

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРЯДООБРАЗОВАНИЯ НА РАЗВЕТВЛЕННОМ УЧАСТКЕ р. ТОМИ В СВЯЗИ С ОСОБЕННОСТЯМИ ЕГО ВОДНОГО И ЛЕДОВОГО РЕЖИМОВ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-05-00625а.

Рассматриваются грядовые поля, состоящие из крупного гравийного материала и располагающиеся в русле р. Томи на разветвленном участке от с. Вершинино до с. Коларово. Поскольку данные русловые образования не являются характерными для р. Томи, большой интерес представляют выявление причин их возникновения на рассматриваемом участке и определение возможных расходов воды, способных сформировать и уничтожить подобные гряды. В работе рассмотрены особенности водного и ледового режимов участка, определены условия образования изучаемых гряд и их генезис. Сделан вывод об участии заторных явлений в процессе перераспределения стока по речным протокам, вследствие которого имеет место процесс грядообразования.

Ключевые слова: гряды; р. Томь; грядовое поле; гравийный материал; ледовый затор; расход воды.

Чаще всего наносы, передвигающиеся по дну русел равнинных рек, движутся, образуя различные по размерам и формам скопления – русловые формы. Это могут быть гряды, рифеля, антидюны и т.д. Практически повсеместно наблюдаются гряды на дне крупных равнинных рек, сложенных крупным и мелким песком. Закономерности образования и движения этих гряд изучаются давно, и существует достаточно много различных по своей структуре эмпирических и полуэмпирических формул, связывающих элементы гряд со значениями гидравлических характеристик потока, при которых они образованы и перемещаются. Гораздо реже встречаются такие формы в руслах рек, сложенных крупным обломочным материалом – гравием и галькой. Эти русла более распространены в горных и предгорных областях и отличаются большой изменчивостью скоростей течения и уклонов водной поверхности по длине потока. Тем не менее и на равнинных реках можно встретить чередующиеся близкие по форме и

размерам гряды из крупного обломочного материала. Подобные места достаточно редки, и возникает предположение, что образование таких сравнительно небольших по площади грядовых полей связано с гидравлическими условиями, отличными от распространенных повсеместно. Сведения о русловых грядах, сложенных крупным обломочным материалом на реках, встречаются в работах П. Карлинга [1], К. Вулдриджа [2], Р.С. Чалова [3] и других исследователей в разных странах.

На разветвленном участке р. Томи от с. Вершинино до с. Коларово (рис. 1) в однорукавном русле преобладают наносы галечной, а местами и валунной фракций, в протоках – более мелких галечно-гравелистых фракций. Грядовой рельеф в общем случае не развит, но имеют место небольшие поля со сплошным распространением грядовых форм, сложенных гравийным материалом. Эти поля представляют большой интерес, так как не являются характерными русловыми формами как для рассматриваемого участка, так и для р. Томи.

