислены по формуле Шези v = K·h^(2/3) при K = 0,404 для глубины каждой вертикали. Геометрия створа (расстояния скоростных вертикалей и глубины) принята по данным промеров соответствующих дат.

Следует пояснить, что набор дат для построения эпюр скоростей (21.06–17.09.1969, основной створ) частично отличается от набора дат поперечных профилей раздела 2.3 (17.05–27.10.1969). Это обусловлено составом исходных полевых материалов: измерения скоростей вертушкой выполнялись на скоростных вертикалях в летне-осенний период, тогда как полные промеры поперечного профиля проводились по более широкому календарному ряду, включая фазу спада половодья. Для дат, входящих в оба набора (28.06, 16.07, 16.08, 17.09), геометрические характеристики в соответствующих таблицах совпадают.

Сводное сопоставление средних по сечению измеренных и расчётных скоростей приведено в таблице 13.

Таблица 13 — Сопоставление средних измеренных и расчётных скоростей по датам 1969 г.

Дата	v_ср.изм, м/с	v_ср.расч, м/с	Отклонение, %	Фаза режима
21.06.1969	0,48	0,43	−10,8	спад половодья
28.06.1969	0,51	0,43	−14,8	спад половодья
01.07.1969	0,68	0,48	−29,5	спад половодья
16.07.1969	0,36	0,49	+37,0	межень
25.07.1969	0,39	0,49	+26,3	межень
07.08.1969	0,32	0,49	+54,4	межень
16.08.1969	0,35	0,49	+42,3	межень
26.08.1969	0,45	0,53	+17,6	переход

Дата	v_ср.изм, м/с	v_ср.расч, м/с	Отклонение, %	Фаза режима
05.09.1969	0,25	0,46	+85,6	межень
17.09.1969	0,25	0,46	+82,9	межень

Анализ таблицы 13 выявляет систематическую закономерность. В период спада весеннего половодья (21.06–01.07), когда наблюдаются повышенные глубины и расходы, измеренные скорости превышают расчётные на 11–30 %. В меженный период (16.07–17.09) наблюдается обратная картина: расчётные скорости превышают измеренные на 18–86 %, причём наибольшее расхождение приходится на маловодный конец межени (05.09 и 17.09). Лишь в переходный период (26.08) измеренные и расчётные значения практически совпадают.

В качестве характерных примеров на рисунках 2.27–2.30 приведены совмещённые эпюры измеренной (сплошная линия) и расчётной (пунктир) скоростей по ширине потока с поперечным профилем живого сечения. Под каждым рисунком приведена таблица исходных данных (Таблицы 14–23): номер скоростной вертикали, её расстояние от постоянного начала, глубина, измеренная и расчётная скорости. Полное собрание эпюр по всем десяти датам приведено далее.

Таблица 14 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 21.06.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	0,99	0,41	0,402
2	10,0	1,02	0,50	0,408
3	13,0	0,97	0,53	0,397
4	16,0	0,97	0,55	0,397
5	19,0	0,97	0,56	0,397
6	22,0	1,02	0,57	0,409
7	25,0	1,20	0,53	0,456
8	28,0	1,17	0,59	0,448
9	31,0	1,40	0,44	0,506
10	34,0	1,37	0,12	0,499

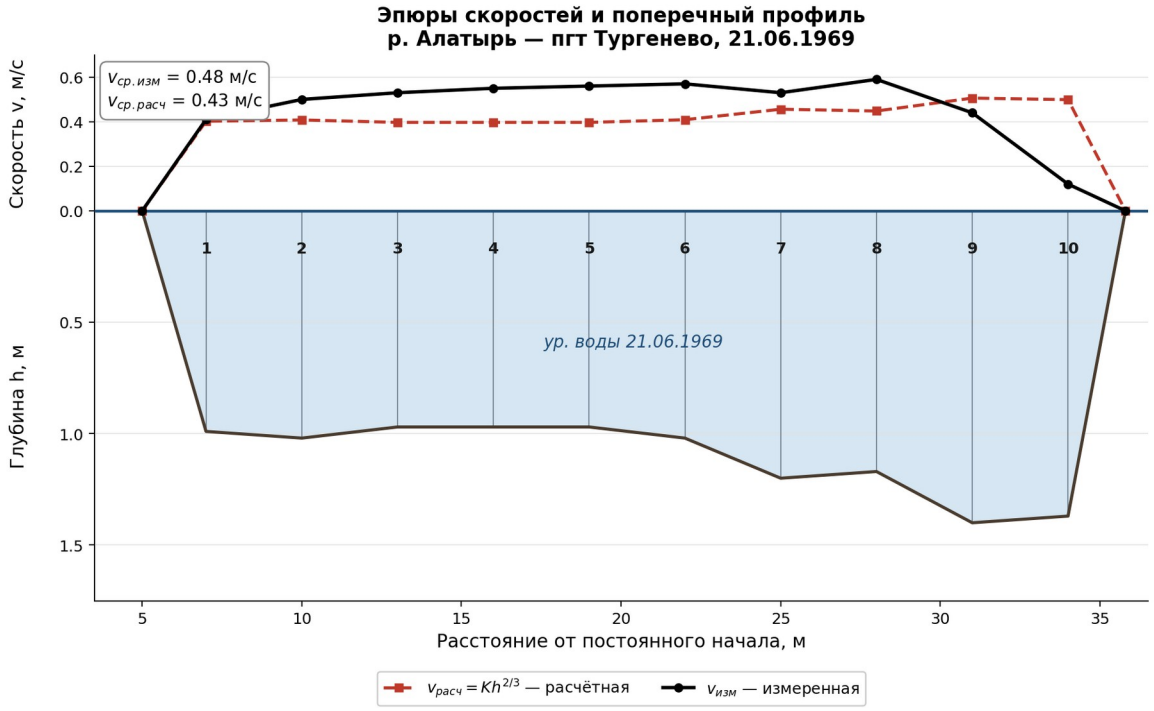


Рисунок 2.27 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 21.06.1969 (спад половодья)

Таблица 15 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 28.06.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,00	0,42	0,404
2	10,0	1,06	0,46	0,420
3	13,0	1,15	0,43	0,443
4	16,0	1,10	0,56	0,431
5	19,0	1,04	0,67	0,415
6	22,0	1,12	0,73	0,436
7	25,0	1,15	0,52	0,443
8	28,0	1,28	0,59	0,476
9	31,0	1,36	0,48	0,496
10	34,0	1,26	0,20	0,471

