

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ, НАИБОЛЕЕ ИНТЕНСИВНО ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО РУСЛА (НА ПРИМЕРЕ РЕК ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-05-00625а.

Работа посвящена исследованию условий процесса руслоформирования равнинных рек разной величины, протекающих в Томской области. Определены характерные расходы воды, влияние которых на русло является наиболее интенсивным. При определении этих расходов применялся метод Н.И. Маккавеева, методы оценки руслонаполняющих расходов и методы статистической обработки гидрологической информации. Прослежена динамика изменения значений руслоформирующих расходов воды во времени. Определены соотношения характерных расходов воды между собой. Установлена тесная связь между руслоформирующими расходами воды среднего интервала и руслонаполняющими расходами воды, подтвержденная высоким значением коэффициента детерминации.

Ключевые слова: русло реки; деформации русла; руслоформирующий расход; руслонаполняющий расход.

Речной поток и русло, в котором он протекает, находятся в постоянном взаимодействии. Несмотря на то что поток непрерывно формирует своё русло, интенсивность этого процесса тесно связана с водностью потока, определяющей его транспортирующую способность. Для характеристики воздействия потока на деформируемое им русло используется понятие руслоформирующего расхода воды (Q_p) [1]. Позднее появилось значительное количество интерпретаций этого термина и, соответственно, подходов к его определению. Так, предлагается определять данную характеристику как соответствующую расходу воды, проходящему в бровках русла (руслонаполняющий расход), среднему из годовых максимумов, либо расходу (обычно максимальному) некоторой обеспеченности (50, 10, 5, 1%) и т.п. Анализ таких подходов представлен в ряде работ разных авторов [2–5]. Все эти расходы далее рассматриваются нами как характерные.

Характерные расходы отражают в интегральном виде влияние на русловый режим рек величины стока воды и наносов и его распределения внутри года, а также ландшафтов водосбора и интенсивности процессов денудации, продукты которой поступают в русло. Эти расходы могут быть использованы для выявления региональных особенностей руслового режима рек. Одновременно они находят применение для определения морфометрических и гидроморфологических зависимостей разного типа [3].

Целью нашего исследования является определение характерных расходов воды, наиболее существенно влияющих на процессы формирования русла равнинных рек на юго-востоке Западно-Сибирской равнины. Для этого выбраны девять гидрологических постов (створов) на шести реках Томской области: р. Обь – г. Колпашево, р. Томь – г. Томск-гидроствор, р. Чулым – села Тегульдэт, Зырянское, Сергеево и Коммунарка, р. Васюган – с. Средний Васюган, р. Чая – с. Подгорное и р. Икса – с. Плотниково.

Для перечисленных створов определен ряд характерных расходов воды: руслоформирующий (по Н.И. Маккавееву), руслонаполняющий, максимальные расходы разной обеспеченности за многолетний период и ежедневные расходы разной повторяемости. При этом использовались метод Н.И. Маккавеева для определения руслоформирующих расходов воды и статистические методы обработки гидрометеорологической

информации для определения расходов воды разной обеспеченности и повторяемости.

Самой распространенной и логически обоснованной методикой определения Q_ϕ в нашей стране является методика, предложенная Н.И. Маккавеевым [1] и развиваемая Р.С. Чаловым [5]. В понимании Н.И. Маккавеева Q_ϕ – это расход, при котором в многолетнем разрезе проходит основной сток наносов и наблюдаются существенные русловые деформации. В конечном виде такой расход соответствует максимуму (в некоторых случаях может наблюдаться 2–3 максимума) функции $Q_\phi = f(Q^m PI \sigma)$, где Q – среднее значение расхода воды в расчетном интервале; m – показатель степени, устанавливаемый по логарифмической анаморфозе кривых связи расходов воды и наносов; P – вероятность расходов каждого интервала; I – средний уклон водной поверхности; σ – коэффициент, зависящий от ширины разлива реки (рис. 1). Для вычисления Q_ϕ исходный ряд среднесуточных расходов воды разбивают на интервалы с равным шагом (обычно 20 или более интервалов), для каждого из которых определяется средний расход воды Q и его вероятность P . Длина ряда для применения данной методики должна составлять не менее 20 лет. Период наблюдений должен включать в себя примерно равное число маловодных, средних по водности и многоводных лет [5]. В случае, если число многоводных лет в периоде будет значительно превышать число маловодных лет, значения Q_ϕ будут завышены, и наоборот.