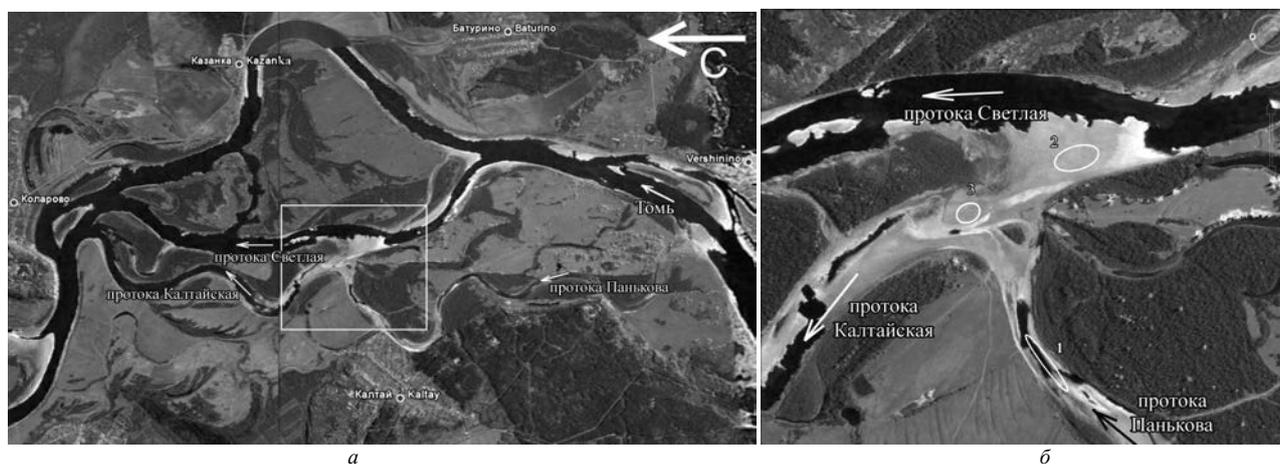


Рис. 1. Космоснимки рассматриваемого участка: *а* – в прямоугольнике заключен участок, на котором расположены исследуемые грядовые поля; *б* – окружностями обозначены местоположения грядовых полей, цифрами – номера полей

Грядовые поля расположены в месте пересечения проток Светлая и Калтайская, а также в протоке Панькова (верхняя часть Калтайской протоки). Длина и высота наблюдаемых гряд в среднем варьируют на разных грядовых полях от 6 до 17,5 м и от 0,15 до 0,6 м соответственно. Места распространения всех трех грядовых полей в межень свободны от воды, протока Панькова в год с низкой меженью пересыхает полно-

стью. Полевые работы по изучению грядового рельефа на исследуемом участке проводились авторами с участием сотрудников и студентов кафедры гидрологии ТГУ. В ходе работ была осуществлена съемка находящихся на этом участке грядовых полей тахеометром Topcon GTS-230N Series и взяты пробы наносов.

Грядовое поле № 1 (рис. 2, *а*) до весны 2010 г. располагалось в протоке Панькова, средняя длина и вы-

сота гряд составляли здесь 17,5 и 0,61 м соответственно (табл. 1), 50%-ный диаметр наносов – 12 мм (рис. 3, а). Грядовое поле было уничтожено половодьем 2010 г., и в настоящий момент о его существовании свидетельствуют лишь сохранившиеся полосы растительности, которая располагалась в подвалах гряд (рис. 2, б).

Грядовые поля № 2 (рис. 2, в) и № 3 (рис. 2, г) расположены в месте соединения проток Светлая и Калтайская. В межень это место полностью осушается, зато в половодье здесь может проходить значительный сток. Средние длина и высота гряд составляют у грядового поля № 2 6,4 и 0,14 м, а у грядового поля № 3 – 11 и 0,18 м (табл. 1), 50%-ный диаметр наносов – 12 и 11 мм соответственно (рис. 3, б, в).

Размеры грядовых форм напрямую зависят от гидравлических характеристик потока (скорости и расхода воды), и чем они больше, тем больших размеров гряды могут быть сформированы. В таком случае остается непонятным, каким образом грядовые поля таких размеров, причем сложенные крупным гравийным материалом, возникают и существуют в несвойственных для них условиях – в местах, не отличающихся высокими расходами воды при прохождении половодья. Чтобы попытаться выяснить причину возникновения данных грядовых полей на рассматриваемом участке, обратимся к его водному режиму. Как уже было отмечено ранее, места расположения всех трех грядовых полей в межень свободны от воды, таким образом, гряды могут быть образованы лишь в период половодья.