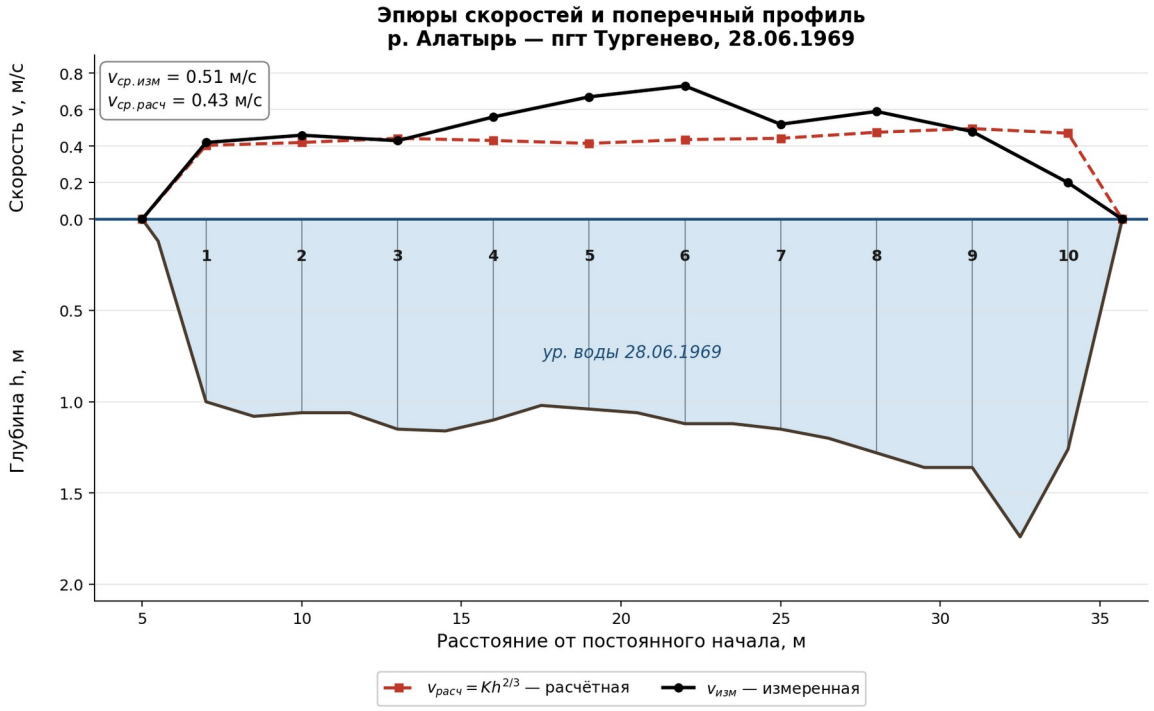


Рисунок 2.28 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 28.06.1969 (спад половодья)

Таблица 16 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 01.07.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,20	0,53	0,456
2	10,0	1,28	0,74	0,476
3	13,0	1,38	0,73	0,501
4	16,0	1,30	0,77	0,481
5	19,0	1,28	0,81	0,476
6	22,0	1,36	0,75	0,496
7	25,0	1,38	0,80	0,501
8	28,0	1,52	0,66	0,534
9	31,0	1,60	0,69	0,553
10	34,0	1,50	0,34	0,529

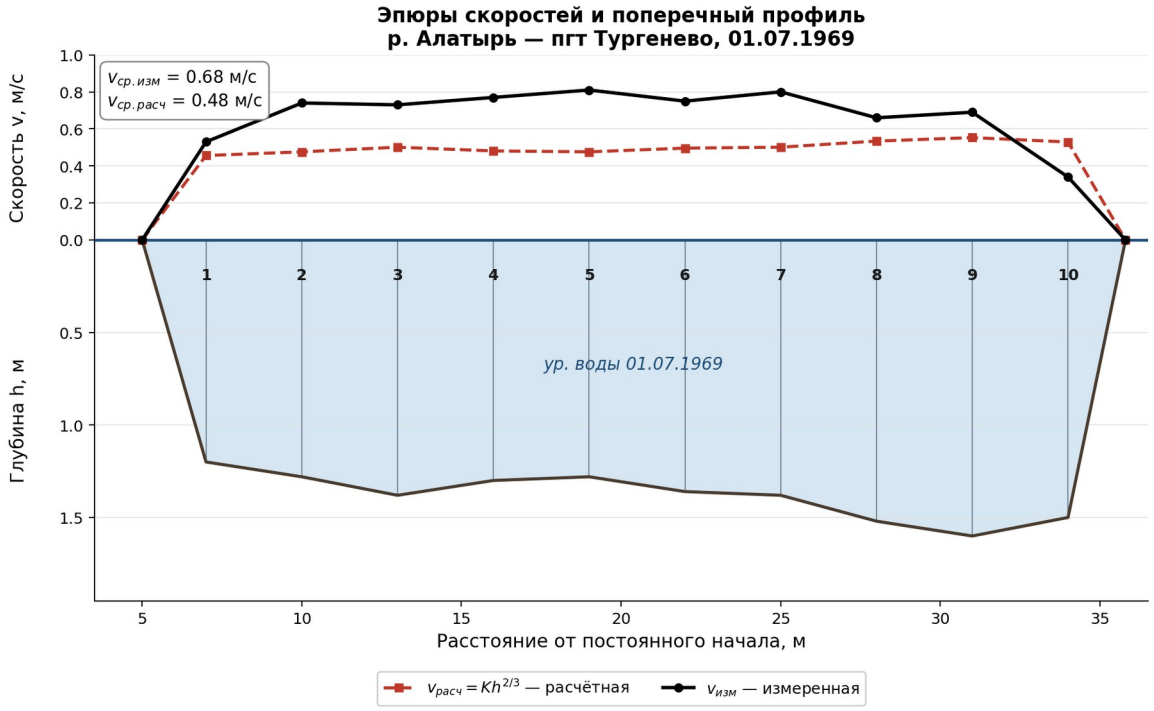


Рисунок 2.29 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 01.07.1969 (спад половодья)

Таблица 17 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 16.07.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,00	0,23	0,404
2	10,0	1,46	0,32	0,520
3	13,0	1,46	0,40	0,520
4	16,0	1,40	0,41	0,506
5	19,0	1,25	0,43	0,469
6	22,0	1,36	0,44	0,496
7	25,0	1,40	0,47	0,506
8	28,0	1,50	0,39	0,529
9	31,0	1,66	0,32	0,566
10	34,0	1,15	0,16	0,443

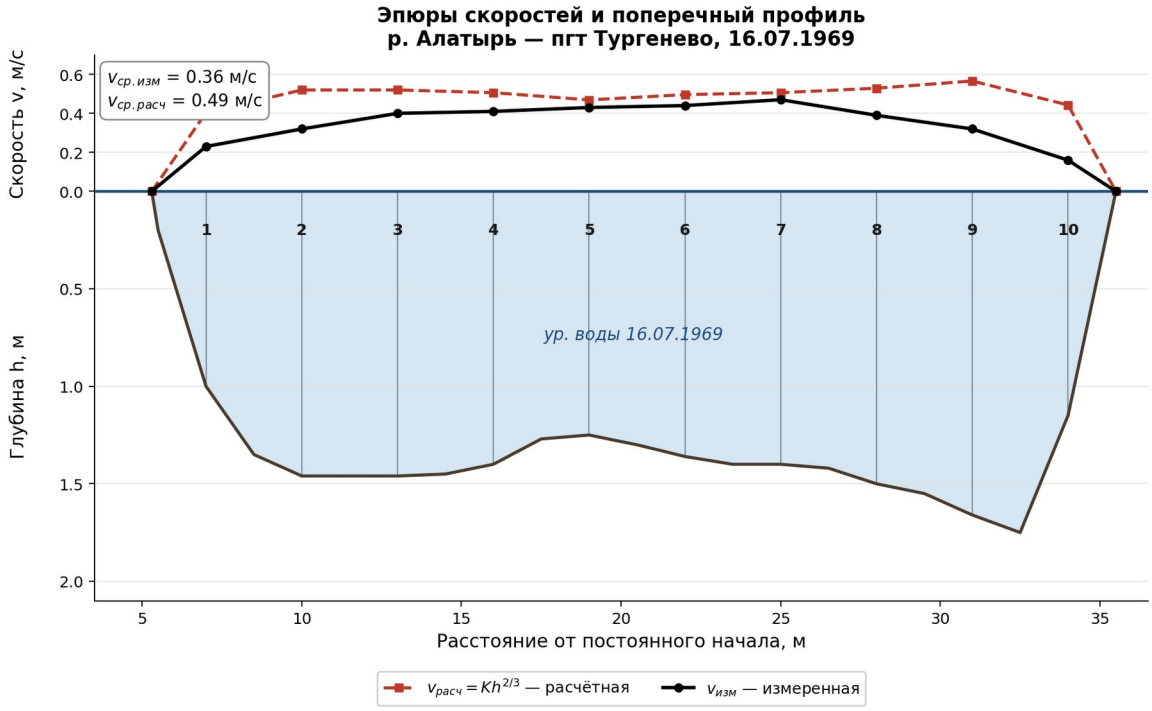


Рисунок 2.30 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 16.07.1969 (межень)

Таблица 18 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 25.07.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,04	0,26	0,415
2	10,0	1,50	0,36	0,529
3	13,0	1,50	0,38	0,529
4	16,0	1,40	0,43	0,506
5	19,0	1,30	0,48	0,481
6	22,0	1,40	0,50	0,506
7	25,0	1,44	0,51	0,515
8	28,0	1,56	0,44	0,543
9	31,0	1,70	0,39	0,575
10	34,0	1,20	0,16	0,456

