

ТВЕРДЫЙ СТОК

ВЗВЕШЕННЫЕ НАНОСЫ

Основной объем твердого стока, поступающего в дельту Волги, формируется за счет продуктов водной эрозии талых вод в бассейне реки. Это видно из рис. 98, показывающего, что пик твердого расхода у Верхне-Тебьяжьего проходит в начале мая, за 25—30 дней до пика расхода воды.

Систематическое изучение твердого стока, поступающего в дельту, началось лишь в последнее десятилетие работами Волжской устьевой гидрометеорологической станции. При экспедиционных ведомственных работах прежних лет имели место лишь единичные определения твердых расходов. Только при изысканиях В. В. Валедицкого и Б. А. Аполлова в 1925 г. [60] был проведен круглогодичный цикл определений твердых расходов в западной части дельты. Регулярные наблюдения над твердым стоком у Сталинграда начались несколько раньше, чем в дельте, но они имеют длительные пропуски.

Твердый сток взвешенных наносов у Сталинграда (Дубовка) определен достаточно точно для периода 1934, 1935, 1938—1940 гг. со средним водным стоком 191 км^3 и равен $18,8 \text{ млн. т}$ при средней мутности 100 г/м^3 [138]. Если считать в первом приближении объем годового твердого стока пропорциональным водному стоку, то для среднемноголетнего стока Волги в $256,5 \text{ км}^3/\text{год}$ (1881—1953 гг.) у Сталинграда средний многолетний твердый сток (взвешенных наносов) будет составлять $25,5 \text{ млн. т}$, а средняя мутность — 98 г/м^3 . Если аналогичный расчет сделать, основываясь на данных за 1949—1953 гг. (табл. 127), то среднемноголетний твердый сток взвешенных наносов у Сталинграда получается равным 21 млн. т , а средняя мутность 85 г/м^3 . При этом, судя по данным за 1950—1952 гг., имевшим мало различающийся водный сток ($\pm 1\%$), колебания годового твердого стока при одном и том же водном стоке возможны до $\pm 20\%$. Если к этому добавить, что современная точность установления нормы водного стока в среднем равна $\pm 6\%$ (Б. Д. Зайков, 1946), а нормы твердого стока — $15\text{—}20\%$ (Г. В. Лопатин, 1952), то представляется правильным считать среднемноголетний твердый сток взвешенных наносов у Сталинграда равным 23 млн. т с возможным отклонением в годы, средние по водности, — 5 млн. т . При наблюдаемых колебаниях стока Волги у Сталинграда от 160 до $360 \text{ км}^3/\text{год}$ вероятны колебания твердого стока взвешенных наносов в среднем от 15 до 33 млн. т с крайними пределами его от 12 до 40 млн. т .

Распределение твердого стока по сезонам года для Дубовки таково: зима — 2 , весна — 70 , лето — 22 , осень — 6% . Средняя мутность Волги от впадения Камы (1800 км от моря) до Сталинграда (585 км от моря)

