

*Г.К. Керимкулова - к.ф.-м.н., Г.О. Аскалиева gulsaat@mail.ru
Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР
Бишкек, Кыргызстан*

К ОЦЕНКЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВОДЫ МАЛЫХ РЕК ГОРНО-ПРЕДГОРНОЙ ЗОНЫ КЫРГЫЗСТАНА

Введены понятия балластного слоя речных отложений и естественной шероховатости дна водотока. Установлены ограничения применимости O^u профилей скорости воды К. Загустина, логарифмического, Тэйлора-2, Ю.А. Ибад-Заде (приближение «0» и «II») по соответствующим критериям. 5 рассмотренных рек Кыргызстана идентифицированы профилем скорости воды Ю.А. Ибад-Заде (приближение «I») и 3 из них – эллиптическим распределением скорости.

Ключевые слова: слой речных отложений, балластный, естественная шероховатость, профиль скорости воды, ограничения применимости профилей скорости.

Введение. При исследовании материалов некоторых рек Кыргызской Республики (Чон Каинды, Бозшук, Бор Дюбе, Джергалчак, Туюк) [1] с уклонами дна водотока в интервале от 0,037 до 0,063 мы столкнулись с аномально большими значениями ($d_{отл}/H$ от 0,32 до 0,48) толщины слоя речных отложений, которые, на наш взгляд, не могут соответствовать относительной шероховатости дна водотока, участвующей в формировании эмпирического распределения относительной скорости воды по глубине потока. Поэтому этот вопрос нуждается в более тщательном анализе.

Постановка задачи исследований. Общую толщину слоя речных отложений можно представить в виде совокупности двух слоев: первого (нижнего), где элементы речных отложений образуют компактную массу с минимально возможными зазорами между отдельными элементами, куда если и проникает вода, то в малых количествах, и она находится практически в неподвижном состоянии («балластный» слой – условно); второго (верхнего), где отдельные элементы речных отложений располагаются менее компактно (более свободно) с достаточно заметными зазорами между ними, в которых нижний слой потока воды перемещается более свободно по сравнению с «балластным» слоем, поэтому этот верхний слой речных отложений участвует в формировании шероховатости (условно – «естественная» шероховатость) и эмпирического распределения относительной скорости воды по глубине потока.

Толщину «балластного» слоя можно оценить, опираясь на применяемый в практической гидравлике принцип измерения глубины наполнения водотока, отсчет которой ведется от половины высоты выступа шероховатости дна водотока. Согласно этому относительная указанная величина составляет, по крайней мере, 0,2. Поэтому «естественная» шероховатость дна водотока может быть определена по формуле

$$\left(\frac{d_{отл}}{H} \right)_e = \left(\frac{d_{отл}}{H} \right)_и - 0,2, \quad (1)$$

где $d_{отл}$ – средний диаметр русловых отложений, м; H – глубина наполнения водотока, м; индекс «е» – означает принадлежность соответствующих характеристик к «естественной» шероховатости, «и» – к исходной (общей) толщине слоя речных отложений.

Задача исследований. Провести оценку основных кинематических параметров упомянутых водотоков на основе введенного понятия «естественной» шероховатости дна водотока и осуществить анализ полученных результатов.

Решение поставленной задачи. Восстановленные исходные данные по указанным объектам и значения отношения динамической скорости к максимальной приведены в таблицах 1, 2 и 3 соответственно.

Таблица 1

Исходная информация (5 рек Кыргызстана)

Река	Средне-годовой расход воды $Q_{\text{ср,год}}$, м ³ /с	Уклон дна водотока i	Глубина наполнения водотока H , м	Средний диаметр русловых отложений $d_{\text{отл}}$, м	Толщина слоя речных отложений $\left(\frac{d_{\text{отл}}}{H}\right)_i$	Средняя скорость воды \bar{u} , м/с
Чон Каинды (с)	2,0	0,0370	0,40	0,167	0,42	0,80
Бозшук (м)	2,2	0,0540	0,41	0,167	0,41	0,85
Бор Дюбе (м)	1,1	0,0630	0,37	0,176	0,48	0,75
Джергалчак (м)	2,1	0,0450	0,40	0,138	0,34	0,85
Туюк (м)	2,2	0,0430	0,41	0,132	0,32	0,85

Примечание: в первой графе индекс «с» – средняя река, «м» – малая река.