а



б



в



г

Рис. 2. Фото грядовых полей: а – грядовое поле № 1; б – участок, соответствующий грядовому полю № 1 в настоящее время, гряды смыты; в – грядовое поле № 2; г – грядовое поле № 3

Результаты измерений гряд рассматриваемых грядовых полей

№ гряды	Поле № 1		Поле № 2		Поле № 3	
	Длина гряды	Высота гряды	Длина гряды	Высота гряды	Длина гряды	Высота гряды
1	17,8	0,5	6,1	0,07	7,5	0,18
2	19,5	0,55	7,5	0,24	13,1	0,21
3	13,5	0,63	7,8	0,17	9,6	0,26
4	21,7	0,63	5,5	0,16	8,1	0,23
5	15,2	0,73	5	0,07	13,3	0,16
6					12,4	0,15
7					7,1	0,16
8					9,5	0,1
9					17,9	0,13
Среднее	17,5	0,61	6,4	0,14	11	0,18

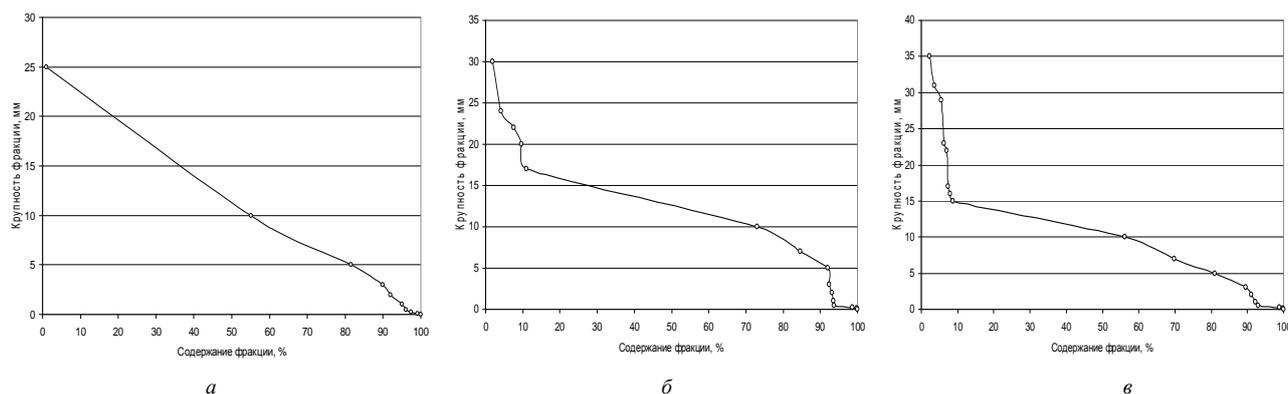


Рис. 3. Кривые гранулометрического состава проб наносов: а – для грядового поля № 1; б – для грядового поля № 2; в – для грядового поля № 3

Половодье является основной фазой водного режима р. Томи. В этот период проходит 60–90% годового стока и отмечаются максимальные расходы и уровни воды. Максимальный расход воды р. Томи у Томска составил 13 600 м³/с в 1937 г. Средний максимальный расход воды за весь период наблюдений с 1918 г. со-

ставляет 8 340 м³/с. По данным наблюдений за стоком ОАО «Сибречпроект» и сотрудников кафедры гидрологии ТГУ, на рассматриваемом участке начиная с 1984 г. расходы воды распределены по протокам (отдельно для верхних и нижних их частей) в период половодья согласно табл. 2.

Таблица 2

Распределение расходов воды по протокам на исследуемом участке

Год	Основное русло				Протока Светлая				Протока Калтайская			
	верхняя часть		нижняя часть		верхняя часть		нижняя часть		верхняя часть (пр. Панькова)		нижняя часть	
	Q, м ³ /с	%	Q, м ³ /с	%	Q, м ³ /с	%						
1984	1 610	49	2 100	42	1 380	42	2 130	43	280	9	750	15
1998	1 775	55	2 525	46	1 140	35	1 945	35	300	9	1 030	18
2001	1 203	52	2 400	48	842	36	1 800	36	192	8	800	16
2007	–	–	1 655	41	–	–	1 780	44	–	–	587	15
2008	1 838	47	1 749	47	1 761	45	1 535	41	279	8	444	12
2009	2 043	50	2 030	48	1 803	43	1 645	40	315	7	644	13