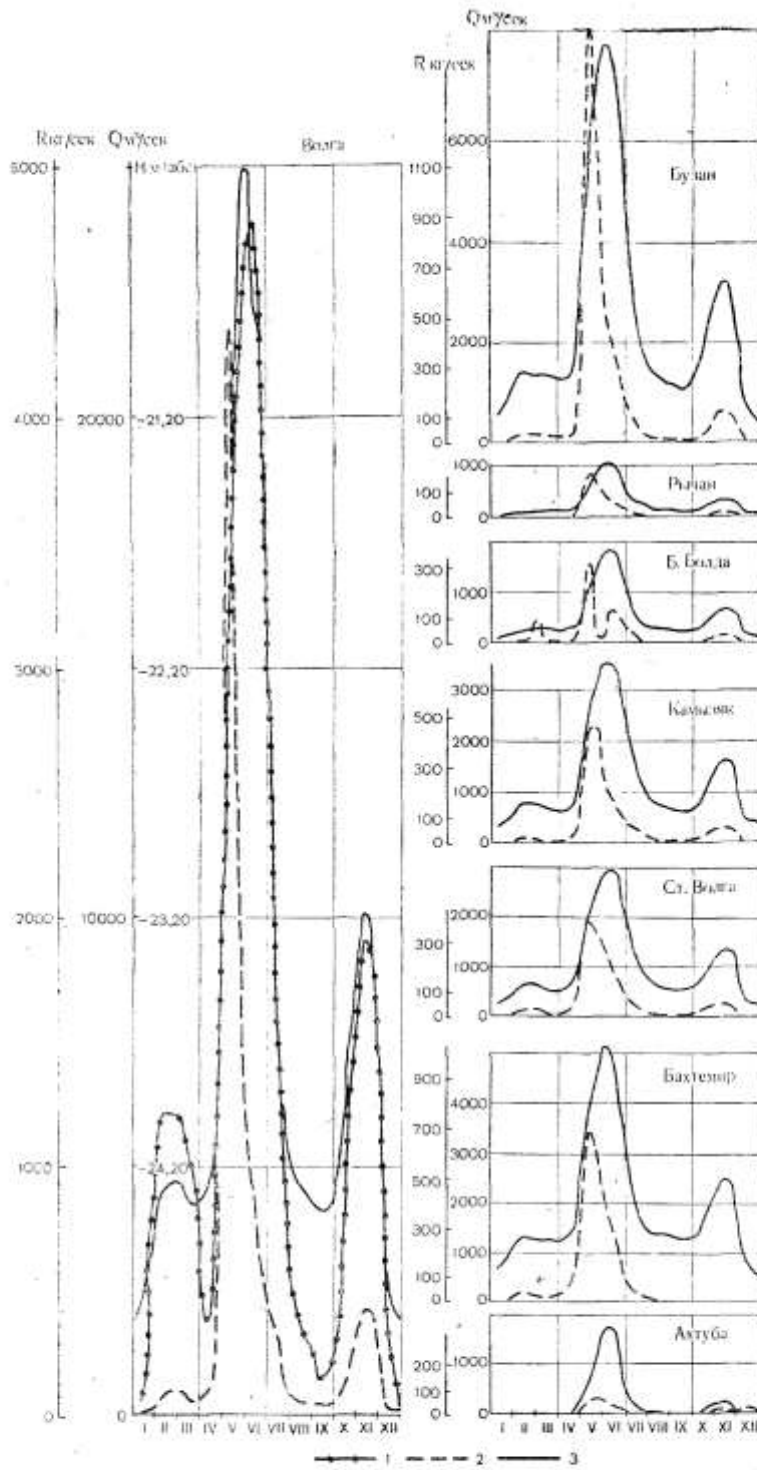


Рис. 98. Годовой ход уровня воды, водного и твердого стока Волги у Дубовки и у Верхне-Лебяжьего в 1953 г. (по средне-декадным значениям).

1 — уровень воды, 2 — твердый сток, 3 — водный сток.

почти не изменяется, колеблясь на этом протяжении в пределах 5—15%. Ниже Сталинграда она начинает снижаться.

Годовой объем твердого стока, вносимого Волгой в дельту при различных объемах водного стока реки, достаточно точно еще не определен.

Б. А. Аполлов [6] дает для дельты Волги среднеегодулетний сток взвешенных наносов, равный 18,9 млн. т, среднюю мутность 73 г/м³. Эта цифра получена приблизительно экстраполяцией от величины твердого стока 21 млн. т, определенной наблюдениями в 1925 г., имевшем водный сток 280 км³, к среднеегодулетнему водному стоку 256,5 км³. Внутригодовое распределение твердого стока таково: половодье 87, межень 11, зима 2%.

Результаты наиболее точных наблюдений над взвешенными наносами, поступающими в дельту, проведенных в последние годы Волжской устьевой гидрометеорологической станцией, показаны в табл. 127.