На первом этапе анализа (сравнение эмпирических и расчетных значений средней по сечению потока скорости воды) – (табл. 4) выявляются отрицательные расчетные значения указанного параметра по профилю К. Загустина.

Обратимся к формуле для средней скорости воды по К. Загустину

$$\bar{u} = u_m \cdot \int_0^1 \left[1 - \frac{2 \cdot u_*}{\kappa \cdot u_m} \cdot \arctg \left(\frac{1 - \tilde{y}}{\tilde{y}} \right)^{3/2} \right] \cdot d\tilde{y}, \quad (2)$$

где u_m – максимальная скорость потока, м/с; κ – параметр Кармана; u_* – динамическая скорость водного потока, м/с; \tilde{y} – относительная вертикальная координата.

Проанализируем вычитаемое подынтегральной функции

$$\frac{2 \cdot u_*}{\kappa \cdot u_m} \cdot \arctg \left(\frac{1 - \tilde{y}}{\tilde{y}} \right)^{3/2}. \quad (3)$$

Из формулы (2) следует, что условием положительности подынтегральной функции является неравенство

$$5 \cdot \frac{u_*}{u_m} \cdot \arctg \left(\frac{1 - \tilde{y}}{\tilde{y}} \right)^{3/2} \leq 1, \quad (4)$$

и прогнозируемое значение отношения $\frac{u_*}{u_m}$ примет вид

$$\frac{u_*}{u_m} \leq \frac{1}{5 \cdot \arctg \left(\frac{1 - \tilde{y}}{\tilde{y}} \right)^{3/2}}. \quad (5)$$

Таблица 2

Восстановленные значения параметров и характеристик 5 рек Кыргызстана

Река	$\left(\frac{d_{отп}}{H}\right)_и$	$\left(\frac{d_{отп}}{H}\right)_е$	C_2^e , м ^{1/2} /с	$C_1^и$, м ^{1/2} /с	C_{cp}^e , м ^{1/2} /с	$m(C_{cp}^e)$	$m_1(C_{cp}^e)$, м ^{1/2} /с	u_M , м/с	$(u_d / u_M)_e$		
									«0»	«I»	«II»
Чон Каинды	0,42	0,22	25	9	17,0	3,2	8,95	1,09	0,04	0,01	0,10
Бозщук	0,41	0,21	26	8	17,0	3,2	8,95	1,15	0,10	0,02	0,14
Бор Дюбе	0,48	0,28	23	8	15,5	3,0	8,43	1,02	0,10	0,02	0,14
Джергалчак	0,34	0,14	28	9	18,5	3,4	9,48	1,15	0,08	0,0003	0,12
Туюк	0,32	0,12	30	9	19,5	3,4	9,83	1,15	0,09	0,005	0,12

Таблица 3

Значения отношения $\frac{u_*}{u_M}$ для выбранной группы объектов

Река	i	H, м	u_* , м/с	u_M , м/с	$\frac{u_*}{u_M}$
Чон Каинды (с)	0,0370	0,40	0,38	1,09	0,350
Бозщук (м)	0,0540	0,41	0,47	1,15	0,407
Бор Дюбе (м)	0,0630	0,37	0,44	1,02	0,432
Джергалчак (м)	0,0450	0,40	0,42	1,15	0,364
Туюк (м)	0,0430	0,41	0,42	1,15	0,364

