

УДК 556.08

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГИДРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ
НА ГОРНЫХ РЕКАХ

А. В. ЮХНО *, А. А. ОСТАШОВ **, Е. С. КОМАРНИЦКИЙ ***, Е. Н. ВЛАСОВА ****

*Государственный гидрологический институт (ФГБУ ГГИ),
Санкт-Петербург, Россия*

В статье рассмотрены результаты апробации фотогидрометрического метода (ФГМ) для определения расходов воды в широком диапазоне изменения скоростей течения на горных реках бассейна Кубани. Цель исследования заключается в оценке применимости предлагаемой технологии как доступного, неинтрузивного и нетрудоемкого метода для непрерывного гидрологического мониторинга расходов воды горных рек. В рамках апробации данного метода расходы воды измерялись как с помощью гидрометрической вертушки, так и ФГМ. Авторами разработан алгоритм оценки качества измерения, основанный на сравнительном статистическом и графоаналитическом анализе полей поверхностных скоростей течения. Дополнительно проведено исследование эмпирических распределений скоростей течения по глубине потока и даны их обобщенные численные оценки. Сделаны выводы о специфике применения ФГМ и даны рекомендации для определения расхода воды на горных реках с его помощью.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.3.645>

Keywords: LSPIV, water discharge, surface velocity, mountain streams, turbulence, flow assessment.

Введение. Определение расходов воды на горных реках, особенно в их верховьях, на участках с бурным течением (образованием турбулентных вихрей, валов, воронок, спиральных течений), всегда являлось нетривиальной и трудоемкой задачей. Любой интрузивный (подразумевающий непосредственное нахождение человека в створе водного потока) метод ограничен, прежде всего, соображениями безопасности. Так, согласно [1], гидролог не может переправляться через реку вброд при скоростях течения 1 м/с и 2 м/с при глубинах больше 0,7 м и 0,5 м соответственно. Применение плавсредств в таких условиях также практически исключено. Поэтому в гидрометрической практике на горных реках широкое применение получили неинтрузивные и косвенные методы измерения расхода воды.

* E-mail: artem-ardene@mail.ru

** E-mail: ostandr52@yandex.ru

*** E-mail: egor.koma@bk.ru

**** E-mail: vlasovakaty2002@gmail.com

На горных реках традиционно применяется либо поплавковый метод, либо измерения производятся стандартными средствами измерения (СИ) с гидрометрических установок. Точность первого метода не раз ставилась под сомнение в научных трудах и при лабораторных испытаниях [2], он до сих пор модернизируется рядом авторов [3, 4] для получения более устойчивых результатов. Гидрометрические установки часто подвергаются негативным факторам воздействия окружающей среды, требуют высоких трудозатрат и капиталовложений. На горных реках также широкое распространение получил метод смещения, или “ионного паводка”, но его применение ограничено максимальным значением расхода воды, которое возможно измерить с применением общедоступных индикаторов, например, можно зафиксировать не более 30–40 м³/с с применением поваренной соли [5].

Анализ научной литературы и опыта развития гидрологических сетей наблюдения позволил выделить четыре основных метода ведения учета стока, которые можно отнести к актуальным для использования на горных реках: фотогидрометрический (ФГМ) метод [6, 7], радарные измерители поверхностных скоростей течения [8], стационарные доплеровские профилографы течений берегового позиционирования [9], реже, методы смещения, основанные на применении флюоресцирующих индикаторов [10]. Метод ФГМ (известный в зарубежной практике под названием крупномасштабный анализ последовательных кадров видеосъемки (LSPIV)), зарекомендовал себя как наименее интрузивный, оптимальный для учета стока в речных (турбулентных) потоках с нормативной точностью. Активная разработка и усовершенствование технологий компьютерного зрения позволяет сделать этот метод основой непрерывного и автономного учета стока на гидрологических пунктах наблюдений. Данная технология названа ключевой в системе пунктов наблюдения нового поколения гидрологической сети USGS – NGWOS [11].

В настоящей работе представлены результаты апробации метода ФГМ для определения расходов воды на горных реках бассейна Кубани, где техническая оснащенность сети гидрологических наблюдений основана на использовании стандартных СИ. Характерно, что большинство расходов воды на горных реках, относящихся к Карачаево-Черкесскому центру по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС), измеряется поплавковым методом (93%). Этот же метод является преобладающим наравне с применением гидрометрической вертушки на реках Краснодарского ЦГМС (40%) [12]. На горных реках Адыгейского ЦГМС расходы измеряются преимущественно с гидрометрических установок (86,2%), что существенно ограничивает возможность измерения максимальных расходов воды [12]. В основном на рассматриваемых постах производятся наблюдения за уровнем воды по стационарным рейкам и сваям, а расходы воды измеряются гидрометрическими вертушками в меженный период, а в период половодья и паводков – поплавками. Применение метода ФГМ для определения расходов воды рек данного бассейна, особенно в их верховьях, позволило бы в значительной мере повысить качество оценки максимального стока и оперативность прогнозирования развития паводков.

Объекты исследования. Сравнительное определение расходов воды методами ФГМ и “скорость–площадь” проводилось на 11 реках и 16 пунктах наблюдения (ПН) Краснодарского края, Республики Адыгея и Карачаево-Черкесской Республики. Еще на трех реках производились детальные измерения только скоростей течения по глубине потока для эмпирической оценки их распределения (рис. 1, табл. 1).