Таблица 127

Характеристика стока взвешенных наносов в створах Верхне-Лебяжье и Дубовка

Годы	Водный сток, км ³		Сток взвешенных наносов, млн. т		Среднегодовая мутность г/м ³	
	Верхне-Лебяжье	Дубовка	Верхне-Лебяжье	Дубовка	Верхне-Лебяжье	Дубовка
1949	219	222	7,5	(12,6)	34	(57)
1950	227	239	11,0	(20,1)	49	(84)
1951	220	236	14,0	26,1	64	110
1952	218	233	9,3	19,8	43	81
1953	260	277	12,9	19,6	52	70

Как видно из этой таблицы, для лет, имеющих примерно одинаковый водный сток (1950—1952), твердый сток и мутность колеблются по годам в пределах $\pm 20\%$ от средней величины; твердый сток, поступающий в дельту, в 1,5—2 раза меньше, чем у Сталинграда. Уменьшение твердого стока можно объяснить значительным осаждением взвесей в половодье в Волго-Ахтубинской пойме, выпадением крупных фракций наносов в переуглубленном русле Нижней Волги, а может быть, и неравноточными или имеющими неодинаковый вес измерениями в дельте и у Дубовки. Вычисляя по табл. 127 (приведением к многолетнему ряду) норму годового стока взвешенных наносов при среднем многолетнем стоке Волги в 256,5 км³ и учитывая соотношение коэффициентов вариации годового водного и твердого стока Волги [138], получаем следующий современный годовой сток взвешенных наносов: для Верхне-Лебяжьего 12,5 млн. т (с возможными колебаниями от 8,0 до 17,0 млн. т). Для окончательного решения вопроса еще нет достаточных данных.

Годовой ход мутности в истоках рукавов дельты имеет несколько различный характер (табл. 128).

На протяжении года бывает два минимума и два максимума среднемесячной мутности. Первый минимум с мутностью 5—10 г/м³, падая на летне-осеннюю межень (VIII—IX), в октябре—ноябре сменяется первым максимумом с мутностью, равной 20—35 г/м³. Второй минимум с мутностью, равной 1—15 г/м³, падает на декабрь—январь. В феврале—марте мутность имеет значения 15—25 г/м³. Второй, наиболее мощный максимум мутности (100—160 г/м³) проходит в апреле—мае. Наибольшая среднедекадная мутность (250 г/м³) бывает в последнюю декаду апреля. Пик твердого расхода опережает пик водного расхода на 20—30 дней.

Таблица 128

Годовой ход мутности (г/м³), водного стока (м³/сек.) и твердого стока (кг/сек.) в дельте Волги за 1953 г. по среднемесячным значениям

Водоток		I	II	III	IV	V	VI
р. Волга у Верхне-Лебяжьего	Мутность . . .	7	19	13	98	130	31
	Водный сток . .	2 940	4 630	4 360	7 100	21 600	20 200
	Твердый . . .	20,6	88,0	56,7	695,8	2 808,0	626,2
Бахтемир (исток)	Мутность . . .	2	26	17	92	130	48
	Водный сток . .	907	1 290	1 240	1 850	4 520	4 320
	Твердый . . .	1,8	33,5	21,1	170,2	587,6	207,4
Бузан (исток)	Мутность . . .	15	21	17	100	160	47
	Водный сток . .	895	1 390	1 320	2 150	7 040	6 340
	Твердый . . .	13,4	29,2	22,4	215,0	1 126,4	298,0

Водоток		VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
р. Волга у Верхне-Лебяжьего	Мутность . . .	25	10	9	30	36	5	54
	Водный сток . .	6 890	4 550	4 260	7 530	9 010	2 300	7 950
	Твердый . . .	172,3	45,5	38,3	225,9	11,5	11,5	429,3
Бахтемир (исток)	Мутность . . .	17	5	4	21	24	0,5	50
	Водный сток . .	1 850	1 370	1 330	1 880	2 240	732	1 960
	Твердый . . .	31,5	6,9	5,4	39,5	53,8	0,4	98,0
Бузан (исток)	Мутность . . .	24	10	9	24	35	4	66
	Водный сток . .	2 080	1 250	1 130	2 290	2 830	563	2 440
	Твердый . . .	50,0	12,5	10,2	55,0	99,1	2,3	161,0

Распределение твердого стока по истокам главных рукавов (в процентах) немного отличается от распределения водного стока (табл. 129).

Общую схему распределения твердого стока по главным рукавам дельты можно представить следующим образом (на примере 1953 г., среднего по водности).

В восточную часть дельты (Бузан, Ахтуба, Большая Болда, Рычан) уходит 45,5% водного стока и 51,5% твердого стока, причем средняя мутность 66 г/м³. В западную часть дельты (Бахтемир, Старая Волга, Камызяк) уходит 54,5% водного стока и 48,5% твердого стока, причем средняя мутность составляет 51 г/м³.