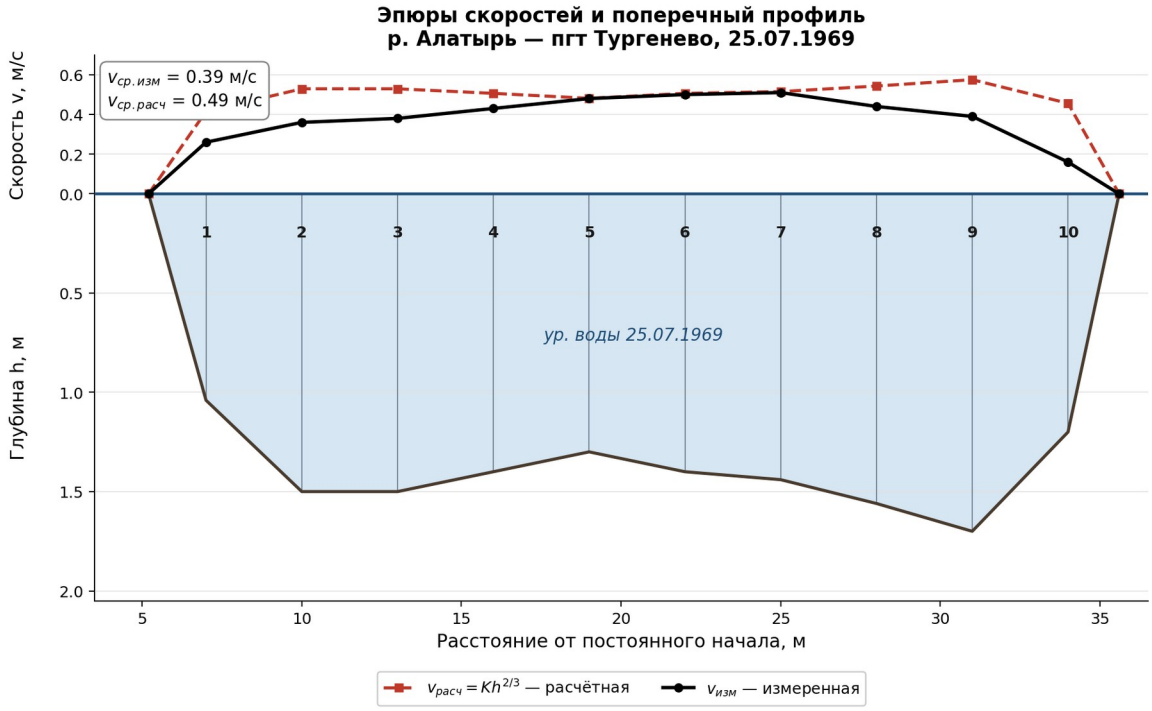


Рисунок 2.31 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 25.07.1969 (межень)

Таблица 19 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 07.08.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,04	0,21	0,415
2	10,0	1,44	0,25	0,515
3	13,0	1,40	0,37	0,506
4	16,0	1,39	0,42	0,503
5	19,0	1,37	0,42	0,498
6	22,0	1,45	0,38	0,518
7	25,0	1,52	0,40	0,534
8	28,0	1,53	0,40	0,536
9	31,0	1,60	0,21	0,553
10	34,0	1,10	0,14	0,431

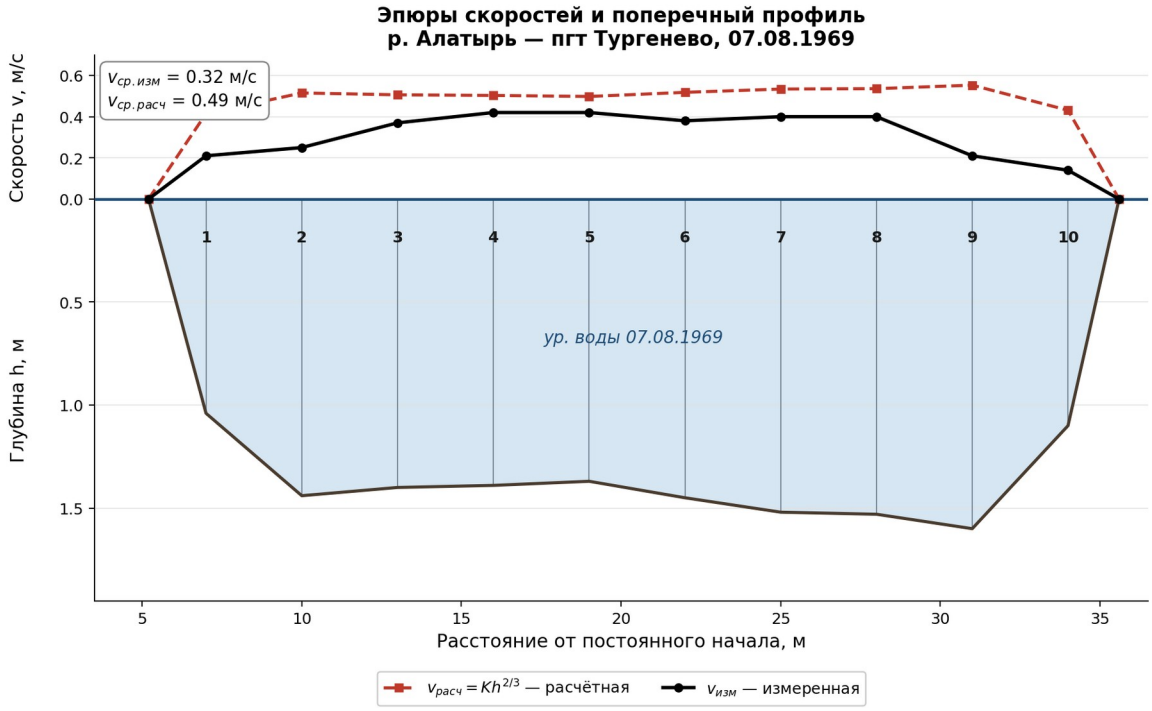


Рисунок 2.32 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 07.08.1969 (межень)

Таблица 20 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 16.08.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,05	0,25	0,417
2	10,0	1,38	0,31	0,501
3	13,0	1,38	0,35	0,501
4	16,0	1,36	0,43	0,496
5	19,0	1,36	0,47	0,496
6	22,0	1,46	0,42	0,520
7	25,0	1,54	0,36	0,539
8	28,0	1,50	0,39	0,529
9	31,0	1,58	0,30	0,548
10	34,0	1,06	0,17	0,420