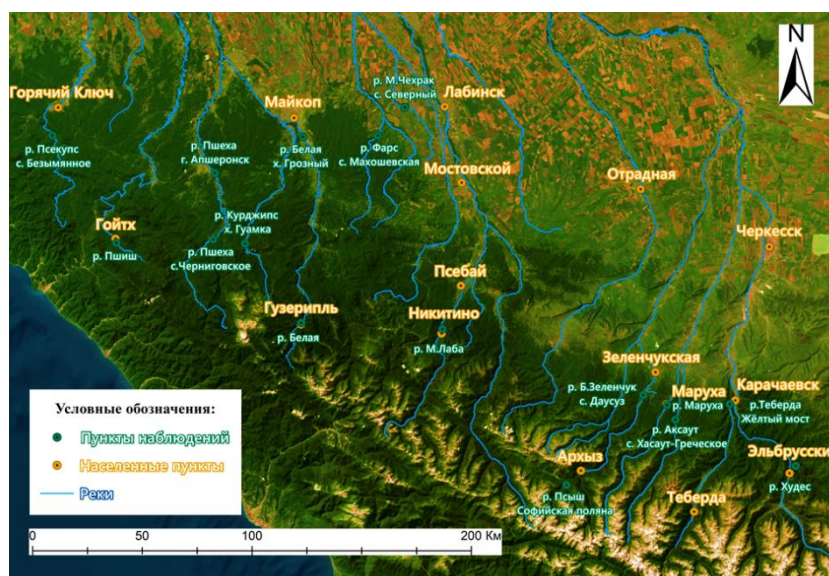


Рис. 1. Схема расположения ПН для апробации метода.

Таблица 1

Характеристика измеренных расходов воды

Река – пост	Q , $м^3/с$	F , $м^2$	Скорости течения, $м/с$				K_1 , ср.сеч.	B , $м$	h_{max} , $м$
			$V_{ср.}$	V_{max}	$V_{пов.ср.}$	$V_{пов.max}$			
Малая Лаба – с. Никитино	7,49	19,7	0,38	0,80	0,36	0,80	1,06	36,5	0,92
Малый Чохрак – х. Северный	0,24	0,43	0,62	1,00	0,77	1,00	0,81	3,15	0,32
Курджице – х. Гуамка	4,63	7,75	0,60	1,91	0,77	1,33	0,78	12,6	1,10
Пшеха – с. Черниговское	10,6	7,30	1,57	2,48	1,61	2,48	0,98	13,8	0,70
Пшеха – г. Апшеронск (1)	17,6	27,9	0,63	0,91	0,64	0,90	0,98	32,4	1,44
Пшиш – с. Гойтх	0,59	3,03	0,19	0,34	0,17	0,34	1,14	15,2	0,53
Маруха – с. Маруха	2,76	2,04	1,36	2,33	1,40	2,20	0,97	5,90	0,55
Фарс – ст. Махошевская	0,08	0,30	0,31	0,38	0,33	0,38	0,95	3,90	0,13
Псекупс – с. Безымянное	0,05	0,46	0,13	0,30	0,15	0,29	0,87	4,20	0,21
Белая – пос. Гузерипль	15,7	23,6	0,66	1,77	1,10	1,67	0,60	18,8	1,97
Белая – х. Грозный (1)	28,4	57,8	0,51	1,33	0,77	1,24	0,66	45,3	2,30
Пшеха – г. Апшеронск (2)	5,24	19,2	0,28	0,46	0,32	0,41	0,86	26,0	1,16
Пшеха – г. Апшеронск (3)	2,85	14,1	0,20	0,43	0,25	0,35	0,81	26,8	0,93
Белая – х. Грозный (2)	15,8	40,9	0,39	0,83	0,46	0,79	0,84	42,0	1,41
Аксаут – с. Хасаут-Греческое	9,24	7,62	1,21	2,09	1,54	2,09	0,79	13,8	0,74
Теберда – Желтый мост	17,3	15,8	0,98	1,85	1,11	1,85	0,88	32,9	0,68
Псыш – Софийская поляна	5,58	6,03	0,93	1,62	1,05	1,62	0,88	12,2	0,70
Б. Зеленчук – с. Даусуз	13,4	13,6	0,99	1,74	1,20	1,74	0,82	24,0	0,83
Худес – ПГТ Эльбрусский	8,01	6,43	1,25	1,81	1,48	1,81	0,84	12,0	0,80

Апробация метода ФГМ производилась в широком спектре гидродинамических условий: значения поверхностных скоростей течения изменялись в диапазоне от 0,03 до 2,48 м/с, средние скорости по всему сечению потока – от 0,13 до 1,57 м/с. Подробная информация о характеристиках измеренных расходов воды (F – площадь живого сечения потока, м²; $V_{\text{ср.}}$, V_{max} – средние и максимальные скорости течения в створе измерения, м/с; $V_{\text{пов.ср.}}$, $V_{\text{пов.max}}$ – средние и максимальные поверхностные скорости течения, м/с; $K_{1,\text{ср.сеч.}}$ – коэффициент перехода от поверхностной к средней скорости течения по всему сечению потока; B – ширина русла, м; h_{max} – максимальная глубина, м), полученных стандартными средствами измерений, представлена в табл. 1.

Створы и условия для сравнительных измерений подбирались таким образом, чтобы полученную выборку можно было считать репрезентативной для оценки применимости технологии ФГМ в рамках непрерывного гидрологического мониторинга на горных реках.

Материалы и методы исследования. Расход воды Q по методу ФГМ определяется умножением средней поверхностной скорости по сечению потока на коэффициент перехода от поверхностной к средней скорости по всему сечению потока:

$$Q = V_{\text{пов.ср.}} \cdot K_{1,\text{ср.сеч.}}$$

Коэффициент $K_{1,\text{ср.сеч.}}$, как правило, назначается не индивидуально для каждого створа, а унифицировано для той или иной гидродинамической структуры потока [13]. В рамках настоящей работы производились сравнительные измерения поверхностных скоростей течения гидрометрической вертушкой и с помощью обработки видеосъемки методом ФГМ, а также определялись характерные распределения скоростей течения по глубине потока для эмпирического обоснования и возможной унификации переходного коэффициента $K_{1,\text{ср.сеч.}}$ для определения расхода воды горных рек.