Таблица 129

Распределение твердого стока по рукавам дельты Волги (1953 г.)

Рукав	Водный сток		Твердый сток		Мутность, г/м ³
	км ³	%	млн. т	%	
р. Волга (Верхне-Лебяжье)	260,5	100	13,0	100	52
Бузан (исток)	76,9	32	5,07	37	66
Рычан	9,3	4	0,62	4,5	67
Большая Болда (исток)	16,0	7	1,17	8,5	73
Кизань (Камызяк) (исток)	37,8	16	1,95	14,0	51
Старая Волга (исток)	30,8	13	1,63	12,0	53
Бахтемир (исток)	61,7	25,5	3,04	22,5	50
Ахтуба (Досанг)	5,5	2,5	0,23	1,5	(35)

Относительное увеличение среднегодовой мутности в рукавах восточной части дельты объясняется тем, что в эти рукава поступает относительно больший водный сток в период половодья.

В низовьях рукавов мутность при морях удваивается, а при спагах уменьшается в 1,5—2 раза. В мелких протоках приморской части величина среднегодовой мутности колеблется в пределах 50—100 г/м³.

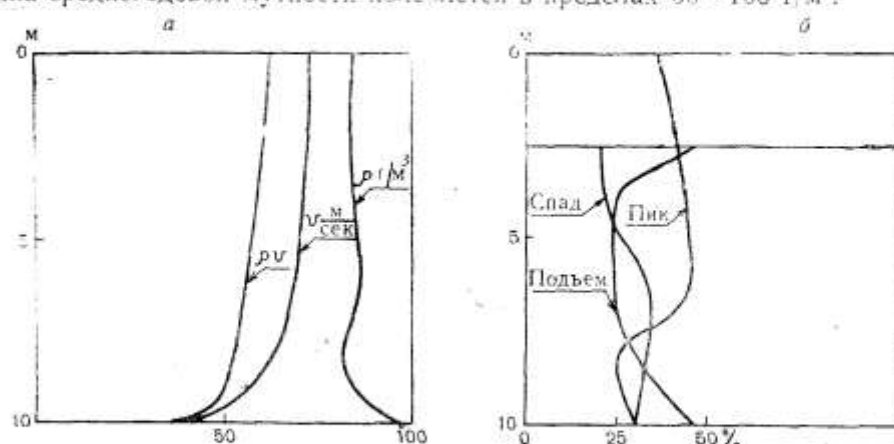


Рис. 99. Распределение по вертикали в половодье у Астрахани: а — средней мутности (ρ), скорости течения (v) и твердого стока (ρv); б — содержания частиц (%) по взвешам $> 0,05$ мм (1924 г.).

Интересен тот факт, что благодаря значительным скоростям течения в половодье ($v > 0,75$ м/сек.), песчано-пылеватые фракции взвесей ($> 0,05$ мм) не только имеются в верхних слоях воды, но в первую половину половодья даже относительно преобладают (рис. 99). Этим и объясняется значительный процент таких фракций в прирусловых валах (45%).

Сравнение данных о механическом составе русловых отложений взвесей (табл. 130) показывает, что основная масса частиц $> 0,05$ мм выно-

Таблица 130

Характеристика уровня воды	Крупность частиц, мм				$d_{\text{ср}}$
	$> 0,25$	$0,25 - 0,05$	$0,05 - 0,01$	$< 0,01$	
Волга у Астрахани					
Половодье					
Середина подъема уровня	8	28	14	50	0,07
Пик уровня	12	23	17	48	0,07
Вторая половина спада уровня	9	18	17	51	0,06
Средневзвешенное за половодье	10	23	16	51	0,07
Средненавигационное на морском крае дельты	5	21	10	64	0,05
Волга у Дубовки					
То же	4	11	23	62	0,05
Волга у Камышина					
.	6	18	22	54	0,07

сится по взморью за свал глубин. В то же время в углублениях, какими являются Волго-Каспийский канал и естественные русловые бороздины взморья, в зоне затухания речных скоростей, фракция $< 0,05$ мм получает более благоприятные возможности для своего осаждения на дно.