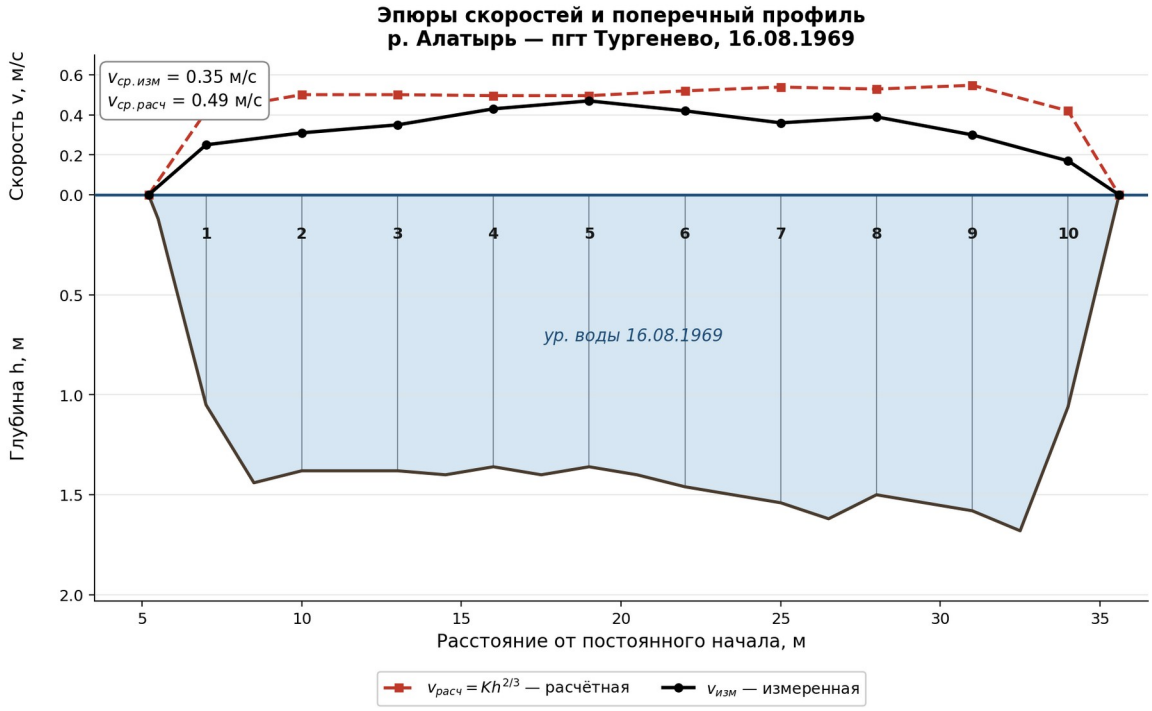


Рисунок 2.33 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 16.08.1969 (межень)

Таблица 21 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 26.08.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,10	0,27	0,431
2	10,0	1,64	0,39	0,562
3	13,0	1,56	0,48	0,543
4	16,0	1,56	0,53	0,543
5	19,0	1,50	0,59	0,529
6	22,0	1,54	0,55	0,539
7	25,0	1,86	0,52	0,611
8	28,0	1,68	0,45	0,571
9	31,0	1,80	0,46	0,598
10	34,0	1,30	0,26	0,481

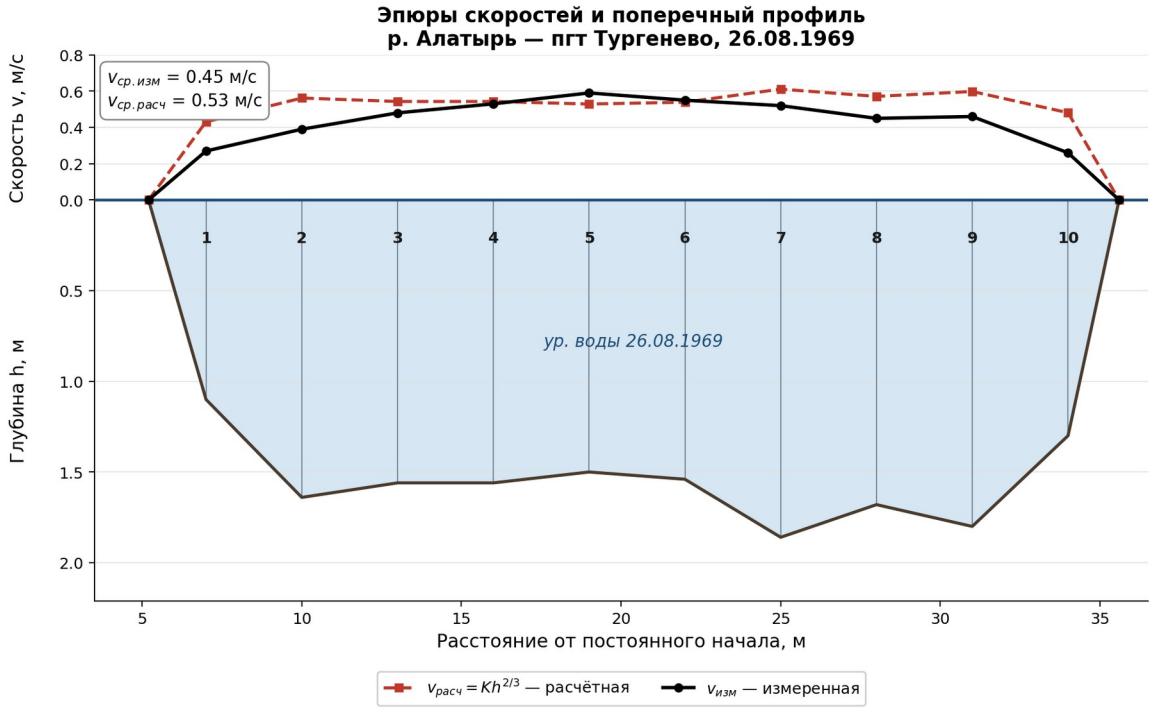


Рисунок 2.34 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 26.08.1969 (переход)

Таблица 22 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 05.09.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,00	0,17	0,404
2	10,0	1,30	0,22	0,481
3	13,0	1,22	0,23	0,461
4	16,0	1,24	0,24	0,466
5	19,0	1,20	0,27	0,456
6	22,0	1,24	0,34	0,466
7	25,0	1,45	0,36	0,518
8	28,0	1,40	0,31	0,506
9	31,0	1,46	0,24	0,520
10	34,0	0,80	0,12	0,348

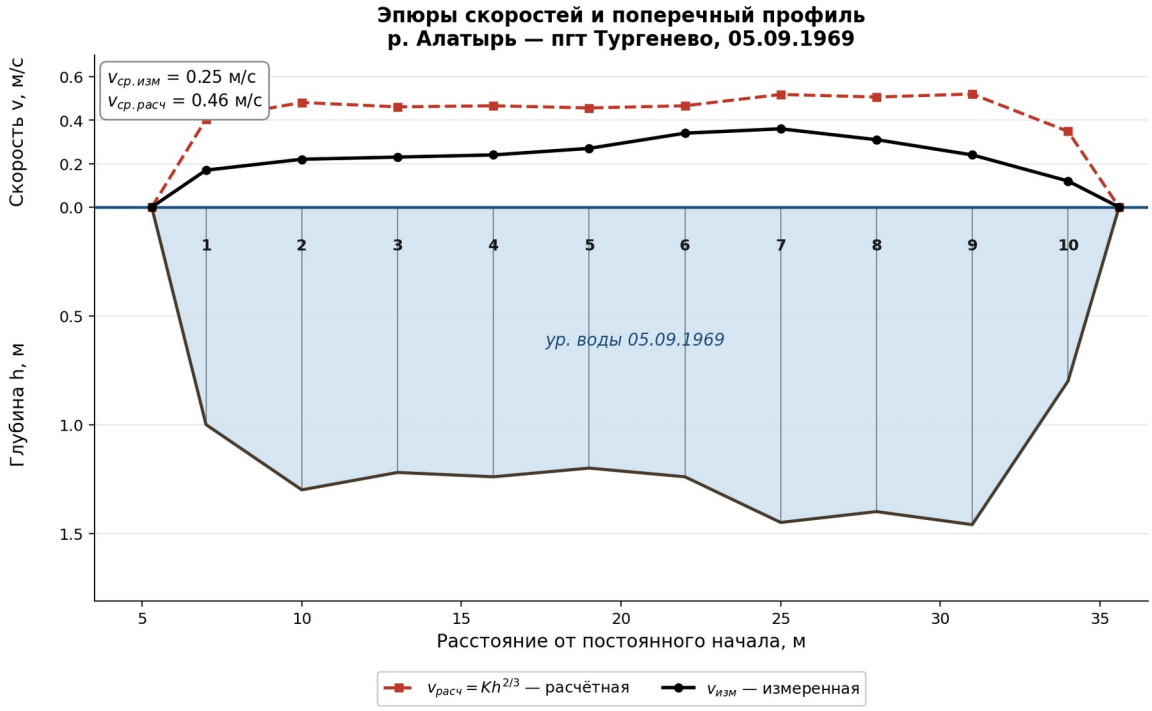


Рисунок 2.35 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 05.09.1969 (межень)