Определение эмпирических распределений скоростей течения по глубине потока. На каждом из створов производились измерения скоростей течения детальным методом согласно [14]. В качестве основного СИ скоростей течения использовалась гидрометрическая вертушка ИСП-1М с винтом 70 мм. Измерения производились вброд (рис. 2, а) с лодки или с гидрометрических устройств и люлечных переправ (рис. 2, в). В основном съемка методом ФГМ производилась с рук, но был также произведен ряд сравнительных экспериментов со съемкой с самодельного штатива (рис. 2, б).

Каждая эпюра скоростей течения, полученная по результатам измерения гидрометрической вертушкой, обрабатывалась графоаналитическим способом с определением нескольких характеристик: средняя скорость течения $V_{\text{ср.}}$, поверхностная скорость течения $V_{\text{пов.}}$, коэффициент отношения средней скорости течения к поверхностной $K_1 = V_{\text{ср.}}/V_{\text{пов.}}$ и глубина средней скорости ($h_{V_{\text{ср.}}}$). Затем каждая эпюра представлялась в относительных единицах, где каждая скорость на том или ином горизонте (V_i) делилась на среднюю скорость течения на эпюре $V_i = V_i/V_{\text{ср.}}$. На основании данных эмпирических распределений скоростей течения в относительном виде $V_i = f(h)$ был установлен усредненный коэффициент перехода от поверхностной скорости течения к

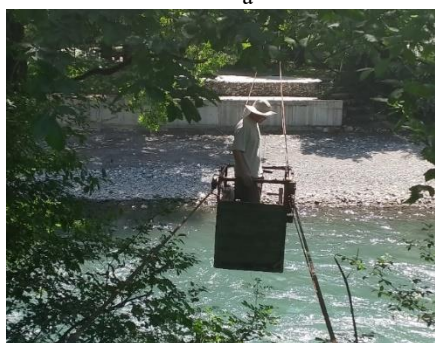
средней по отдельным эпюрам (K_1). В дальнейшем именно он использовался для расчета расхода воды для всех рек. Этот подход необходим для понимания возможности унификации методики (ее распространения на разные створы измерения с одинаковыми параметрами). Дополнительно оценивался коэффициент $K_{1, \text{ср.сеч.}}$ как отношение средней по сечению скорости потока к средней поверхностной скорости в створе измерения.



а



б



в

Рис. 2. Измерение поверхностных скоростей течения:

- а) вброд;
- б) видеосъемка со штатива;
- в) видеосъемка с люлечной переправы.

Определение скоростей течения с помощью видеосъемки и метода ФГМ. Для оценки скоростей течения по видеосъемки изначально выше и ниже створа измерения необходимо назначить четыре маркерные точки-ориентиры (по две на каждом из берегов реки) таким образом, чтобы все они входили в объектив камеры. Маркерные точки обозначаются на местности видимыми знаками (цветными конусами) и служат для дальнейшей геометрической трансформации съемки – определения соотношения натурального расстояния на местности к расстоянию в пикселях на фрагменте видеосъемки. Для этого необходимо производить измерение расстояний между маркерными точками. В рамках настоящего исследования оно проводилось с помощью мерной ленты, ГНСС оборудования или оптического нивелира. Съемка видео должна проводиться таким образом, чтобы на поверхности реки можно было различить трассеры – естественные (пузырьки воздуха, выходы турбулентных вихрей на поверхность) или влекаемые (наносы, сор, пена) частички, по перемещению которых можно оценить поверхностную скорость потока [15].

Видеосъемка в створах рек производилась со стандартных смартфонов с разрешением видео 1920×1080 пикселей, что обеспечивало достаточную

детализацию для точного отслеживания движения трассеров на поверхности воды. Частота съемки составляла 30 кадров в секунду. Большинство съемок проводилось без оптической стабилизации изображения, часть съемок – при недостаточной освещенности или под влиянием цифрового шума, который мог быть ошибочно интерпретирован программным обеспечением (ПО) как движение трассеров.

Обработка видео производилась в общедоступном ПО FUDAA-LSPIV [16]. В программную среду импортировались видеотрекеры съемки потока длительностью 10 с, что соответствует оптимальному балансу между репрезентативностью данных и вычислительной нагрузкой. Затем, для устранения искажений перспективы выполнялась геометрическая коррекция (ортотрансформация) съемки. На изображении маркировались четыре контрольные точки с известными расстояниями, измеренными в полевых условиях. Алгоритм преобразования основывался на трансформации изображения в метрическую систему координат, что обеспечило пространственную привязку данных. В расчетах задавались ключевые параметры анализа: параметры расчетной сетки (в эксперименте это 10 створов с 50 точками в каждом), размер области опроса (30 пикселей) и размер области поиска (10 пикселей), определенный исходя из ожидаемой максимальной скорости течения (0,10–2,50 м/с). Расчет мгновенных скоростей выполнялся методом кросскорреляционного анализа перемещений трассеров между последовательными кадрами. Для повышения достоверности данных применялась постобработка, включающая фильтрацию скоростей. Фильтрация скоростей осуществлялась путем удаления выбросов с использованием пороговых значений скорости и направления векторов. Результаты экспортировались в виде таблиц со значениями поверхностных скоростей течения в каждой точке проекта.

Алгоритм оценки качества измерения и анализ сравнительных измерений поверхностных скоростей течения. Алгоритм оценки качества измерения основан на сравнительном статистическом и графоаналитическом анализе полей поверхностных скоростей течения. На первом этапе его реализации осуществлялась привязка поверхностных скоростей течения, полученных в ПО FUDAA-LSPIV, к створу производства измерения скоростей течения с помощью гидрометрической вертушки с визуализацией в двух проекциях: согласно ракурсу съемки (рис. 3, а) и видом сверху (рис. 3, б).