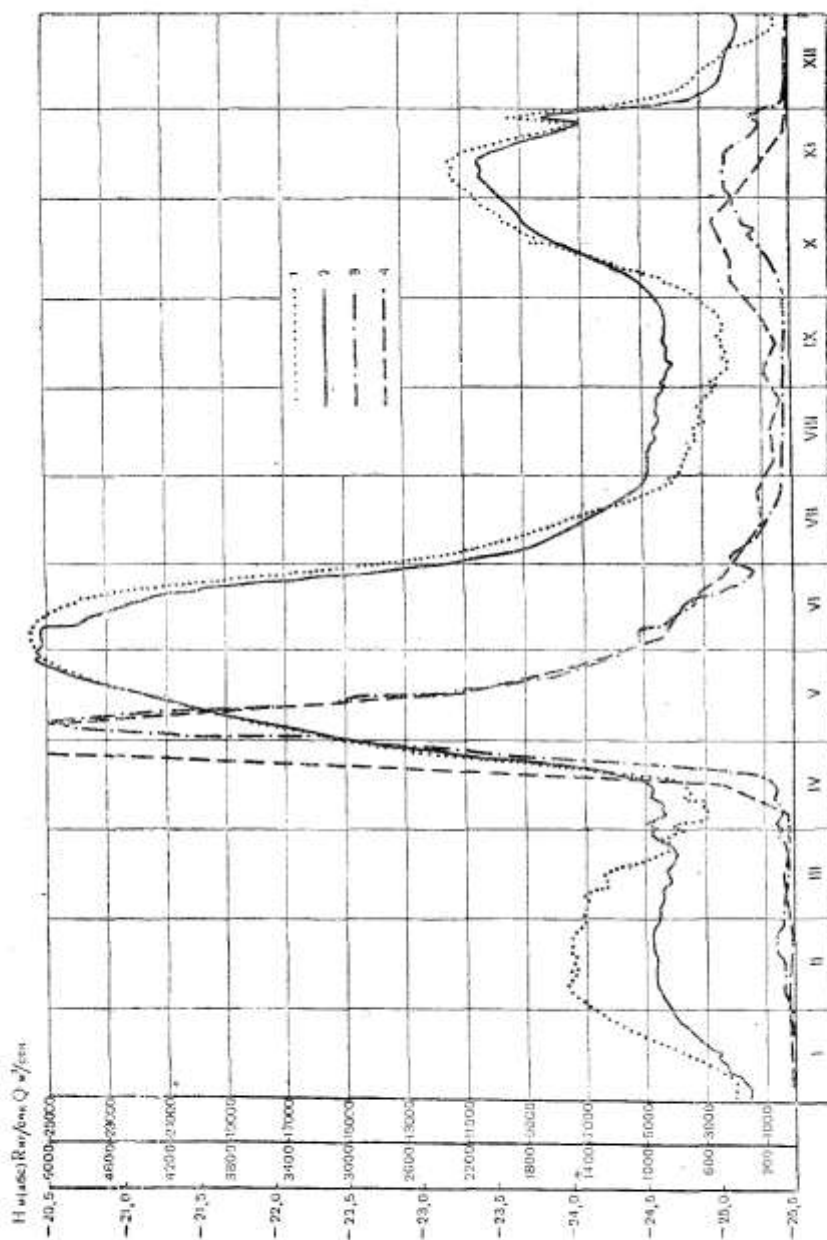


Рис. 100. Годовой ход уровня воды, водного стока и стока взвешенных наносов в дельте Волги за 1953 г.
 1 — уровень воды у Верхне-Любавецкого, 2 — расход воды у Верхне-Любавецкого, 3 — расход взвешенных наносов у Верхне-Любавецкого, 4 — расход взвешенных наносов у Дубовки.

Режим твердого стока в течение года таков: мутность воды начинает резко повышаться вместе с началом половодья, наибольшего значения достигает на середине подъема уровня половодья, к пику половодья в 1,5—2 раза уменьшается, хотя твердый расход и на пике велик. Уменьшение мутности идет примерно параллельно кривой спада половодья, и к началу межени она достигает практически ничтожных значений (рис. 99, 100).