В последние годы на р. Томи участились ледовые заторы и максимальные уровни воды заторного происхождения. За последние 14 лет, с 1998 по 2011 г., заторы во время весеннего вскрытия реки наблюдались в 40% случаев, а в 2010 г. произошел очень мощный ледовый затор, в результате которого на посту Томск-гидроствор наблюдался самый высокий уровень воды за весь период наблюдений с 1964 г. С высокой долей вероятности можно полагать, что образование ледовых заторов связано с антропогенной нагрузкой на р. Томь, в частности с добычей из ее русла гравия. На исследуемом участке активно производится разработка гравия в русловых карьерах, особенно в последние годы. В связи с этим и также со сложной русловой организа-

цией заторы на данном участке – не редкость. Рассмотрим схемы их характерного расположения:

а) Затор в основном русле р. Томи начинается ниже с. Казанка и распространяется выше по течению до самого входа в протоку Светлая. Основной сток воды осуществляется через протоку Светлая (рис. 4).

б) Затор в основном русле р. Томи, начинаясь ниже с. Казанка, распространяется до входа в протоку Светлая, а также затор в самой протоке Светлая распространяется выше по течению от выхода из нее до ее пересечения с протокой Калтайская. Основной сток воды в данном случае проходит через верхнюю часть протоки Светлая и далее идет по протоке Калтайская (рис. 5). Такой случай наблюдался в половодье 2010 г.

в) Затор в основном русле р. Томи, начинаясь ниже с. Казанка, распространяется вверх по течению до входа в протоку Панькова. Основной сток воды осуществ-

ляется через протоку Калтайская (в том числе протоку Панькова) (рис. 6). Аналогичный случай наблюдался в половодье 2010 г.

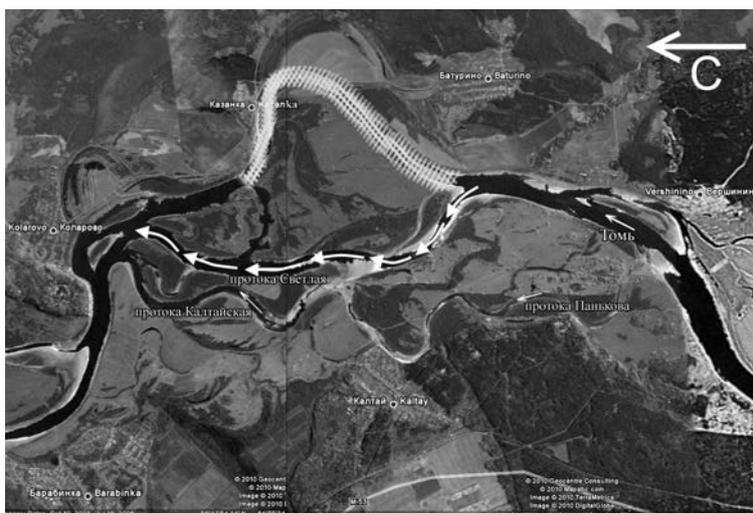


Рис. 4. Одна из характерных схем возникновения затора (затор обозначен штриховкой) и направления основного стока воды (обозначены стрелками) на рассматриваемом участке



Рис. 5. Одна из характерных схем возникновения затора (затор обозначен штриховкой) и направления основного стока воды (обозначены стрелками) на рассматриваемом участке



Рис. 6. Одна из характерных схем возникновения затора (затор обозначен штриховкой) и направления основного стока воды (обозначены стрелками) на рассматриваемом участке

В результате заторных явлений, развивающихся в соответствии с описанными схемами, водность в протоках Светлая и Калтайская в период половодья может наблюдаться существенно выше, чем при отсутствии ледовых заторов. Таким образом, картина распределения стока между протоками, показанная в табл. 1, искажается, и, в зависимости от места стояния затора, какой-либо рукав может выполнять функцию основного русла, сосредотачивая в себе преобладающее количество стока воды. В данном контексте можно предположить, что грядовые поля на рассматриваемом участке были образованы в результате такого рода перераспределения стока из одной протоки в другую. Так, грядовое поле № 1 могло образоваться в результате перераспределения стока из главного русла в протоку Панькова (см. рис. 4, *в*), а поля № 2 и № 3 – в результате перераспределения стока из протоки Светлая в протоку Калтайская (см. рис. 4, *б*).