Всего можно выделить три интервала руслоформирующих расходов воды: Q_ϕ *нижнего интервала* проходят при малой водности, соответствующей затоплению микро- и мезоформ речного дна (гряды, побочни, осередки). Воздействие руслоформирующих расходов данного интервала на дно и берега сводится к перемещению донных форм, а также переходу одних форм в другие. *Средний интервал руслоформирующих расходов воды* связан с водностью потока, соответствующей уровню наполнения русла вровень с бровками. К этому интервалу следует относить диапазон расходов воды, проходящих от уровней чуть ниже русловых бровок до уровней, превышающих их на 1 м. В данном случае поток воздействует на русло, способствуя переформированию крупных форм, таких, например, как отдельные излучины или узлы разветвлений. К *верхнему диа-*

пазону руслоформирующих расходов воды относятся расходы, проходящие при уровнях, значительно превышающих отметки русловых бровок. Расходы Q_{ϕ}

данного интервала могут оказывать существенные воздействия на целые участки русловой сети вплоть до полной смены типа руслового режима.

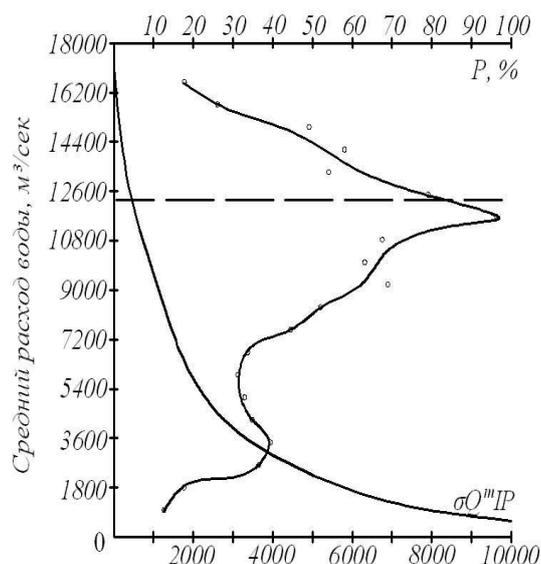


Рис. 1. Кривая для определения руслоформирующего расхода воды р. Обь у г. Колпашево методом Н.И. Маккавеева. Монотонно нисходящая кривая — кривая продолжительности суточных расходов воды. Пунктирная линия соответствует выходу воды на пойму

Методика Н.И. Маккавеева позволяет производить вычисления Q_{ϕ} по данным стационарных гидрологических постов, на которых в течение многолетнего периода измеряются расходы воды, что является ее существенным ограничением.

Ниже представлены результаты авторских расчетов значений Q_{ϕ} на разных участках рек Томской области,

среди которых отмечаются случаи присутствия в створе наблюдений руслоформирующих расходов воды одного, двух и трех интервалов (табл. 1). Наличие на реках региона разного количества интервалов руслоформирующих расходов воды говорит о неоднородности в условиях и соотношениях факторов руслоформирования.

Руслоформирующие расходы воды

Таблица 1

Река – пост	Период, годы	Q_{ϕ} нижнего интервала, м³/с	Q_{ϕ} среднего интервала, м³/с	Q_{ϕ} верхнего интервала, м³/с
р. Обь – г. Колпашево	1950–2005	3500	11800	–
р. Томь – г. Томск (гидроствор)	1950–2005	–	4960	–
р. Чулым – с. Тегульдет	1957–2005	260	1400	–
р. Чулым – с. Зырянское	1958–2005	500	2520	–
р. Чулым – с. Сергеево	1958–1996	440	2800	–
р. Чулым – с. Коммунарка	1950–2005	550	3100	–
р. Васюган – с. Ср. Васюган	1954–1993	200	750	–
р. Чая – с. Подгорное	1954–2005	87,5	545	–
р. Икса – с. Плотниково	1961–2005	9,5	100	230

Для анализа устойчивости величины Q_{ϕ} во времени авторами для тех же створов рассчитаны ее значения за разные периоды времени. Для этого исходные ряды ежедневных расходов воды были разделены на две равные части, по которым затем производился расчет методом Н.И. Маккавеева. На рис. 2 представлены совмещенные кривые для определения значений Q_{ϕ} для р. Обь у г. Колпашево, а в табл. 2 – результаты расчетов по всем створам.