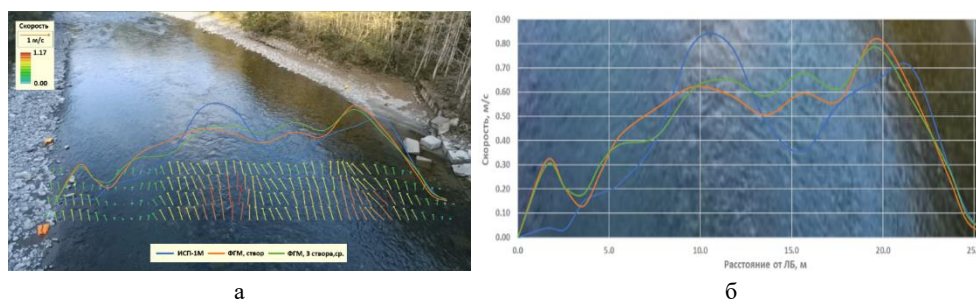


Рис. 3. Визуализация сравнения поверхностных скоростей течения в проекциях вида створа (а) и вида сверху (б).

На втором этапе проводилась численная оценка разности значений поверхностных скоростей течения, полученных с использованием ФГМ и измеренных гидрометрической вертушкой. В качестве численных показателей сопоставимости значений использовались следующие величины – теснота связи в виде коэффициента детерминации между соответствующими значениями поверхностных скоростей течения по ФГМ и вертушке ($R^2(V_{\text{пов.ФГМ}} = f(V_{\text{пов.верт.}}))$), разница в оценке средних

$$\Delta_{\text{ср.}} = \frac{(V_{\text{пов.ФГМср.}} - V_{\text{пов.верт.ср.}})}{V_{\text{пов.верт.ср.}}} 100\%$$

и максимальных поверхностных скоростей течения

$$\Delta_{\text{max}} = \frac{(V_{\text{пов.ФГМmax}} - V_{\text{пов.верт.max}})}{V_{\text{пов.верт.max}}} 100\%.$$

Для оценки степени геометрических искажений створа измерения при ортотрансформации в ПО FUDAA-LSPIV также вычислялось отношение пиксельного расстояния съемки ($L_{\text{пикс.}}$ – расстояние в пикселях) к фактическому $L_{\text{факт.}}$.

Третьим этапом алгоритма оценки качества измерения являлось выявление наличия таких неблагоприятных факторов для применения метода, как видимое дно (ВД), ветровое волнение (ВВ), наличие бликов и отражений (БО), засветы (З), рябь (Р), малое число трассеров (МТ), геометрические искажения створа при трансформации (Т).

Всего было определено 16 расходов воды, а с учетом смены ракурсов проанализированы результаты 97 видеосъемок. При этом стоит подчеркнуть, что в рамках исследования метод реализовывался с помощью недорогих, общедоступных технологий. Съемки осуществлялись камерами смартфонов среднего и низкого разрешения, оптическая стабилизация видео, как правило, не проводилась, а дальнейшую обработку делали в общедоступном ПО без внедрения новейших технологий компьютерного зрения, способных значительно улучшить результат. Это связано с тем, что одной из главных задач было найти низкобюджетное решение, которое можно оперативно реализовать в ближайшей перспективе.

Результаты исследований и их обсуждение. В рамках постобработки результатов измерений сначала проводился отбор репрезентативных эмпирических распределений скорости потока по глубине. Из дальнейшего анализа исключались распределения, подверженные локальным факторам отклонения распределений скорости течения по глубине – торможению потока крупными валунами выше по течению, формированию горизонтальных и вертикальных циркуляционных течений в прибреговых зонах, ниже русловых препятствий и т.д.

В результате было отобрано 88 натурных распределений скоростей течения по глубине потока (рис. 4, а), были получены характерная осредненная эпюра в относительных единицах (рис. 4, б) и коэффициент K_1 , осредненный по всем выборочным эпюрам.

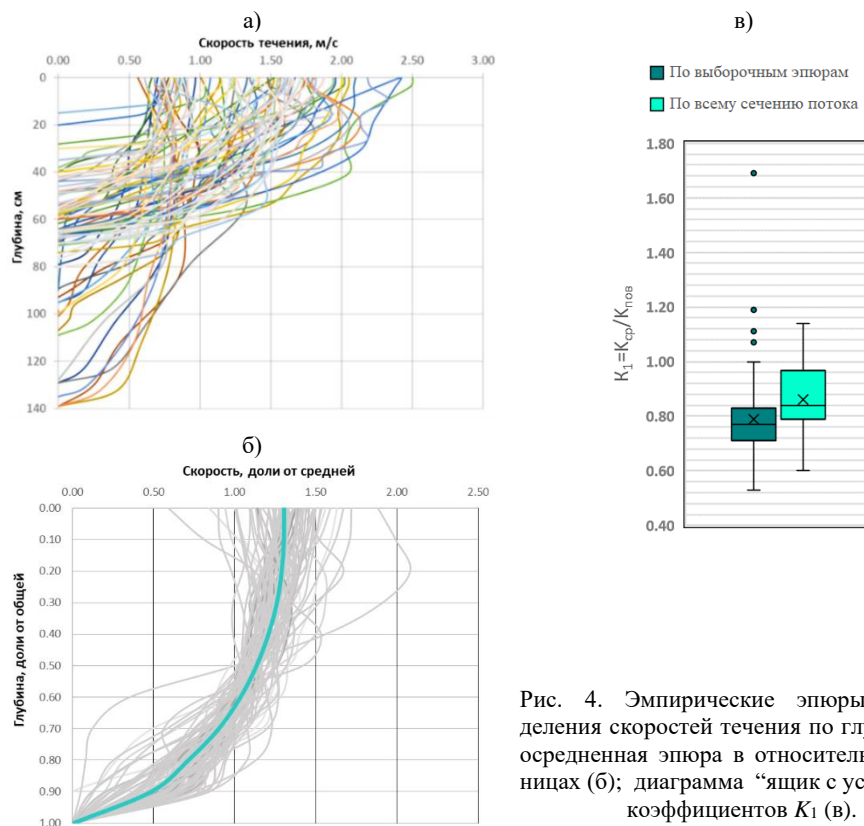


Рис. 4. Эмпирические эпюры распределения скоростей течения по глубине (а); осредненная эпюра в относительных единицах (б); диаграмма “ящик с усами” для коэффициентов K_1 (в).