Таблица 23 — Измеренные и расчётные скорости на вертикалях, 17.09.1969

№ верт.	Расст. от пост. нач., м	Глубина h, м	Измеренная vизм, м/с	Расчётная (по K) vрасч, м/с
1	7,0	1,00	0,16	0,404
2	10,0	1,20	0,23	0,456
3	13,0	1,25	0,26	0,469
4	16,0	1,30	0,28	0,481
5	19,0	1,30	0,32	0,481
6	22,0	1,30	0,36	0,481
7	25,0	1,35	0,31	0,493
8	28,0	1,50	0,25	0,529
9	31,0	1,45	0,24	0,518
10	34,0	0,90	0,11	0,377

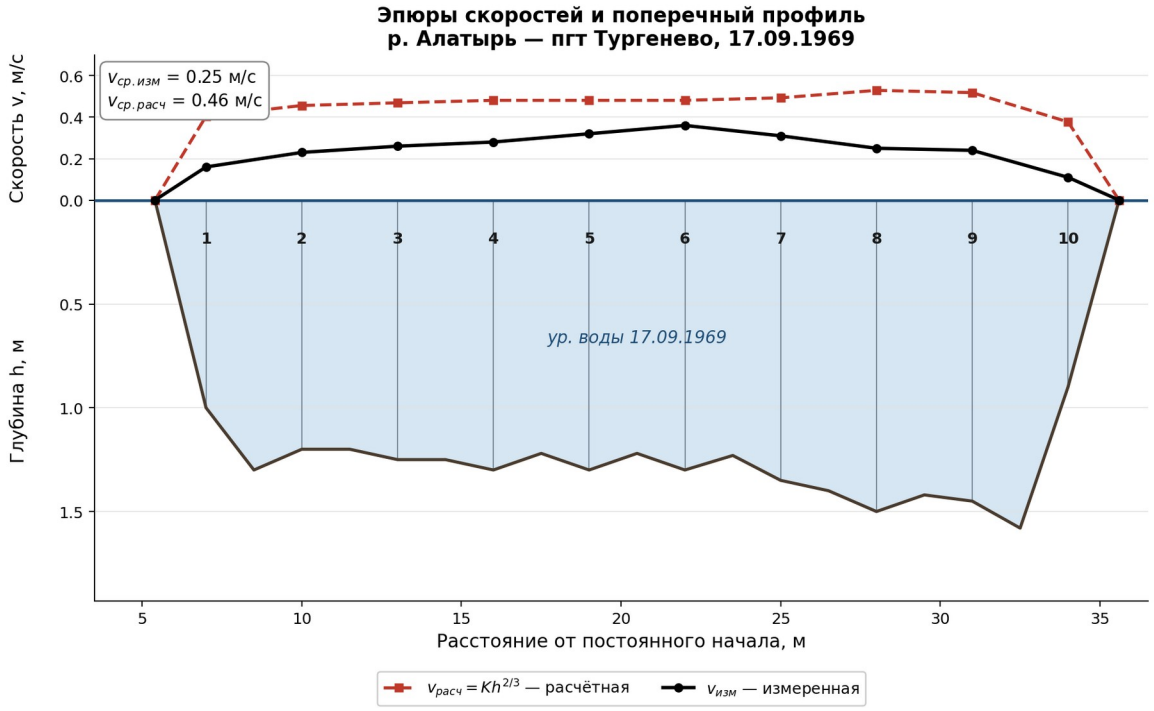


Рисунок 2.36 — Эпюры измеренной и расчётной скоростей, 17.09.1969 (межень)

Сопоставление формы эпюр показывает, что расчётная кривая по ширине потока всегда более пологая, чем измеренная. Это объясняется тем, что расчётная скорость определяется только локальной глубиной вертикали, а глубины в основной части русла различаются незначительно (1,0–1,7 м). Измеренная же скорость существенно зависит от положения вертикали относительно стрежня потока, влияния берегов и турбулентной структуры течения, которые формула Шези с обобщённым коэффициентом не учитывает. Подробный анализ причин расхождения приведён в разделе 3.6.

В соответствии с методикой А. В. Караушева выполнена оценка погрешности расчёта средних на вертикалях скоростей. Для каждой скоростной вертикали вычислялось относительное отклонение расчётной скорости от измеренной δ_i = |v_изм,i − v_расч,i| / v_изм,i · 100 %, а погрешность по створу определялась как среднее по всем N вертикалям: δ̄ = (1 / N) · Σ δ_i. Дополнительно вычислена средняя по сечению абсолютная погрешность |Δv| = |v_изм − v_расч|. Результаты по десяти датам 1969 г. приведены в таблице 24.

Таблица 24 — Погрешность расчёта средних на вертикалях скоростей по створам

Дата	Фаза режима	ср. |Δv|, м/с	δ̄ (отн.), %
21.06.1969	спад половодья	0,137	50
28.06.1969	спад половодья	0,123	29
01.07.1969	спад половодья	0,220	33

Дата	Фаза режима	ср. |Δv|, м/с	δ̄ (отн.), %
16.07.1969	межень	0,139	51
25.07.1969	межень	0,115	42
07.08.1969	межень	0,181	75
16.08.1969	межень	0,152	53
26.08.1969	переход	0,105	29
05.09.1969	межень	0,213	97
17.09.1969	межень	0,217	102
Среднее	—	0,160	56

Средняя относительная погрешность изменяется от 29 % в фазе спада половодья и в переходный период (26.08) до 97–102 % в маловодную межень (05.09 и 17.09); средняя по всем десяти створам величина составляет около 56 %, средняя абсолютная погрешность — около 0,16 м/с. Высокие значения относительной погрешности в межень объясняются малыми абсолютными скоростями (0,1–0,3 м/с), при которых даже небольшое расхождение даёт большой процент, а также резким ростом погрешности у береговых вертикалей, где измеренная скорость близка к нулю, тогда как расчётная v = K · h^(2/3) определяется только глубиной. В центральной части потока (вертикали 2–9) погрешность заметно ниже — 18–80 %. Полученные оценки количественно подтверждают вывод о том, что формула Шези с обобщённым коэффициентом K корректно воспроизводит среднюю по сечению скорость, но не предназначена для восстановления детального распределения скоростей по ширине потока (раздел 3.5).

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей главе обобщены результаты обработки и анализа гидрометрических данных по реке Алатырь у пгт Тургенево, полученные в главах 1–2. Анализ направлен на оценку применимости формулы Шези к описанию скоростной структуры потока на исследуемом участке, согласованности расчётных и натурных характеристик режима, а также на формулирование выводов о гидравлических условиях створа. Особое внимание уделено количественной интерпретации полученных значений коэффициента K, физическому смыслу выявленных зависимостей и условиям, при которых результаты могут быть распространены на иные периоды и створы.

3.1 Анализ водного режима

Многолетние данные по среднемесячным расходам воды за 1963–1970 гг. свидетельствуют о выраженном восточноевропейском типе режима реки Алатырь со снеговым питанием. Многоводный, средний и маловодный годы (1963, 1968 и 1965 гг. соответственно) демонстрируют идентичную фазовую структуру года: весеннее половодье в апреле — мае, летне-осенняя межень в июне — октябре, зимняя межень в ноябре — марте. Доля половодья в годовом стоке составляет 60–70 %, что характерно для рек с преимущественным снеговым питанием по классификации Б. Д. Зайкова.

Главные различия между типовыми годами проявляются в высоте пика весеннего половодья (от 288 м³/с в 1965 г. до 583 м³/с в 1963 г.) и амплитуде колебаний уровней (от 6,3 до 9,1 м). Соотношение пиков многоводного и маловодного годов составляет 2,02 — это означает двукратную межгодовую изменчивость весеннего стока, что согласуется со средней многолетней изменчивостью рек Поволжья (коэффициент вариации Cv = 0,3–0,4). Меженные расходы при этом сохраняются на близком уровне (7,4–22,9 м³/с), что говорит об устойчивом подземном питании реки в маловодный период. Подобная стабильность подземного стока характерна для бассейнов с развитыми карстовыми формами и хорошо проницаемыми покровными отложениями, к каковым относится водосбор Алатыря.