Таблица 4

Сравнение \bar{u}^3 с \bar{u}^p для выбранной группы объектов

Река	\bar{u}^3 , м/с	Расчетная средняя скор., м/с									
		параб.	$\Delta\bar{u},\%$	элл.	$\Delta\bar{u},\%$	логар.	$\Delta\bar{u},\%$	К.Заг.	$\Delta\bar{u},\%$	И-3 «0»	$\Delta\bar{u},\%$
Чон Каинды	0,80	0,58	27,0	0,69	13,4	0,73	8,87	-0,32	60,4	0,74	7,35
Бозшук	0,85	0,62	27,0	0,74	13,4	0,77	8,87	-0,55	35,8	0,85	0
Бор Дюбе	0,75	0,53	29,1	0,67	10,5	0,67	10,3	-0,49	35,0	0,76	-1,30
Джергалчак	0,85	0,64	25,2	0,71	15,9	0,78	7,67	-0,44	47,7	0,82	3,84
Туюк	0,85	0,65	24,1	0,70	17,4	0,79	6,98	-0,47	45,0	0,83	2,64

Продолжение табл.4

Река	\bar{u}^3 , м/с	Расчетная средняя скор., м/с									
		Ю.А. Ибад-Заде				Карман	$\Delta\bar{u},\%$	Т-1	$\Delta\bar{u},\%$	Т- 2	$\Delta\bar{u},\%$
		«I»	$\Delta\bar{u},\%$	«II»	$\Delta\bar{u},\%$						
Чон Каинды	0,80	0,85	-5,99	0,98	-22,8	0,51	36,8	0,44	45,2	0,84	-5,08
Бозшук	0,85	0,95	-11,6	1,12	-31,2	0,48	44,0	0,39	54,5	0,85	0
Бор Дюбе	0,75	0,85	-13,0	1,00	-32,8	0,43	42,9	0,38	49,5	0,75	0
Джергалчак	0,85	0,91	-7,57	1,08	-26,6	0,48	43,3	0,36	57,5	0,87	-2,26
Туюк	0,85	0,92	-8,55	1,09	-27,9	0,46	46,1	0,32	62,7	0,86	-1,22

Оценим значения упомянутого отношения для отдельных точек по вертикали потока

➤ $\tilde{y} = 0$ (дно потока)

$$\frac{u_*}{u_m} \leq 0,314;$$

➤ $\tilde{y} = 0,5$ (середина потока)

$$\frac{u_*}{u_m} \leq 0,157;$$

➤ $\tilde{y} = 1$ (поверхность потока)

$$\frac{u_*}{u_m} \leq \infty.$$

Сравнив фактические значения $\frac{u_*}{u_m}$ (табл. 3) с прогнозируемыми, установим, что

для

➤ $\tilde{y} = 0$, $\frac{u_*}{u_m}(\phi) = 0,350 \dots 0,432 > \frac{u_*}{u_m}(\pi)$, следовательно, в этой точке средняя

скорость отрицательна ($\bar{u} < 0$);

➤ $\tilde{y} = 0,5$, $\frac{u_*}{u_m}(\phi) > \frac{u_*}{u_m}(\pi)$, т.е. в этой точке также $\bar{u} < 0$;

➤ $\tilde{y} = 1$, $\frac{u_*}{u_m}(\pi) \leq \infty$, т.е. в этом случае средняя скорость может быть и

отрицательной, и положительной, и равной нулю.

Следовательно, профиль скорости К. Загустина для условий рассматриваемых объектов применять не имеет физического смысла.

На втором этапе анализа (сравнение расчета и эксперимента по распределениям скорости воды) выявлены следующие факты:

➤ для логарифмического распределения скорости воды по глубине потока установлены (как и следовало ожидать) отрицательные значения относительной скорости воды в нижней части потока;

➤ для профиля скорости Тэйлора-2 также выявлено подобное обстоятельство;

➤ для приближений «0», «II» распределения Ю.А. Ибад-Заде вид полученных расчетных профилей отличается от их реального типа.