Как показывают результаты расчетов за разные периоды, Q_{ϕ} являются весьма неустойчивыми во времени характеристиками. Подобная изменчивость может объясняться как естественными причинами, так и последствиями антропогенного воздействия на реку и ее водосбор. В последние десятилетия наблюдаются трансформации водного режима рек и его отдельных состав-

ляющих, вероятно, вызванные климатическими изменениями [6]. На реках региона они проявляются в виде изменения как самих расходов воды, так и повторяемости того или иного значения расхода воды во времени. К антропогенным причинам изменения расходов Q_{ϕ} можно отнести как прямое регулирование стока реки (например, создание Новосибирской ГЭС, что повлияло на внутригодовое распределение стока ниже по течению р. Обь) или изменение морфологии русла на участке значительной протяженности (например, создание полей карьеров по добыче песчано-гравийной смеси на р. Томи в районе Томска, что привело к просадке дна и уровней воды и изменению режима движения наносов), так и воздействия на площади водосбора реки, способные отразиться на элементах водного баланса.

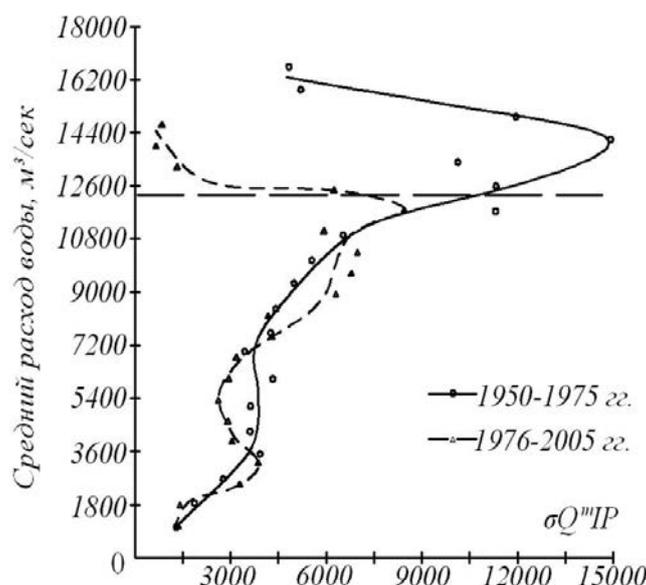


Рис. 2. Кривые для определения руслоформирующих расходов воды р. Оби у г. Колпашево за разные расчетные периоды

Таблица 2

Руслоформирующие расходы воды, рассчитанные за разные периоды времени

Створ	Период, годы	Q_{ϕ} нижнего интервала, $\text{м}^3/\text{с}$	ΔQ_{ϕ} , $\text{м}^3/\text{с}$	Q_{ϕ} среднего интервала, $\text{м}^3/\text{с}$	ΔQ_{ϕ} , $\text{м}^3/\text{с}$	Q_{ϕ} верхнего интервала, $\text{м}^3/\text{с}$	ΔQ_{ϕ} , $\text{м}^3/\text{с}$
р. Обь – г. Колпашево	1950–1975	4400	-900	–	-2500	14200	-2500
	1976–2005	3500		11700			
р. Томь – г. Томск (гидроствор)	1950–1975	–	–	6350	-1400	–	–
	1976–2005	–		4950			
р. Чулым – с. Тегульдет	1957–1981	262	-25	1400	-80	–	–
	1982–2005	237		1320			
р. Чулым – с. Зырянское	1958–1981	320	+205	2800	+260	–	–
	1982–2005	525		3060			
р. Чулым – с. Сергеево	1958–1977	440	-55	2600	+590	–	–
	1978–1996	385		3190			
р. Чулым – с. Коммунарка	1950–1975	490	+60	2680	+370	–	–
	1976–2005	540		3050			
р. Васюган – с. Ср. Васюган	1954–1973	200	-55	865	-140	–	–
	1974–1993	145		725			
р. Чай – с. Подгорное	1954–1980	280	-180	530	-50	–	–
	1981–2005	90		480			
р. Икса – с. Плотниково	1961–1983	40	-25	120	+20	–	–
	1984–2005	15		140			

При практическом использовании метод Н.И. Маккавеева имеет ряд недостатков. Он позволяет определять значения Q_{ϕ} только для конкретного створа и требует при этом значительного объема исходных данных, что весьма проблематично при исследовании значительного количества рек, где не проводятся гидрометрические наблюдения. По этим причинам широкое распространение при решении данных проблем получило выражение руслоформирующего расхода воды с помощью некоторых характерных расходов. Наиболее часто с этой целью применяются следующие характерные расходы: расходы воды в бровках русла (руслонаполняющий расход), расходы воды фиксированной повторяемости и максимальные и средние расходы определенной обеспеченности [3, 5, 7].