Рис. 5. График изменчивости коэффициентов K_1 и заглубления максимальной скорости течения в долях от общей глубины.

Стоит отметить, что вариация K_1 отлична от коэффициента, полученного по средним значениям по всему сечению потока для каждого створа в отдельности $K_{1, \text{ср.сеч.}}$ (рис. 4, в). Так, среднее значение $K_1 = 0,79$, а $K_{1, \text{ср.сеч.}} = 0,87$. В ПО FUDAA-LSPIV по умолчанию используется коэффициент равный 0,85, но это опровергается целым рядом исследований, в частности, турецкие

исследователи доказали, что для неглубоких горных рек его значение гораздо ниже и составляет в среднем 0,67 [13]. Эти показатели лишний раз подчеркивают изменчивость данного соотношения в зависимости от степени наполнения русла и местных гидродинамических свойств потока. Несмотря на это, для дальнейших расчетов расходов воды для всех рек использовался коэффициент K_1 по отдельным эпюрам, так как задачей являлось создание унифицированной, “упрощенной” методики.

Также были построены графики изменчивости K_1 и заглубления максимальной скорости течения в долях от общей глубины (рис. 5). Согласно полученным данным, для 69,4% эмпирических распределений максимальная скорость течения наблюдалась на поверхности потока, а большинство значений коэффициента K_1 группируются в диапазоне от 0,70 до 0,90.

Анализ воздействия негативных факторов выявил, что наибольшее влияние на результат измерения оказывает эффект видимого дна, когда камни, находящиеся на дне потока, видны из-за высокой прозрачности воды, и воспринимаются программой обработки как статичные трассеры. В свою очередь это приводит к значительному занижению расчетных скоростей течения (рис. 6, а). В таких зонах максимальное расхождение скоростей (занижение) с измеренными вертушкой достигало более 100%, а среднее находилось в диапазоне 25–35%. Наличие бликов и отражений приводит к разнонаправленным выбросам (рис. 6, б), а ветровое волнение может в значительной степени влиять на точность результата разнонаправленно – как занижая, так и завышая (рис. 6, в) значения поверхностной скорости в зависимости от направления ветра. Геометрические искажения в створе измерения (рис. 6, г), как правило, приводят к систематическим ошибкам в оценке скорости.

Численные критерии качества измерений продемонстрировали, что поле поверхностных скоростей потока, полученное методом ФГМ, для большинства измерений имеет хорошую сходимость с полем, полученным с помощью гидрометрической вертушки. Коэффициент $R^2(V_{\text{пов.ФГМ}}=f(V_{\text{пов.верт.}}))$ в среднем для измерений, не подверженных активному влиянию неблагоприятных факторов (репрезентативная выборка), составил 0,67.

Также для таких измерений справедлива зависимость погрешности измерения от средней скорости потока – с ее увеличением уменьшается относительная ошибка определения расхода воды. При этом порог поверхностной скорости потока, при котором достигается нормативная точность измерения расхода воды на рассматриваемых горных реках, находится на отметке 0,70–0,80 м/с (как правило, при этих и более высоких скоростях течения создается достаточное число естественных трассеров). Данный вывод подтверждается результатами расчета расходов воды методом ФГМ, полученными авторами в различных водных потоках [17].

Ряд измерений был подвержен одновременному влиянию сразу нескольких неблагоприятных факторов – наблюдался “вложенный” эффект (красные строки в табл. 2, репрезентативная выборка – белые). По этой причине фокус анализа полученных результатов был смещен от оценки погрешности определения расхода воды в целом к оценке условий измерения и отдельных факторов воздействия на точность оценки скорости течения с помощью ФГМ.