Из выражения логарифмического профиля

$$\tilde{u}(\tilde{y}) = 1 + \frac{u_*}{k \cdot u_m} \cdot \ln \tilde{y} \quad (6)$$

следует, что условием положительности относительной скорости воды является

$$\frac{u_*}{u_m} \leq \frac{1}{2,5 \cdot |\ln \tilde{y}|}. \quad (7)$$

Аналогично для распределения Тэйлора-2

$$\tilde{u}(\tilde{y}) = -4,15 \cdot \frac{u_*}{u_m} \cdot \left\{ \arcsin \sqrt{1 - \tilde{y}} - \sqrt{\tilde{y}} \cdot \sqrt{1 - \tilde{y}} \right\} + 1 \quad (8)$$

следует, что условие положительности скорости имеет вид

$$\frac{u_*}{u_m} \leq \frac{1}{4,15 \cdot \left\{ \arcsin \sqrt{1 - \tilde{y}} - \sqrt{\tilde{y}} \cdot \sqrt{1 - \tilde{y}} \right\}}. \quad (9)$$

Произведем вычисления по формулам (7) и (9) – табл. 5

Таблица 5

Прогнозируемые значения $\frac{u_*}{u_m}$ для логарифмики (7) и распределения скорости по профилю Тэйлора-2 (9)

\tilde{y}	$\frac{u_*}{u_m}$ по условию (7)	$\frac{u_*}{u_m}$ по условию (9)
0,1	0,174	0,254
0,2	0,249	0,341
0,3	0,332	0,452
0,4	0,437	0,608
0,5	0,577	0,844
0,6	0,783	1,237
0,7	1,121	1,985
0,8	1,793	3,786
0,9	3,796	11,08

Из сравнения фактических значений $\frac{u_*}{u_m}$ (табл. 3) с прогнозируемыми действительно видно, что скорости воды в нижней части потока отрицательны.

Определим границу \tilde{y}_r между положительными и отрицательными значениями относительной скорости воды по формулам логарифмики (7) и по профилю Тейлора 2 (9).

Результаты расчетов приведены в табл.6.

Таблица 6

Граничные значения между отрицательными и положительными относительными скоростями воды для выбранной группы объектов

Чон Каинды	Бозшук	Бор Дюбе	Джергалчак	Туюк
\tilde{y}_r по условию (10)				
0,32	0,37	0,40	0,33	0,33
\tilde{y}_r по условию (11)				
0,21	0,26	0,29	0,22	0,22

Указанные данные подтверждают выявленные обстоятельства.

Интересно отметить, что (ср. данные табл.4 и 6) для упомянутых профилей скорости воды достаточно неплохие отклонения расчета от эксперимента по средней скорости сочетаются с неудовлетворительными отклонениями по распределениям скорости, а ни логарифмика, ни профиль Тэйлора-2 не проходят через этап дополнительных физических ограничений [2], т.к. они не удовлетворяют ограничениям на отклонения расчета от эксперимента в придонной части потока (по относительной скорости воды).

Что касается рекомендуемого к применению приближения профилей Ю.А. Ибад-Заде (рис. 1), то оказалось, что минимум отношения $\frac{u_d}{u_m}$ соответствует именно приближению «I» рассматриваемого распределения.