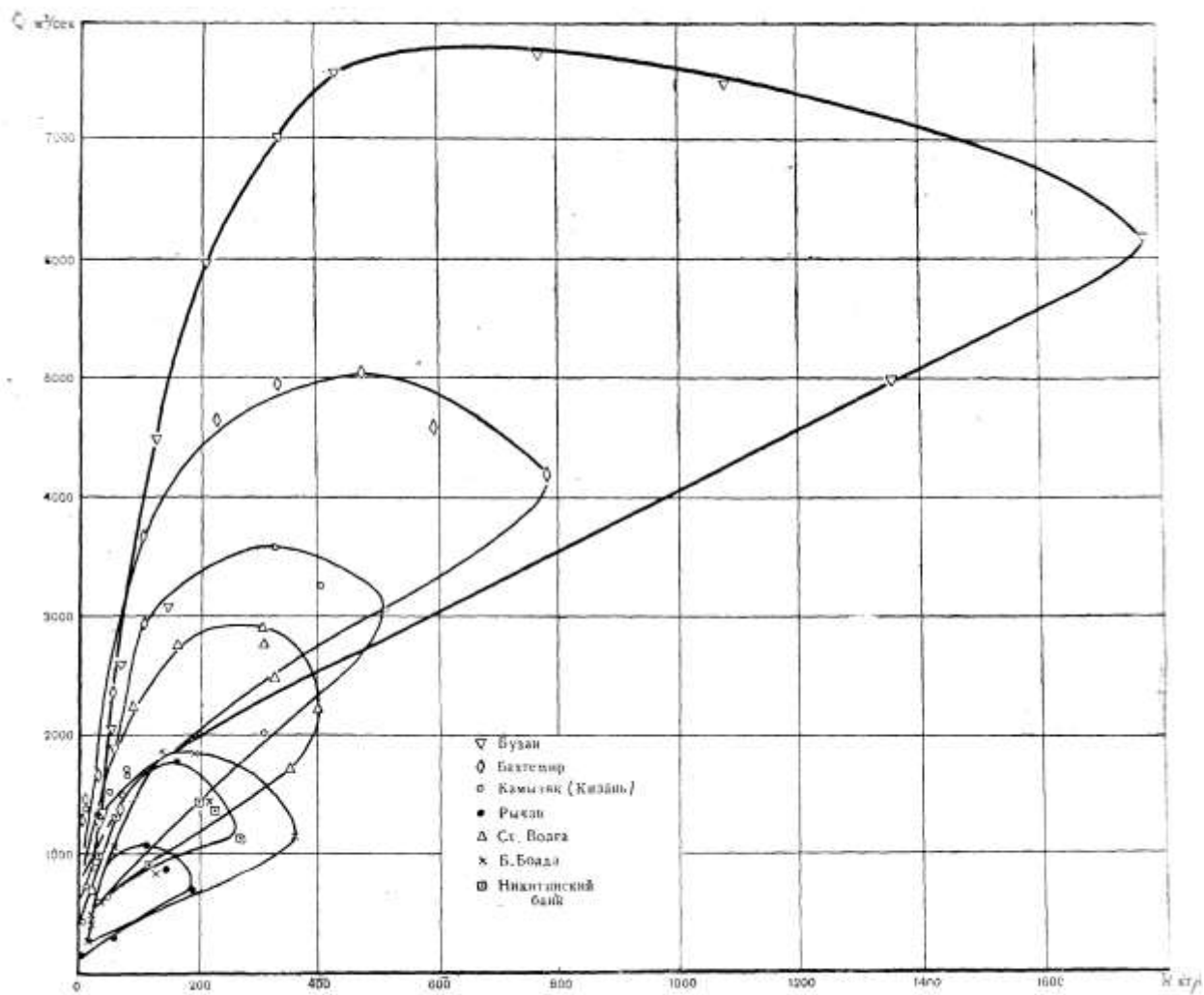


Рис. 101. Связь между твердым и водным стоком в рукавах дельты Волги за 1963 г.