Для проверки этого предположения была сделана попытка реконструировать реально возможные расходы воды, которые могли образовать гряды указанных размеров на рассматриваемом участке р. Томи, используя существующие зависимости морфометрических параметров гряд от гидравлических характеристик потока. Такие зависимости разработаны многими авторами и не являются универсальными: если в одних условиях они приводят к удовлетворительному совпадению с натурными данными, то в других оказываются совершенно непригодными. Причем трудно предсказывать пределы применимости этих формул [4]. Существующие формулы различны по структуре и показывают зависимость параметров донных форм от таких показателей, как, например, число Фруда, глубина и ширина потока, средняя скорость потока, критические скорости движения наносов, слагающих гряды, средний диаметр частиц и их гидравлическая крупность.

В качестве исходных данных для расчетов были использованы параметры гряд, полученные в результате обработки полевых съемок, а именно: длина, высота гряд и гранулометрический состав наносов на трех рассматриваемых грядовых полях, поперечные профили русла для каждого поля. Расчетные уровни воды задавались исходя из информации об отметках поймы, которые оказались затопленными в половодье 2010 г.

В ходе анализа рассматриваемых зависимостей выяснилось, что во многих из них параметры гряд прямо или косвенно зависят от скорости течения воды. Такие зависимости составили основу для расчетов, среди них формулы Ю.Т. Борщевского, Ж. Буссинеска, Б.Ф. Сниценко, В.С. Кнороза, Г.В. Железнякова и В.К. Дебольского, А.В. Караушева, В.Ф. Пушкарева [4–6].

Таким образом, не составило труда по имеющимся параметрам гряд определить скорости течения воды во время их образования и передвижения, используя для этого разные формулы. Однако не все зависимости показали удовлетворительный результат, и в большинстве случаев получаемые цифры отличаются от реально возможных скоростей течения на несколько порядков. И лишь формулы В.С. Кнороза (1), (2) для расчета параметров гряд дают близкий к реальности результат:

$$l_r = \frac{\left(\lg \frac{R}{k} + 6\right) h_r}{1,2} \left(\frac{v}{v - v_0}\right)^{2/3}, \quad (1)$$

$$h_r = 3,5R \left(1 - \frac{v_0}{v}\right)^{2/3} \left(\lg \frac{R}{k} + 6\right), \quad (2)$$

где l_r – длина гряды; h_r – высота гряды; R – гидравлический радиус; k – 50%-ный диаметр частиц; v – скорость течения по вертикали над грядой; v_0 – неразмыывающая скорость по Кнорозу:

$$v_0 = 1,3 \sqrt{gd} \lg \frac{14,7R}{k^{0,75}}. \quad (3)$$

Также представляет интерес зависимость Н.С. Знаменской [4], обобщившей большое количество экспериментальных данных, однако ввиду отсутствия необходимой исходной информации не представляется возможным использовать ее для расчета расхода воды, при котором происходит образование и передвижение гряд. Тем не менее ее можно использовать для условий смыва гряд. По указанным причинам формулы В.С. Кнороза приняты нами за основу, и по скорости течения и данным промеров русла с их помощью определен расход воды, способный сформировать исследуемые грядовые поля. Оказалось возможным также определить расход воды, характерный для условий смыва гряд, по зависимости Н.С. Знаменской. Результаты расчетов по формулам В.С. Кнороза при четырех высоких уровнях воды для условий образования и передвижения гряд, а также результаты расчета по зависимости Н.С. Знаменской для условий смыва гряд приведены в табл. 3.