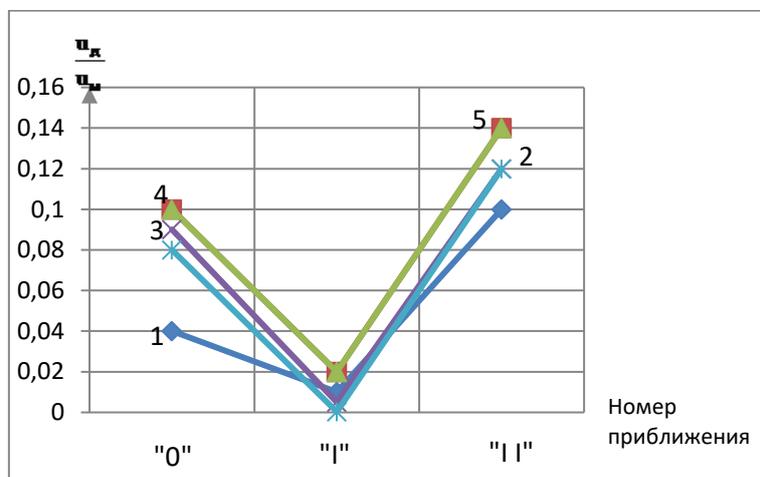


Рис.1. Схема выбора приближения профиля Ю.А. Ибад-Заде, соответствующего реальному распределению относительной скорости воды (реки: 1 – Чон Каинды, 2 – Джергалчак, 3 – Туюк, 4 – Бозшук, 5 – Бор Дюбе).

Обсуждение полученных результатов. Примененная нетрадиционная идентификация параметров водотока примечательна, в частности, тем, что на отдельных ее этапах проводимые операции (расчеты необходимых параметров, сравнение расчета с экспериментом, анализ результатов вычислений и отбор профилей, рекомендуемых к применению на последующих этапах идентификации) основаны на новых или вновь выявленных факторах, которые выступают в качестве критериев проводимого анализа. Так, например, введенные нами понятия балластного слоя речных отложений и естественной шероховатости (участвующей в формировании шероховатости дна водотока и эмпирического распределения скорости воды по ее глубине) позволяют (см. например табл. 2) обоснованным образом восстановить значения недостающих кинематических параметров и характеристик потока воды. Также на предварительном этапе учтены следующие обстоятельства:

- максимальная скорость воды оценена согласно показательному профилю скорости воды, который принимается за эмпирическое ее распределение и поэтому указанный профиль изымается из обоймы расчетных распределений;
- аналогично остается за рамками анализа профиль скорости Доу Го-женя, так как для рассматриваемых объектов не выполняется ограничение модели O^{II} ($10 < C/\sqrt{g} < 30$).

Установленные нами в процессе проведения идентификации ограничения, которые – являются вновь выявляемыми факторами применимости для анализа отдельных профилей скорости воды необходимо использовать на предварительном этапе идентификации. В этом случае сразу отсеиваются профиль К. Загустина (в связи с отрицательностью средней скорости воды), распределения логарифмическое и Тэйлора-2 (в связи с отрицательностью относительной скорости воды в придонной

части потока), приближения «0» и «II» распределения Ю.А. Ибад-Заде (в связи с их неудовлетворительным видом распределения скорости по вертикальной координате).

Следовательно, к идентификации допускаются лишь 25 вариантов данных (число объектов × количество рекомендуемых распределений).

Кстати, установленное нами ограничение модели O^u , касающееся применимости отдельных распределений скорости воды, связано с:

- видом самих профилей и применяемыми условиями рассматриваемых объектов (профили К. Загустина, Тэйлора-2);

- видом профиля скорости воды – логарифмика (дает отрицательные значения ее в придонной части потока практически для любых условий анализируемых объектов);

- видом приближений «0» и «II» распределения Ю.А. Ибад-Заде, которые приводят к возникновению существенного заглубления (от 0,6 до 0,4 глубины наполнения – отсчет от дна водотока) максимальной скорости воды. Это может быть связано с появлением поперечных циркуляций, хотя подобное в прямолинейном потоке воды достаточно проблематично и требует серьезной эмпирической проверки.

Кроме того, подобно установленному нами в работе [3, с.42] имеют место случаи, когда отсеянные на каком – либо этапе анализа расчетные распределения скорости воды «реабилитируются» на последующем этапе. Согласно табл.4 для рек: Чон Каинды, Бозшук и Бор Дюбе отклонения расчетной средней скорости воды по эллиптической зависимости не превышают 3% ограничения метода O_1 . На втором этапе анализа отклонения расчетного эллиптического распределения от эмпирического почти вдвое меньше ограничения метода O_2 . А на третьем этапе анализа суммарные отклонения для указанных случаев меньше ограничения метода O_3 . Поэтому отсеянные ранее упомянутые 3 варианта данных должны быть «восстановлены» в своих правах.