Большой интерес для практики представляют собой характерные расходы воды фиксированной повторяемости и заданной обеспеченности. В табл. 3 приведены значения Q_{ϕ} , определенные методом Н.И. Маккавеева, и соответствующие им повторяемости.

В целом из табл. 3 видно, что определенные методом Н.И. Маккавеева значения руслоформирующих расходов воды попадают в довольно небольшие диапазоны повторяемостей. По всем рассматриваемым рекам эти диапазоны составляют 2,33–5,54% для среднего интервала Q_{ϕ} (без учета створа на р. Икса у с. Плотниково) и 17,1–35,8% для нижнего интервала. Следует добавить, что эти реки заметно отличаются друг от друга по водному режиму, условиям формирования стока и руслоформирования. Кроме того, подобные различия могут быть объяснены и различием размеров рек. В пределах участков одной реки, даже большой протяженности, диапазоны повторяемостей еще меньше. Отмеченное сходство повторяемостей значений руслоформирующих расходов позволяет оценивать Q_{ϕ} для слабо изученных и неизученных рек путем определения его величины, соответствующей наперед заданному интервалу повторяемости.

Руслоформирующие расходы воды, определенные по методу Н.И. Маккавеева, и их повторяемость, %

Створ	Расчетный период, годы	Руслоформирующие расходы воды, Q_{ϕ}					
		нижний		средний		верхний	
		$Q_{\phi}, \text{м}^3/\text{с}$	%	$Q_{\phi}, \text{м}^3/\text{с}$	%	$Q_{\phi}, \text{м}^3/\text{с}$	%
р. Обь – г. Колпашево	1950–2005	3 500	32,7	11 800	5,54	–	–
р. Томь – г. Томск (гидроствор)	1950–2005	–	–	4 960	4,40	–	–
р. Чулым – с. Тегульдет	1957–2005	260	28,3	1 400	2,49	–	–
р. Чулым – с. Зырянское	1958–2005	500	27,9	2 520	4,15	–	–
р. Чулым – с. Сергеево	1958–1996	440	35,8	2 850	3,68	–	–
р. Чулым – с. Коммунарка	1950–2005	550	35,8	3 100	4,82	–	–
р. Васюган – с. Ср. Васюган	1954–1993	200	21,6	750	3,35	–	–
р. Чая – с. Подгорное	1954–2005	–	–	540	2,33	–	–
р. Икса – с. Плотниково	1964–1973	9,5	17,1	102	0,97	234	0,06

Целесообразно попытаться выразить руслоформирующий расход воды через расход заданной обеспеченности в многолетнем ряду наблюдений. При этом для каждого интервала значений Q_{ϕ} вероятности определяются по ряду соответствующих фазово-однородных расходов воды. Так, для среднего и верхнего интервалов это ряд максимальных годовых расходов

воды (обычно наблюдаемых в период половодья), для нижнего – ряд среднегодовых расходов. По исходным рядам нами построены кривые обеспеченности максимальных и среднегодовых расходов воды, по которым были определены обеспеченности значений Q_{ϕ} , определенных методом Н.И. Маккавеева. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Руслоформирующие расходы воды, определенные методом Н.И. Маккавеева, и их обеспеченность, %

Створ	Расчетный период	Руслоформирующие расходы воды, Q_{ϕ}					
		нижний		средний		верхний	
		$Q_{\phi}, \text{м}^3/\text{с}$	%	$Q_{\phi}, \text{м}^3/\text{с}$	%	$Q_{\phi}, \text{м}^3/\text{с}$	%
р. Обь – г. Колпашево	1950–2005	3 500	61,5	11 800	66,1	–	–
р. Томь – г. Томск (гидроствор)	1950–2005	–	–	4 960	8,8*	–	–
р. Чулым – с. Тегульдет	1957–2005	260	66,7	1 400	76,7	–	–
р. Чулым – с. Зырянское	1958–2005	500	74,3	2 520	73,0	–	–
р. Чулым – с. Сергеево	1958–1996	440	94,1	2 850	54,0	–	–
р. Чулым – с. Коммунарка	1950–2005	550	96,2	3 100	64,0	–	–
р. Васюган – с. Ср. Васюган	1954–1993	200	24,3	750	18,7	–	–
р. Чая – с. Подгорное	1954–2005	87,5	35,8	545	35,9	–	–
р. Икса – с. Плотниково	1961–2005	9,5	23,8	100	37,0	230	13,2

* Значение обеспеченности определено по ряду 30-дневных расходов воды.