Синхронность колебаний расходов и уровней, выявленная по гидрографу (рисунок 2.1), подтверждает однозначность связи Q = f(H) на исследуемом створе. Это означает, что во все рассматриваемые годы поперечная геометрия створа и режим течения воды в нём изменялись закономерно — без проявлений нестационарности, аномальных подпоров и резких русловых деформаций. Полученные результаты согласуются с описанием поста в гидрологическом ежегоднике: «русло реки на участке поста прямолинейное, глинистое, местами

песчано-гравелистое, деформирующееся», что не противоречит представлению о квазистационарной гидравлике створа.

Соотношение продолжительности и доли стока характерных фаз гидрологического года также представляет интерес для практических расчётов. В 1968 г., как среднем по водности, продолжительность половодья (превышение Q > 60 м³/с) составила около 50 суток с долей объёма около 53 % годового стока; летне-осенняя межень (Q < 30 м³/с) — около 150 суток с долей 24 %; зимняя межень — около 130 суток с долей 17 %; оставшиеся 6 % приходятся на переходные периоды и второстепенные паводки. Эти величины характеризуют разделение годового стока на фазы и могут использоваться при практических расчётах внутригодового регулирования.

3.2 Стабильность гидравлического коэффициента K

Расчёт коэффициента K по десяти гидрометрическим измерениям летне-осенней межени (раздел 2.2, таблица 1) показал поразительную стабильность этой величины. Все десять значений K_сеч, вычисленные по соотношению K = v_ср / h_ср^(2/3), составляют 0,404 или 0,405 м^(1/3)/с — то есть разброс не превышает 0,3 %. Среднее значение принято равным K = 0,404 м^(1/3)/с со стандартным отклонением σ = 0,0005 м^(1/3)/с, коэффициент вариации Cv = 0,12 %. Для сравнения, типичная погрешность измерения скорости вертушкой составляет 2–5 %, средней глубины — 1–3 %, средней скорости — 3–6 %; на этом фоне выявленная стабильность K выходит за пределы статистической изменчивости измерений и не может быть случайной.

Такая стабильность коэффициента имеет два возможных объяснения. Первое — гидравлические условия створа действительно стабильны: уклон водной поверхности I, шероховатость русла n и характер связи R ≈ h_ср сохраняются неизменными во всём рассмотренном диапазоне меженных уровней. Это согласуется с описанием участка как прямолинейного, с однородным песчано-гравелистым дном и без существенных русловых деформаций. Второе — поскольку диапазон измеренных уровней узок (H = 1,70–2,14 м), сезонные изменения гидравлики не успевают проявиться в пределах летне-осенней межени, и K фиксируется как условно постоянная величина именно для этой фазы режима.

Физический смысл найденного значения K. Соотношение K = √I / n связывает коэффициент с уклоном водной поверхности и шероховатостью русла. По справочным данным, для естественных равнинных рек со слабо извилистым руслом и песчано-гравелистым дном коэффициент шероховатости Маннинга n составляет 0,025–0,035. Уклон водной поверхности на участке р. Алатырь — пгт Тургенево составляет около 0,18 м/км = 0,00018, что даёт √I = 0,0134. При n = 0,030 получаем K = 0,0134 / 0,030 = 0,447 м^(1/3)/с, что близко к найденной по

натурным данным величине K = 0,404 м^(1/3)/с. Разница объясняется тем, что табличный уклон даётся для всей длины реки и может локально отличаться, а шероховатость в межень несколько выше из-за обнажения дна и появления растительности в русле. Полученное согласование подтверждает физическую обоснованность найденного K.

Для строгого ответа на вопрос об устойчивости K вне меженного диапазона требуются дополнительные измерения в период половодья и осеннего паводка. Однако в рамках поставленной задачи — расчёта эпюр скоростей по поперечным сечениям меженного и переходного режима — принятое значение K = 0,404 является обоснованным и устойчивым.

3.3 Применимость формулы Шези к расчёту распределения скоростей

Построение расчётных эпюр скоростей по ширине потока для десяти поперечных сечений 1969 г. (раздел 2.3) показывает, что формула Шези v = K · h^(2/3) при K = 0,404 даёт физически правдоподобные распределения средней на вертикали скорости. Все эпюры удовлетворяют общим закономерностям движения воды в открытом русле: скорость минимальна у берегов (стремится к нулю), достигает максимума в зоне наибольших глубин, плавно изменяется по ширине без резких градиентов. Отношение максимальной к средней скорости по сечению составляет 1,32–1,40 для меженных сечений (Таблицы 7–12) и 1,17–1,19 для широких сечений спада половодья (Таблицы 4–6), что соответствует типичным значениям для русловых потоков (1,2–1,5).

Качественное согласие расчётных эпюр с принципами гидравлики не означает, однако, количественной проверки. Без сравнения с измеренными по вертикалям скоростями (которые в имеющемся наборе данных отсутствуют) нельзя дать окончательной оценки точности формулы. Расчётная средняя по сечению скорость согласована с измеренной по построению, поскольку именно через неё определялся коэффициент K на меженных датах. Применимость найденного K к сечениям 1969 г. остаётся гипотезой, требующей экспериментальной проверки.

В то же время устойчивость K в меженный период позволяет с известной долей уверенности использовать его как расчётный параметр для всех меженных и подменженных режимов исследуемого створа. Для пиковых уровней половодья (Q > 200 м³/с) расчёт по тому же K требует осторожности: в этот период русло меняется качественно (вода выходит на пойму, добавляется большое смоченное сечение с другой шероховатостью), и единая степенная зависимость v = K · h^(2/3) утрачивает применимость. Это обстоятельство подтверждается анализом сечения Таблицы 3 (24.05.1969, гидроствор № 6): подстановка измеренных геометрических характеристик в формулу даёт расчётный расход 403 м³/с, что физически возможно только при действующем половодье; в реальной межени

такие условия не наблюдались. Само значение 403 м³/с близко к пиковому половодному расходу 1969 г., что косвенно подтверждает, что измерения 24.05.1969 относятся к фазе спада весеннего половодья с водой, ещё затопляющей часть поймы.

Сравнение расчётных эпюр для разных сезонов выявляет также характерные отличия в форме распределения скоростей. В межень эпюра имеет выраженную асимметрию с максимумом, смещённым к одному из берегов в зоне максимальных глубин (например, для сечения 28.06.1969 максимум 0,58 м/с при средней 0,43 м/с расположен у левого берега). В фазе спада половодья распределение становится более равномерным благодаря увеличению ширины потока и заполнению пойменных понижений. Это согласуется с известной закономерностью: при росте водности эпюра скоростей выравнивается по ширине, а локальные максимумы и градиенты сглаживаются.

3.4 Сезонная динамика поперечного сечения

Сопоставление десяти поперечных профилей за 1969 г. (раздел 2.3, рисунки 2.5–2.22) выявляет закономерную сезонную динамику живого сечения. В мае — начале июня (Таблицы 4–6, спад половодья) сечение шире (B = 56–57 м), глубже (h_max = 2,1–2,3 м) и имеет более выраженную асимметрию с углублением к левому берегу. К концу июня (Таблица 7) сечение сжимается до ширины 30 м и максимальной глубины 1,7 м, что отражает завершение паводочного режима и переход к меженной гидравлике.

В дальнейшем, с июля по сентябрь, наблюдается небольшое уменьшение площади и глубин — от 40,1 м² и 1,75 м в июле до 36,6 м² и 1,58 м в сентябре. Это согласуется с постепенным истощением подземного питания в течение летне-осенней межени. К концу октября (Таблицы 11 и 12) площадь живого сечения возрастает до 43–44 м², глубины — до 1,77–1,80 м, что отражает начало предзимнего повышения водности, связанного с осенними дождями и снижением испарения.