В результате все 5 рассмотренных рек идентифицированы профилем скорости Ю.А. Ибад-Заде (приближение «I»), который имеет вид [4]:

$$\tilde{u}(\tilde{y}) = 1 + A_4 \cdot (1 - \tilde{y}) + A_5 \cdot (1 - \tilde{y})^2 - 0,67 \cdot \frac{m_1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{u_*}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^3, \quad (10)$$

где $A_4 = 1,107 \cdot \frac{m_1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{u_*}{u_m} - 0,67 \cdot \left(1 - \frac{u_d}{u_m}\right)$, $A_5 = -\left[0,447 \cdot \frac{m_1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{u_*}{u_m} + 0,34 \cdot \left(1 - \frac{u_d}{u_m}\right)\right]$, коэффициенты

приведены в таблице 7, а сами распределения показали на рис. 2. Следует отметить, что некоторые отклонения указанного профиля от реального распределения лежат в пределах погрешности ($\leq 10\%$) измерений скорости воды в отдельных точках ее потока [5, с. 85].

Таблица 7

Коэффициенты A_4 и A_5 к профилю Ю.А. Ибад-Заде

Река	A_4	A_5
Чон Каинды	0,47	-0,79
Бозшук	0,66	-0,86
Бор Дюбе	0,64	-0,85
Джергалчак	0,59	-0,85
Туюк	0,65	-0,87