Отметим, что значение руслоформирующего расхода воды для р. Томи у г. Томска (гидроствор) не попадает ни в диапазон максимальных расходов в году, ни средних. По этой причине для его выражения представлена обеспеченность, определенная по ряду 30-дневных расходов воды, или расходов 30-дневной повторяемости в течение года.

Можно отметить, что обеспеченности, соответствующие руслоформирующим расходам воды, довольно сильно различаются для разных рек. Особенно выделяются из рассматриваемых здесь рек Томь и реки меньших размеров (Васюган, Икса, Чая), тогда как для Оби и Чулыма получились близкие результаты. Более того, для р. Чулым отмечаются постоянное увеличение значения обеспеченности вниз по течению для нижнего интервала и ее снижение для среднего.

Следующим характерным расходом воды, получившим значительное распространение в практике, является руслонаполняющий расход воды. Методом его определения для конкретного створа является анализ кривых зависимостей $Q = f(h)$ при наличии данных о стоке воды за периоды разной водности и отметок бровок в изучаемом створе. Данная методика довольно проста, но ее существенным минусом является необходимость большого числа гидрометрических наблюдений, а по существу она применима лишь для гидростворов, используемых продолжительное время. Методика определения

заключается в вычислении расхода воды, проходящего при уровне, соответствующем бровкам русла.

В табл. 5 сопоставлены значения руслонаполняющих расходов воды, определенных для отдельных створов, со значениями руслоформирующих расходов воды разных интервалов, определенных по методу Н.И. Маккавеева, а на рис. 3 представлен график соотношения руслонаполняющих и руслоформирующих расходов воды среднего интервала. Средний интервал выбран по той причине, что он по своей сути наиболее хорошо должен соотноситься с $Q_{бр}$.

Полученные результаты показывают очень тесную связь руслонаполняющих и руслоформирующих расходов воды, относящихся к среднему интервалу. Данные значения довольно близки для таких створов, как Колпашево, Тегульдет, Зырянское, Коммунарка, Подгорное и Плотниково. Однако и для остальных створов различия в значениях не очень велики. Стоит лишь отметить, что соотношение для створа у г. Томск (гидроствор) выделяется из общего ряда, так как единственный руслоформирующий расход Q_{ϕ} соответствует уровням воды, располагающимся значительно ниже отметок бровок русла, что связано, по-видимому, с техногенными причинами – искусственным углублением русла Томи у Томска при разработке гравийных карьеров и прокладке судоходной прорези на этом участке.

Значения руслонаполняющих и руслоформирующих расходов воды для отдельных створов

Створ	Руслонаполняющий расход воды, м ³ /с	Руслоформирующий расход воды среднего интервала, м ³ /с	Руслоформирующий расход воды нижнего интервала, м ³ /с
р. Обь – г. Колпашево	12 400	11 800	3 500
р. Томь – г. Томск (гидроствор)	10 700	4 960	–
р. Чулым – с. Тегульдет	1 500	1 400	260
р. Чулым – с. Зырянское	3 250	2 520	500
р. Чулым – с. Сергеево	3 400	3 000	440
р. Чулым – с. Коммунарка	3 050	3 100	550
р. Васюган – с. Ср. Васюган	850	750	200
р. Чая – с. Подгорное	570	540	310
р. Икса – с. Плотниково	109	102	10

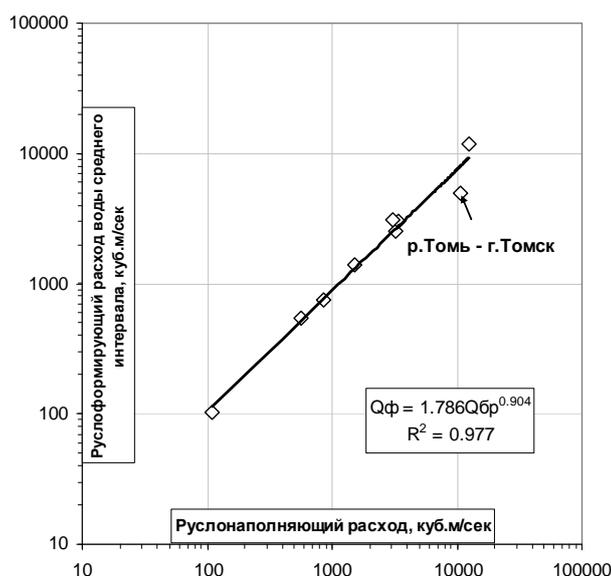


Рис. 3. Соотношение руслонаполняющих и руслоформирующих расходов воды среднего интервала для отдельных створов