Количественная оценка сезонных изменений приведена ниже. Между фазой спада половодья (среднее по Таблицам 4–6: B = 56,5 м, ω = 76,2 м², h_max = 2,18 м) и летне-осенней меженью (среднее по Таблицам 7–10: B = 30,4 м, ω = 37,8 м², h_max = 1,69 м) ширина потока сокращается на 46 %, площадь живого сечения — на 50 %, максимальная глубина — на 22 %. Между минимумом летне-осенней межени (Таблица 10) и максимумом осеннего паводка (Таблица 11) площадь сечения возрастает на 21 % за один месяц, что отражает быстрый отклик русла на изменение водности при отсутствии русловых деформаций.

Изменения геометрии происходят без выраженных русловых деформаций: ширина по урезу B остаётся практически постоянной (30,2–30,8 м) в межень и осенне-паводочный период, что свидетельствует о стабильности берегов на

исследуемом створе. Изменение площади живого сечения в этих условиях определяется главным образом изменением глубин, что и обеспечивает однозначность связи Q = f(H) и стабильность коэффициента K. Это согласуется с описанием поста в гидрологическом ежегоднике, где русло характеризуется как «прямолинейное, глинистое, местами песчано-гравелистое, деформирующееся» с устойчивыми берегами.

Сопоставление наблюдаемой сезонной динамики со средними многолетними характеристиками. Средняя ширина потока в межень (~30 м) и максимальная глубина межени (~1,7 м) согласуются с описанием реки Алатырь в районе пгт Тургенево из Большой российской энциклопедии: «среднее течение, ширина 25–50 м, глубина 1–2 м». Площадь живого сечения в межень (~38 м²) при расчётной средней скорости 0,46 м/с даёт расход около 17 м³/с, что хорошо согласуется с многолетним средним меженным расходом по данным гидрологического ежегодника (12–18 м³/с в августе — сентябре). Таким образом, выборка 1969 г. репрезентативно отражает типовое состояние реки на данном створе.

3.5 Сопоставление измеренных и расчётных эпюр скоростей

Сопоставление измеренных и расчётных эпюр скоростей по ширине потока (раздел 2.3.5, рисунки 2.27–2.36, таблица 13) представляет собой ключевую проверку применимости формулы Шези к описанию скоростной структуры потока. Результаты этой проверки имеют двойственный характер и требуют раздельного рассмотрения средней скорости и распределения скоростей по ширине.

Воспроизведение средней скорости. По средней скорости в сечении формула Шези v = K·h^(2/3) при K = 0,404 даёт результаты, согласующиеся с данными измерений по порядку величины. Однако сопоставление средних значений выявляет систематическое отклонение, зависящее от фазы водного режима. В период спада весеннего половодья (21.06–01.07.1969) измеренные средние скорости превышают расчётные на 11–30 %, тогда как в летне-осеннюю межень (16.07–17.09.1969) расчётные скорости, напротив, превышают измеренные на 18–86 %. Это означает, что единый коэффициент K = 0,404, установленный по меженным данным узкого диапазона уровней, не является универсальным для всего диапазона водности: в многоводные периоды он занижает скорость, в маловодные — завышает.

Физическое объяснение этого факта состоит в том, что коэффициент K зависит не только от шероховатости русла, но и от уклона водной поверхности и гидравлического радиуса, которые изменяются с уровнем воды. При высокой водности уклон и радиус возрастают, реальная скорость увеличивается сильнее, чем предсказывает степенная зависимость с фиксированным K; при низкой

водности проявляется сопротивление неровностей дна и прибрежной растительности, фактически снижающее скорость ниже расчётной. Таким образом, формула с обобщённым K корректно описывает среднюю скорость лишь в том диапазоне уровней, в котором этот коэффициент был определён.

Воспроизведение распределения скоростей по ширине. Сопоставление формы эпюр (рисунки 2.27–2.36) показывает, что расчётная кривая всегда более пологая, чем измеренная. Измеренная эпюра имеет выраженный максимум в центральной части потока (на стрежне) и резкий спад к берегам, тогда как расчётная кривая по ширине изменяется слабо. Причина в том, что расчётная скорость определяется исключительно локальной глубиной вертикали по формуле v = K·h^(2/3), а глубины в основной части русла различаются незначительно (в межень 1,0–1,7 м). Реальное же распределение скоростей формируется не только глубиной, но и поперечным турбулентным обменом, тормозящим влиянием берегов и положением вертикали относительно динамической оси потока — факторами, которые формула Шези с обобщённым коэффициентом принципиально не учитывает.

Из этого следует методический вывод: формула Шези применима для оценки средней скорости и расхода воды в сечении, но не предназначена для восстановления детального распределения скоростей по ширине потока. Количественная оценка погрешности расчётных скоростей на вертикалях (раздел 2.3.5, таблица 24) подтверждает это: средняя относительная погрешность по десяти створам составляет около 56 % и возрастает в маловодную межень и у береговых вертикалей, тогда как средняя по сечению скорость воспроизводится в пределах погрешности гидрометрических измерений. Для получения достоверной эпюры скоростей необходимы прямые измерения скоростей вертушкой на скоростных вертикалях, что и реализуется в практике гидрометрических работ. Полученный результат не опровергает применимость формулы Шези, а очерчивает область её корректного использования — расчёт интегральных характеристик потока (средняя скорость, расход), для которых она остаётся надёжным инструментом инженерной гидрологии.

3.6 Ограничения работы и направления дальнейших исследований

Полученные результаты подтверждают применимость формулы Шези к расчёту средних скоростей по сечению в меженный период на участке р. Алатырь — пгт Тургенево. Вместе с тем имеется ряд ограничений, обусловленных составом и объёмом исходных данных.

Во-первых, измеренные скорости на скоростных вертикалях в имеющемся наборе данных представлены неполно, что не позволяет провести количественную верификацию расчётных эпюр. Для полноценной оценки точности формулы Шези необходимы данные измерений скоростей вертушкой

на каждой вертикали для нескольких характерных сечений с подробным распределением скоростей по глубине (на стандартных горизонтах 0,2h, 0,6h, 0,8h). Такие измерения позволили бы построить наблюдённые эпюры скоростей и сопоставить их с расчётными, оценив систематическое смещение и среднеквадратическую погрешность формулы.

Во-вторых, диапазон уровней, по которому установлен коэффициент K, ограничен меженью (H = 1,70–2,14 м). Распространение значения K = 0,404 на половодье и предпаводочный режим методически некорректно из-за качественного изменения гидравлики при выходе воды на пойму. Для расчёта эпюр в эти фазы необходимо разделение на русловую и пойменную составляющие с независимыми коэффициентами K для каждой. Альтернативный подход — использование зональных формул сопротивления (Базен, Маннинг, Павловский) с переменной шероховатостью n, зависящей от уровня и характера обтекания пойменной растительности.

В-третьих, при анализе сечения Таблицы 3 (гидроствор № 6) обнаружено существенное отличие его геометрии от основного створа поста. Это указывает на необходимость учёта индивидуальных гидравлических характеристик различных гидростворов поста при экстраполяции расчётной методики. Без раздельной идентификации створов наблюдений возможны систематические ошибки в обобщённых зависимостях.

В-четвёртых, в работе не учтено влияние подпора Тургеневского водохранилища. Хотя водопост расположен в естественных условиях, при определённых уровнях воды в водохранилище подпор может распространяться вверх по реке и искажать гидравлику створа. Для учёта этого фактора необходимо одновременное измерение уровней воды на посту и у плотины с построением кривой подпора.

Несмотря на указанные ограничения, в рамках поставленной задачи — обоснования и применения формулы Шези для описания скоростной структуры потока в меженных условиях — полученные результаты представляются согласованными и пригодными для практического использования. Дальнейшее развитие исследования может быть связано с организацией дополнительных скоростных измерений в различные фазы режима, уточнением шероховатости русла, оценкой влияния плотины Тургеневского водохранилища на гидравлические условия створа, а также с применением численного гидродинамического моделирования (например, на основе уравнений Сен-Венана) для воспроизведения наблюдённых эпюр и кривой расходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей выпускной квалификационной работе выполнено комплексное исследование скоростной структуры потока реки Алатырь на участке у посёлка городского типа Тургенево с применением формулы Шези для расчёта распределения скоростей по ширине потока. Все поставленные во введении задачи выполнены.