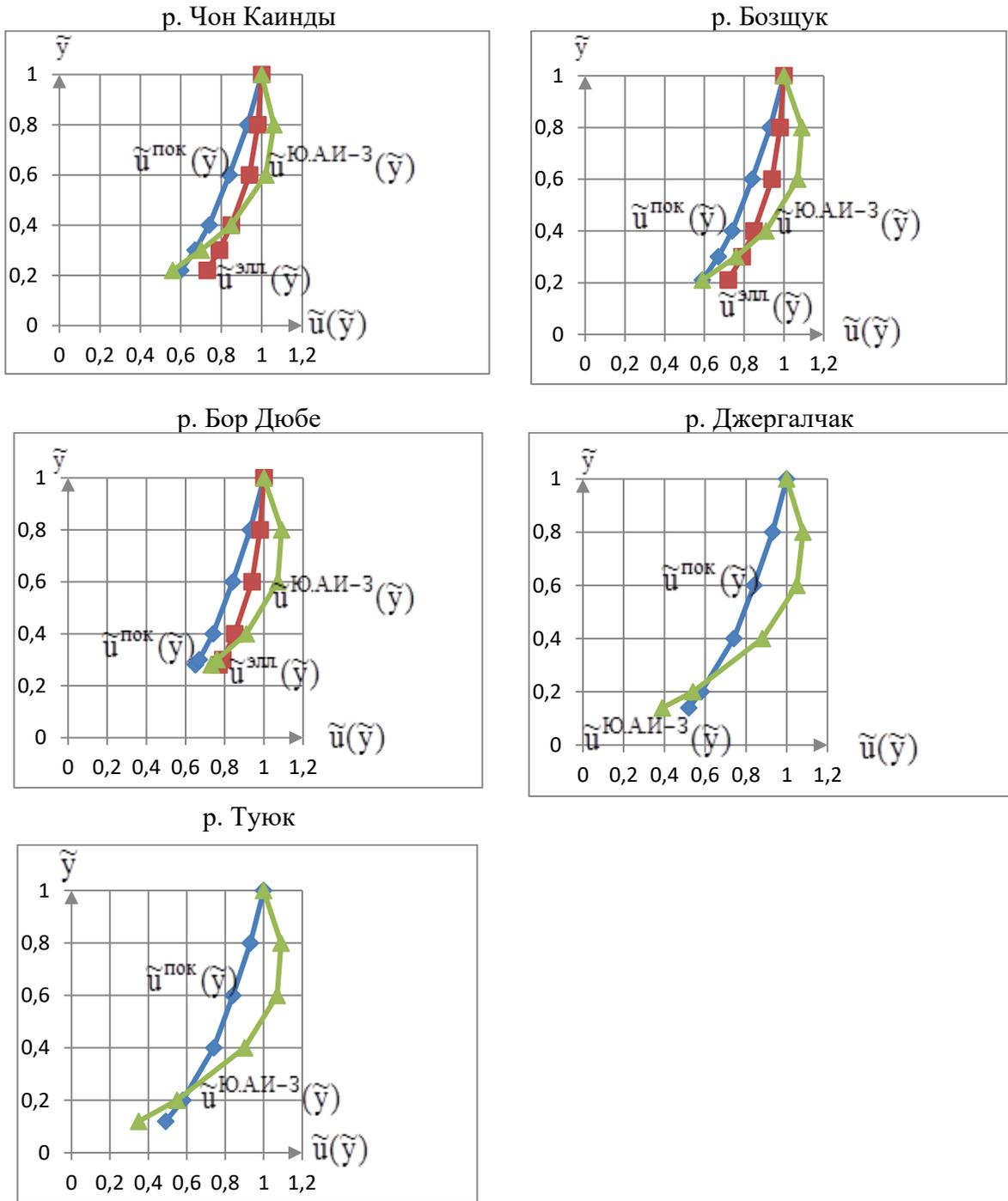


Рис.2. Идентифицированные объекты исследования по распределениям относительной скорости воды: $\tilde{u}^{\text{пок}}(\tilde{y})$ – показательный профиль; $\tilde{u}^{\text{элл}}(\tilde{y})$ – эллиптическое распределение скорости; $\tilde{u}^{\text{Ю.А.И-3}}(\tilde{y})$ – распределение скорости по Ю.А. Ибад-Заде (приближение «I»).

Помимо того 3 объекта из рассмотренных идентифицированы эллиптическим профилем скорости (рис. 2).

В случае необходимости определения наносных характеристик потока идентифицированные объекты описываются диффузионной расчетной схемой наносных характеристик потока.

Заключение. Введены понятия балластного слоя речных отложений и естественной шероховатости дна водотока, участвующих в формировании эмпирического распределения скорости воды по глубине потока.

Установлены ограничения применимости O^u профилей скорости воды К. Загустина, логарифмического, Тэйлора-2, Ю.А. Ибад-Заде (приближение «0» и «II») по соответствующим критериям.

Идентифицированы 5 рассмотренных рек Кыргызстана профилем скорости воды по Ю.А. Ибад-Заде (приближение «I») и 3 из них – эллиптическим распределением скорости.

Литература

1. Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. «О границе применимости показательного профиля мутности воды Е.В. Клевцова» // Информатика и системы управления. – 2017 (в печати).
2. Пресняков К.А. О возможностях дополнительных (физических) ограничений модели нетрадиционной идентификации режимных параметров открытых водотоков // «Проблемы автоматизации и управления». – 2015. – №1(28). – С.197-201.
3. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Река Теджен как объект нетрадиционной идентификации в вариантах изученного и частично изученного водотока // Материалы X Международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». – РАН г. Москва, 2015. – С.37-45.
4. Аскалиева Г.О., Турдумамбетова Э.Б. Преобразование соотношений Ю.А. Ибад-Заде для скорости и мутности потока воды к компактному виду // «Проблемы автоматизации и управления». – 2013. – №1(24). – С. 46–51.
5. Пресняков К.А. Разработка технических средств и устройств гидроавтоматики для очистки воды от наносов: Под. науч. ред. д.т.н., проф., акад. НАН КР Ж.Ш. Шаршеналиева. – Бишкек: Илим, 2009. – 306 с.