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Взаимодействие потока с руслом – весьма сложный и неустойчивый во времени процесс. Интенсивность их взаимодействия весьма изменчива во времени, причиной чему может служить даже незначительное изменение руслоформирующих условий на участке. Одним из основных факторов, определяющих процесс руслоформирования, является прохождение некоторых расходов воды, которые в силу своей величины и мощности либо частой повторяемости оказывают наибольшее воздействие на русло. К их числу принято относить такие характерные расходы, как руслоформирующий (в трактовке Н.И. Маккавеева), руслонаполняющий, расходы заданной обеспеченности и повторяемости, максимальные в году, среднегодовые и ряд других.

2. Выбор конкретного характерного расхода воды и методика его определения зависят от наличия исходных материалов, задачи, в рамках которой он определяется, особенностей участка русла и прочих обстоятельств.

3. Как показали результаты расчетов, выполненных в данной работе, значения руслоформирующих расходов воды, определенных по методу Н.И. Маккавеева, являются весьма неустойчивыми во времени. Такая неустойчивость может быть обусловлена как естественными причинами, так и причинами, вызванными деятельностью человека непосредственно в русле реки

или на водосборе. Все эти причины могут привести не только к изменению значений руслоформирующих расходов воды и интенсивности их воздействия на русло, но и к их переходу в другой интервал (как это, по видимому, произошло на р. Оби у г. Колпашева) и даже к попаданию значений в новые интервалы (р. Икса у с. Плотниково).

4. Руслоформирующие расходы воды в значительной степени зависят от водного режима реки, весьма чутко реагируют на изменения факторов, определяющих процесс руслоформирования. Методика определения руслоформирующих расходов Q_{ϕ} , предложенная Н.И. Маккавеевым, позволяет учитывать как многолетние колебания водности, так и особенности внутригодового распределения стока, что позволяет расценивать Q_{ϕ} как показатель влияния изменчивости водности рек на процесс руслоформирования. Иными словами, можно сказать, что руслоформирующие расходы воды можно расценивать как своеобразные индикаторы устойчивости водного и руслового режимов реки на конкретном участке.

5. Принимая во внимание недостатки метода Н.И. Маккавеева, целесообразно найти способ вычисления Q_{ϕ} на основании меньшего количества исходных данных либо по соотношению его с другими характерными расходами воды, определение которых не столь требовательно к наличию исходных рядов наблюдений и менее

трудоемко. Так, в рамках данной работы авторам удалось на основании собственных вычислений для рек исследуемого региона установить тесную связь значений руслоформирующих и руслонаполняющих расходов воды.

6. Выполненные исследования в практическом плане позволили выявить важные соотношения руслофор-

мирующих расходов воды, вычисленных по методу Н.И. Маккавеева, со значениями их повторяемостей и обеспеченностей, которые можно использовать как альтернативный способ определения Q_{ϕ} в случае недостаточности наблюдений за стоком воды на исследуемом участке реки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М. : Изд-во АН СССР, 1955.
2. *Каменсков Ю.И.* К определению понятия и значения руслоформирующего расхода воды // *Метеорология и гидрология*. 1986. № 7.
3. *Антроповский В.И.* Гидролого-морфологические закономерности и фоновые прогнозы перестроения русел рек. СПб. : Кристалл, 2006.
4. *Карасев И.Ф.* Руслоформирующие расходы воды // *Метеорология и гидрология*. 1986. № 8.
5. *Чалов Р.С.* Руслоформирующие расходы воды // *Вестник Московского университета. Сер. 5. Геогр.* 2006. № 1.
6. *Земцов В.А.* О многолетней изменчивости речного стока в Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Прил. № 3 (IV)*. Томск, 2003.
7. *Navratil O., Albert M-B., Hérouin E., Gresillon J-M.* Determination of bankfull discharge magnitude and frequency: comparison of methods on 16 gravel-bed river reaches // *Earth Surf. Process. Landforms*. 2006. Vol. 31.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 27 июня 2011 г.