Таблица 3

Скорости и расходы воды, полученные по параметрам гряд

№ грядового поля	Уровень воды БС, м	Длина гряды, l_r , м	Высота гряды, h_r , м	Скорость течения, $v = f(l_r)$, м/с	Скорость течения, $v = f(h_r)$, м/с	Площадь живого сечения, ω , м ²	Расход воды, $Q = f(l_r)$, м ³ /с	Расход воды, $Q = f(h_r)$, м ³ /с
Поле 1	81	17,5	0,61	1,86	1,56	1070	1914	1606
	80			1,83	1,54	882	1543	1294
Поле 2	81	10,93	1,18	2,03	1,51	1260	2510	1867
	80			1,98	1,47	1015	1966	1462
Поле 3	81	6,2	0,14	2,71	1,49	1540	4022	2205
	80			2,66	1,46	1200	3056	1676
Поле 1 (смыв гряд)	81	17,5	0,61	4,46		1070	4051	

Как указано в табл. 2, расход воды в протоке Панькова в период максимума весеннего половодья (при отсутствии ледовых заторов) составляет 8–9% от общего расхода р. Томи. Максимальный расход воды в Томске в

1937 г. составляет 13 600 м³/с, за последние 10 лет наибольший расход наблюдался в 2001 г. – 10 500 м³/с. Таким образом, максимальный расход протоки Панькова в период открытого русла составлял не более 1 200 м³/с

(максимальный измеренный в 2009 г. равен $640 \text{ м}^3/\text{с}$ при уровне воды около 80 м БС). При этом расход воды в протоке Панькова, рассчитанный по параметрам гряд по формулам В.С. Кнороза, превышает максимальные расходы открытого русла для такого же уровня в 1,5 раза и по зависимости Н.С. Знаменской для условий смыва гряд – более, чем в 3 раза, что составляет порядка 70% общего расхода р. Томи. Расход воды в верхней части протоки Светлая при аналогичных условиях составляет около 40% общего расхода Томи (табл. 2), и полученные по формулам Кнороза значения вполне этому соответствуют. Однако грядовые поля сформированы не в самой протоке Светлая, а в месте ее соединения с Калтайской,

что свидетельствует о явном перераспределении стока воды из Светлой в Калтайскую. Очевидно, что такое перераспределение стока может иметь место лишь в случае существенного препятствия в нижней части протоки Светлой, которым может являться ледовый затор. Таким образом, на участке соединения двух проток расходы воды могут быть весьма близкими к расходам протоки Светлая в период открытого русла. Полученные результаты дают основание для предположения о том, что рассматриваемые грядовые поля были образованы, а в особенности и смыты (протока Панькова) именно как следствие образования ледовых заторов на исследуемом участке.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Carling P.A.* An appraisal of the velocity-reversal hypothesis for stable pool-riffle sequences in the river Severn, England // *Earth surface processes and landforms*. 1991. Vol. 16. P. 19–31.
2. *Wooldrige C.L., Hickin E.J.* Radar architecture and evolution of channel bars in wandering gravel-bed rivers: Fraser and Squamish rivers, British Columbia, Canada // *Journal of Sedimentary Research*. 2005. Vol. 75. P. 844–860.
3. *Морфодинамика русел равнинных рек / Р.С. Чалов [и др.].* М. : ГЕОС, МГУ, 1998. 288 с.
4. *Знаменская Н.С.* Донные наносы и русловые процессы. Л. : Гидрометеиздат, 1976. 192 с.
5. *Караушев А.В.* Речная гидравлика. Л. : Гидрометеиздат, 1969. 416 с.
6. *Пушкарев В.Ф.* Движение влекомых наносов // *Труды ГГИ*. 1948. Вып. 62. С. 93–110.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 28 июня 2011 г.