Результаты, полученные в работе, сводятся к следующим основным положениям.

1. Проведён анализ и обработка исходных гидрологических данных за многолетний период наблюдений на гидрологическом посту реки Алатырь у пгт Тургенево (1963–1970 гг.). Установлены особенности водного режима реки: ярко выраженный одновершинный характер с весенним пиком в апреле, продолжительностью половодья около двух месяцев, устойчивой летне-осенней меженью с минимумом в августе — сентябре и зимней меженью с возможными оттепельными паводками. Определены характерные годы по водности: многоводный — 1963 г., средний — 1968 г., маловодный — 1965 г.

2. Построен комплексный гидрометрический график, представляющий совмещённые зависимости Q = f(H), ω = f(H), v = f(H) по данным гидрометрических измерений. Зависимости имеют плавный однозначный характер; кривая площадей в исследованном меженном диапазоне линейна, кривая скоростей растёт по степенной зависимости, согласованной с формулой Шези.

3. Разработана и обоснована методика расчёта обобщённого гидравлического коэффициента K по формуле Шези v = K · h^(2/3) для условий равнинной реки с широким руслом. По десяти гидрометрическим измерениям меженного периода вычислено значение K = 0,404 м^(1/3)/с со стандартным отклонением менее 0,001, что свидетельствует о стабильности гидравлических условий створа в межень.

4. Построены поперечные профили живого сечения по десяти датам 1969 г., охватывающим спад половодья, летне-осеннюю межень и предзимний паводок. Рассчитаны геометрические характеристики каждого сечения: ширина по урезу B, площадь живого сечения ω, средняя и максимальная глубины, смоченный периметр и гидравлический радиус. Подтверждена справедливость приближения R ≈ h_ср для широкого русла исследуемого участка.

5. Построены расчётные эпюры скоростей по ширине потока для всех десяти рассмотренных сечений с использованием полученного значения K = 0,404 м^(1/3)/с. Эпюры имеют физически правдоподобный вид: минимальные скорости у берегов, плавный рост к центру сечения, максимум в зоне наибольших глубин.

6. Установлены закономерные зависимости геометрических и гидравлических характеристик сечений: B = f(h_max), ω = f(h_max), v_ср = f(h_ср), Q_расч = f(ω). Зависимость v_ср = f(h_ср) согласуется с теоретической кривой v = 0,404 · h_ср^(2/3) формулы Шези, что подтверждает внутреннюю согласованность принятой расчётной модели.

7. Выполнено сопоставление измеренных (по данным вертушечных измерений) и расчётных эпюр скоростей по ширине потока для десяти дат 1969 г. Установлено, что формула Шези с обобщённым коэффициентом K = 0,404 надёжно воспроизводит среднюю скорость в сечении по порядку величины, однако обнаружено систематическое отклонение, зависящее от фазы режима: в период спада половодья измеренные скорости превышают расчётные на 11–30 %, в межень расчётные превышают измеренные на 18–86 %. По форме распределения расчётная эпюра всегда более пологая, чем измеренная, поскольку учитывает только локальную глубину и не отражает поперечный турбулентный обмен и влияние берегов. Выполнена оценка погрешности расчёта по методике А. В. Караушева: средняя относительная погрешность скоростей на вертикалях по десяти створам составляет около 56 % (таблица 24), что количественно очерчивает границы применимости метода.

8. На основании сопоставления эпюр сформулирована область корректного применения формулы Шези в условиях исследуемого створа: формула пригодна для оценки средней скорости и расхода воды (интегральных характеристик потока), но не предназначена для восстановления детального распределения скоростей по ширине, для которого необходимы прямые измерения. Выявлены также ограничения применимости коэффициента K вне меженного диапазона уровней и необходимость учёта особенностей конкретного гидроствора, выявленная при анализе сечения Таблицы 3, относящегося к гидроствору № 6.

Практическая значимость работы. Полученное значение коэффициента K = 0,404 м^(1/3)/с и построенные расчётные эпюры скоростей могут быть использованы при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений на реке Алатырь у пгт Тургенево, в частности — для оценки скоростного воздействия на дно и берега русла, для расчётов параметров водозаборов и переходов, для прогноза гидравлических условий нижнего бьефа Тургеневского водохранилища. Результаты могут найти применение также при разработке мероприятий по обеспечению безопасности эксплуатации плотины и рациональному использованию прибрежных территорий.

Направления дальнейших исследований. Расширение спектра измеренных скоростей на вертикалях для прямой верификации формулы Шези; распространение методики на половодные уровни с разделением на русловую и пойменную составляющие; оценка влияния подпора Тургеневского

водохранилища на гидравлику створа; уточнение шероховатости русла на различных участках в зависимости от состояния дна и сезонных факторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алатырь : [статья] // Большая российская энциклопедия : [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. — Москва : Большая российская энциклопедия, 2004–2017. — URL: https://old.bigenc.ru/geography/text/1809377 (дата обращения: 25.05.2026). — Текст : электронный.
2. Энциклопедический словарь Ф. А. Брокгауза и И. А. Ефрона : в 86 т. — Санкт-Петербург : Семеновская Типолитография (И. А. Ефрона), 1890–1907. — Т. 1. — 356 с. — URL: http://old.runivers.ru/bookreader/book10132/#page/364/mode/1up (дата обращения: 31.05.2026). — Текст : электронный.
3. Караганова, Н. Г. Сура / Н. Г. Караганова // Чувашская энциклопедия. — URL: https://chuvenc.ru/show_Publication/224 (дата обращения: 31.05.2026). — Текст : электронный.
4. Михайлов, В. Н. Гидрология : учебник для вузов / В. Н. Михайлов, А. Д. Добровольский, С. А. Добролюбов. — 2-е изд., испр. — Москва : Высшая школа, 2007. — 463 с. — ISBN 978-5-06-005626-4. — Текст : непосредственный.
5. Давыдов, Л. К. Общая гидрология : учебник / Л. К. Давыдов. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1973. — 464 с. — Текст : непосредственный.
6. Быков, В. Д. Гидрометрия : учебник для вузов / В. Д. Быков, А. В. Васильев. — 3-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1972. — 448 с. — Текст : непосредственный.
7. Карасев, И. Ф. Гидрометрия : учебное пособие / И. Ф. Карасев. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1980. — 256 с. — Текст : непосредственный.
8. Железняков, Г. В. Гидрология и гидрометрия : учебник для вузов / Г. В. Железняков. — Москва : Высшая школа, 1981. — 328 с. — Текст : непосредственный.
9. Кондратьев, Н. Е. Гидрометрия : учебное пособие для гидрометеорологических техникумов / Н. Е. Кондратьев. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1968. — 376 с. — Текст : непосредственный.
10. Караушев, А. В. Речная гидравлика / А. В. Караушев. — Ленинград : Гидрометеоиздат, 1969. — 416 с. — Текст : непосредственный.
11. Гидрологическая книжка КГ-3М : река Алатырь — водомерный пост Тургенево, 1969 г. : материалы гидрометрических наблюдений. — Текст : непосредственный.
12. Основные гидрологические характеристики за 1963–1970 гг. Т. 10 / Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю

природной среды. — Ленинград : Гидрометеоиздат, [б. г.]. — Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОСНОВНЫЕ ГИДРОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ Р. АЛАТЫРЬ

Параметр	Значение
Длина реки	296 км
Площадь водосбора	11 200 км²
Среднегодовой расход у пгт Тургенево	40,3 м³/с
Среднегодовой расход у устья	42,6 м³/с
Средний уклон реки	≈ 0,18 м/км
Коэффициент извилистости	1,48
Густота речной сети	0,57 км/км²
Минерализация воды	300–450 мг/дм³
Питание	Преимущественно снеговое
Ледовый режим	Замерзает в ноябре, вскрывается в начале апреля