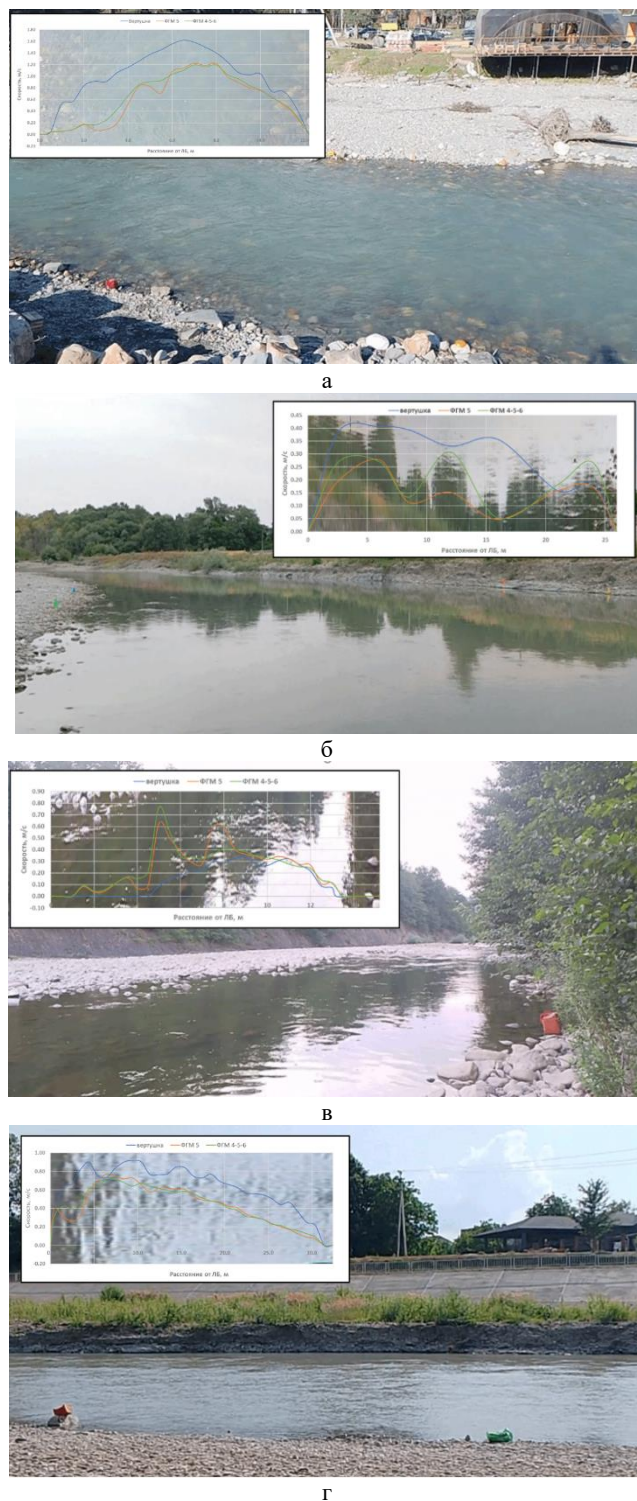


Рис. 6. Иллюстрация влияния неблагоприятных факторов: видимого дна (а); бликов и отражений (б); ветрового волнения (в); геометрических искажений при трансформации (г).

Таблица 2

Результаты расчета расхода воды методом ФГМ для каждого измерения с оценкой погрешности составляющих

Река – пост	$R^2_{\text{ср.}}$	ΔQ , %	$\Delta V_{\text{пов.,ср.}}$, %	$\Delta V_{\text{пов.,мак.}}$, %	ΔK_1 , %	Неблагоприятные факторы
Малая Лаба – с. Никитино	0,72	-14,9	13,9	2,50	-25,2	ВД, Т
Малый Чохрак – х. Северный	0,71	-71,0	-74,0	-62,0	-2,05	ВД, МТ
Курджипс – х. Гуамка	0,69	-31,2	-32,5	-29,3	1,89	ВД, Т, БО, Р
Пшеха – с. Черниговское	0,80	-26,6	-16,1	4,03	-19,0	ВД, Т
Пшеха – г. Апшеронск (1)	0,70	-42,4	-28,1	11,1	-19,7	ВВ, Т, БО
Пшиш – пос. Гойтх	0,55	-10,4	29,4	23,5	-30,7	ВВ, БО, З
Маруха – с. Маруха	0,64	-16,1	2,86	28,6	-18,4	–
Фарс – ст. Махошевская	0,76	-79,6	-78,8	-60,5	-16,7	ВВ, БО
Псекупс – с. Безымянное	0,65	-71,9	-73,3	-65,5	-9,08	ВВ, БО, МТ
Белая – х. Гузерицль	0,71	28,3	-1,82	28,7	31,7	Т, МТ
Белая – х. Грозный (1)	0,20	–	1,20	-16,9	19,8	ВВ, Р, Т
Пшеха – г. Апшеронск (2)	0,64	-18,9	-12,5	0,00	-8,51	БО, Т, МТ
Пшеха – г. Апшеронск (3)	0,00	–	-22,0	203	-2,71	БО, Т, МТ
Белая – х. Грозный (2)	0,51	-25,4	-20,7	30,4	-5,94	Т, ВВ, Р
Аксаут – с. Хасаут-Греческое	0,56	-7,49	-7,79	5,26	0,32	–
Псыш – Софийская поляна	0,77	-36,8	-29,5	-10,5	-10,4	ВД

Анализ разниц скоростей течения, вычисленных ФГМ и измеренных гидрометрической вертушкой (рис. 7), свидетельствует о том, что наибольший вклад в погрешность расхода воды методом ФГМ вносит расчет поверхностной скорости течения, а влияние точности определения коэффициента K_1 сравнительно мало, и для большинства измерений погрешность не превышает 20%.

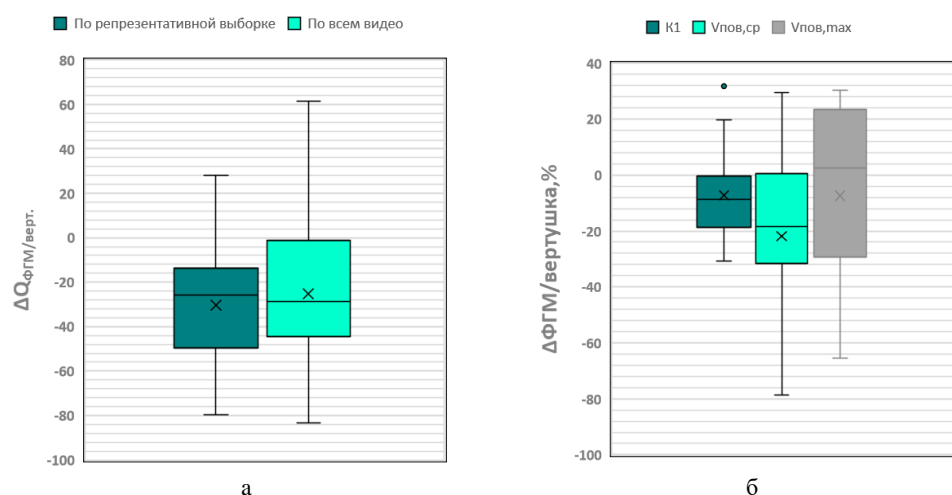


Рис. 7. Диаграммы “ящик с усами” для разницы расходов воды, полученных ФГМ и традиционными методами (а); для каждого из источников погрешности метода ФГМ (б).

Выводы и обсуждения. По результатам апробации метода ФГМ для определения расхода воды на горных реках можно сформулировать ряд технических и методологических рекомендаций по применению метода:

1. Метод ФГМ в его упрощенном исполнении (съемка с рук на телефон с применением общедоступных технологий компьютерного зрения и ПО, с обобщенной оценкой K_1) может быть применен на горных реках для гидрологического мониторинга при высоких скоростях течения (более 0,80 м/с) и соблюдении правил съемки. Технология наиболее эффективна для мониторинга расходов воды в развитии паводковой ситуации, селевой активности.

2. Автоматизация технологии ФГМ для непрерывного гидрологического мониторинга всего цикла водности требует больших вложений, наукоемких технологических разработок и наличия высококвалифицированных специалистов в области внедрения технологий компьютерного зрения и искусственного интеллекта (ИИ).

Например, с понижением водности скорости течения становятся меньше, а неопределенность оценки расхода воды – выше. В такие моменты требуется применение иных подходов для анализа поля поверхностных скоростей течения и их переключения в автоматизированном режиме или применением ИИ [6, 18–20]. Ряд условий, например сильный туман, ветровое волнение, формирование многоруканности или островного обмеления, делают метод неприменимым в большом числе случаев. Как правило, тогда же можно применять традиционные подходы и СИ.

Рациональным решением может служить использование ФГМ в рамках комбинированной схемы учета стока – по достижению определенного порогового значения уровня воды. Рассмотрение же ФГМ как единственного инструмента для учета стока в рамках соблюдения нормативной точности и баланса трудозатрат на данном этапе его развития видится нецелесообразным.

3. Основная неопределенность оценки расхода воды заложена в погрешности определения поверхностной скорости потока. Необходимо применение усовершенствованного ПО и технологий компьютерного зрения, которые пока адаптируются под гидрологические задачи и находятся в научно-исследовательской разработке [6, 20]. Технология, заложенная в ПО FUDAA-LSPIV, наиболее приемлема в руслах со скоростью течения более 0,8 м/с. Чем меньше скорость, тем больше неопределенность (возрастает число неблагоприятных факторов).

4. На основании полученных данных нельзя сделать однозначных выводов о возможности унификации метода ФГМ в условиях резко меняющейся водности и гидродинамики горных рек. Сравнительные измерения показали, что коэффициент перехода от поверхностной скорости к средней изменяется в широких пределах и зависит от ряда гидродинамических факторов, определяющим из которых является уклон водной поверхности и характер материала, которым сложено русло (крупнообломочный, галька и т.д.). Погрешность, вносимая этим фактором в общую оценку расхода воды, может достигать более 20%, что дает основания для рекомендации производства детальных измерений скоростного поля потока для установления зависимости $K_1=f(H)$ для каждого створа в отдельности, где планируется применение технологии. В целом ряде случаев это технически сложная и трудоемкая задача. Стоит учитывать и то, что эти зависимости на горных реках могут быть неустойчивыми ввиду активного развития руслового процесса.

Решением может служить введение неизменных значений коэффициентов K_1 в зависимости от наполнения русла (по грациям глубин на основании детальных измерений скоростей течения в широком диапазоне изменения водности), с вводом к ним поправок при прохождении руслоформирующих паводков.

5. Влияние неблагоприятных факторов съемки на точность измерения превалирует над техническими аспектами. Например, влияние таких аспектов как качество съемки, наличие оптической стабилизации, качество цифровой стабилизации и присутствие цифрового шума на точность расчета расходов воды методом ФГМ пренебрежимо мало в сопоставлении с влиянием неблагоприятных факторов съемки.

6. На горных реках необходимо избегать съемок с просвечивающимся дном русла, ракурсов с существенными геометрическими искажениями створа измерения при последующей трансформации, потоков с малым числом трассеров. Эти факторы играют определяющую роль в погрешности оценки поверхностных скоростей течения.

7. Возможность применения недорогого оборудования без значительного влияния на точность измерения – благоприятствующий фактор для масштабирования технологии ФГМ, которая является доступной и энергоемкой и не требует задействования большого числа трудовых ресурсов.

Авторы публикации выражают благодарность участникам полевой группы Лапину К.Ю., Полещуку А.Г., Журавлеву К.С., задействованным в производстве полевых работ по данной тематике.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 07.10.2025

Утверждена 25.12.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила по охране труда при производстве наблюдений и работ на сети Росгидромета. Дата обращения 05.03.2025.
<https://meganorm.ru/Index2/1/4293721/4293721854.htm>
2. Hundt S., Blasch K. Laboratory Assessment of Alternative Stream Velocity Measurement Methods. *PLoS ONE* **14** (2019), e0222263.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222263>
3. King T., Hundt S., et al. Evaluation of Select Velocity Measurement Techniques for Estimating Discharge in Small Streams across the United States. *JAWRA* **58** (2022), 1510–1530.
<https://doi.org/10.1111/1752-1688.13053>
4. Shin S.S., Park S.D. Application of Spherical-Rod Float Image Velocimetry for Evaluating High Flow Rate in Mountain Rivers. *Flow Measurement and Instrumentation* **78** (2021), 11.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101906>
5. Южно А.В., Бузмаков С.В., Лубенцов А.С. Метод ионного паводка как инструмент гидрологического мониторинга в горных районах. Специфика и перспективы. *Сб. труд. Всероссийской научно-практ. конф. с международным участием “Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг”*. Том II. Новочеркасск, Южный федеральный университет, Лик (2023), 176–181.
6. Fang C., Yuan G., et al. Technical Note: Monitoring Discharge of Mountain Streams by Retrieving Image Features with Deep Learning. *Hydrology and Earth System Sciences* **28** (2024), 4085–4098.
<https://doi.org/10.5194/hess-28-4085-2024>

7. Le Coz J., Hauet A., et al. Performance of Image-Based Velocimetry (LSPIV) Applied to Flash-Flood Discharge Measurements in Mediterranean Rivers. *Journal of Hydrology* **394** (2010), 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049>
8. Liu C., Wen B., et al. Measurement of Mountain River Discharge Based on UHF Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **20** (2022), 99. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3229068>
9. Aleixo R., Guerrero M., et al. Applying ADCPs for Long-Term Monitoring of SSC in Rivers. *Water Resources Research* **56** (2020), 23. <https://doi.org/10.1029/2019WR026087>
10. Runkel R.L. On the Use of Rhodamine WT for the Characterization of Stream Hydrodynamics and Transient Storage. *Water Resources Research* **51** (2015), 6125–6142. <https://doi.org/10.1002/2015WR017201>
11. Streamflow Estimation from Advanced Imaging (LSPIV) in Pennsylvania. Дата обращения 26.02.2025. <https://www.usgs.gov/centers/pennsylvania-water-science-center/science/streamflow-estimation-advanced-imaging-lspiv>
12. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2023 году. ФГБУ “ТГИ”, Санкт-Петербург (2024).
13. Genc O., Ardiclioglu M., Agiraliloglu N. Calculation of Mean Velocity and Discharge Using Water Surface Velocity in Small Streams. *Flow Measurement and Instrumentation* **41** (2015), 115–120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.10.013>
14. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, Ч. II. Гидрологические наблюдения и работы на малых реках (1972).
15. Trieu H., Bergström P., et al. Natural Surface Floaters in Image-Based River Surface Velocimetry: Insights from a Case Study. *Flow Measurement and Instrumentation* **96** (2024), 15. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102557>
16. River Hydraulics Research Team Website. FUDAA-LSPIV Software Download Link. Дата обращения 06.10.2022. <https://nextcloud.inrae.fr/s/wRTDsgMddndNR8X>
17. Осташов А.А., Бузмаков С.В., и др. Определение скорости течения с помощью видеосъемки в различных условиях. *Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен. Сборник докладов международной научной конференции памяти Виноградова Ю.Б.* Санкт-Петербург, издательство BBM (2023), 742–752.
18. Chen M., Chen H., et al. A Review on the Video-Based River Discharge Measurement Technique. *Sensors* **24** (2024), 4655. <https://doi.org/10.3390/s24144655>
19. Guocheng A., Du T., et al. Non-Intrusive Water Surface Velocity Measurement Based on Deep Learning. *Water* **16** (2024), 2784. <https://doi.org/10.3390/w16192784>
20. Zhou N., Chen H., et al. Improving River Surface Flow Velocity Measurement by Coupling Adaptive Flow Direction Search Algorithm with Space-Time Image Velocimetry. *Journal of Hydrology* **653** (2025), 132800. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132800>

Ա. Վ. ՅՈՒՆԻՆ, Ա. Ա. ՕՍՏԱՇՈՎ, Ե. Ս. ԿՈՄԱՐՆԻՑԿԻ, Ե. Ն. ՎԼԱՍՈՎԱ

ԼԵՆԻՆԱՅԻՆ ԳԵՏԵՐՈՒՄ ՋՐԻ ՀՈՍՔԻ ՍՊԱՌՄԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ
ՖՈՏՈՀԻԴՐՈՄԵՏՐԻԿ ՄԵԹՈԴԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԸ

Ամփոփում

Հոդվածում ուսումնասիրվում են Կուբան գետի ավազանի լեռնային գետերում ջրի հոսքի որոշման ֆոտոհիդրոմետրիկ մեթոդի (ՖՀՄ) փորձարկման

արդյունքները հոսքի արագությունների լայն միջակայքում: Նպատակն է գնահատել առաջարկվող տեխնոլոգիայի կիրառելիությունը որպես մատչելի, ոչ ինտրուզիվ և աշխատատար գործիք լեռնային գետերի հոսքի անընդհատ հիդրոլոգիական մոնիթորինգի համար: Այս մեթոդի փորձարկման ընթացքում ջրի հոսքը չափվել է ինչպես հոսանքի հաշվիչի, այնպես էլ ՖՀՄ-ի միջոցով: Հեղինակները մշակել են չափման որակը գնահատելու ալգորիթմ՝ հիմք ընդունելով մակերևութային հոսքի արագության դաշտերի համեմատական վիճակագրական և գրաֆիկական վերլուծությունը: Ուսումնասիրվել են նաև հոսքի արագությունների էմպիրիկ բաշխումները հոսքի խորությամբ և տրվել են դրանց ընդհանրացված թվային գնահատականները: Եզրակացություններ են արվում ֆոտոհիդրոմետրիկ մեթոդի կոնկրետ կիրառման վերաբերյալ և այն օգտագործելով տրվում են առաջարկություններ լեռնային գետերում ջրի հոսքը որոշելու համար:

A. V. IUKHNO, A. A. OSTASHOV, E. S. KOMARNITSKY, E. N. VLASOVA

APPLICATION OF THE PHOTOHYDROMETRIC METHOD FOR DETERMINING WATER DISCHARGE IN MOUNTAIN RIVERS

Summary

This article examines the results of testing a photohydrometric method by large-scale particle-image velocimetry (LSPIV) for determining water discharge over a wide range of flow velocity variations on mountain rivers in the Kuban Basin. The aim of the study is to evaluate the applicability of the proposed technology as an accessible, non-intrusive, and labor-efficient tool for continuous hydrological monitoring of mountain river discharge. During the testing of this method, water discharge was measured using both a current meter and LSPIV. The authors developed an algorithm for assessing the quality of measurement, based on a comparative statistical and graphical analysis of surface flow velocity fields. Additionally, a study of empirical distributions of flow velocities by flow depth is conducted, and their generalized numerical estimates are provided. Conclusions are drawn regarding the specific application of the LSPIV, and recommendations are provided for determining water discharge on mountain rivers using this method.