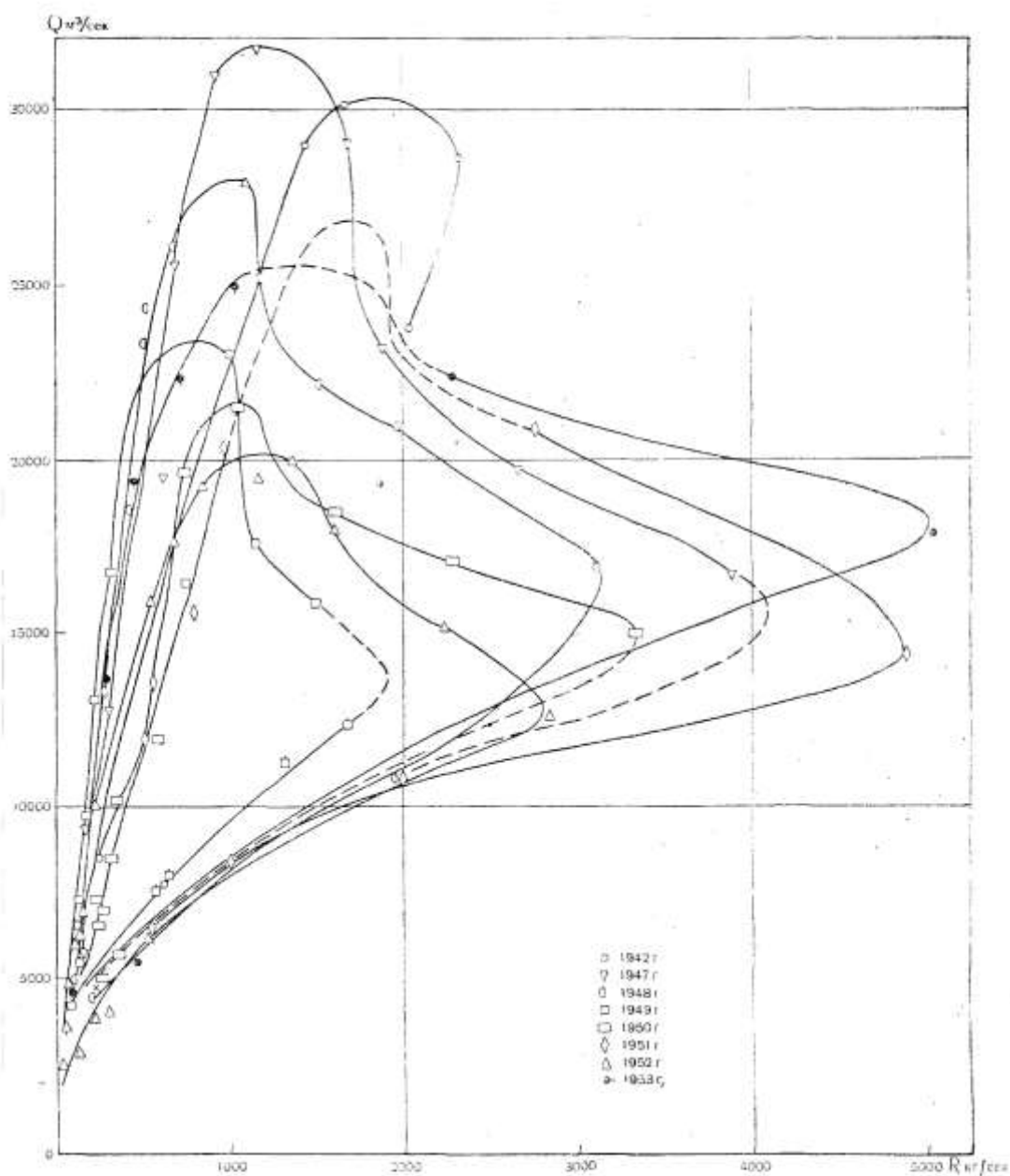


Рис. 102. Связь между твердым и водным стоком Волги у Верхне-Тебязьего за различные годы (1942—1953 гг.).

Связи между водным и твердым стоком графически выражаются в виде петлеобразных кривых (рис. 101, 102).

Обращает на себя внимание большое сходство очертаний этих кривых за различные годы наблюдений. Это допускает возможность составления аналитической характеристики и говорит о хорошем качестве наблюдений над твердым стоком в 1942—1953 гг. в створах Верхне-Тебязьего и в истоках рукавов дельты.

ВЛЕКОМЫЕ НАНОСЫ

Количество влекомых наносов для равнинных рек обычно оценивается в 5—10% от стока взвешенных наносов. Так как в низовьях Волги мутность невелика (порядка 100 г/м³) и в донных отложениях преобладают мелкие фракции, то сток влекомых наносов в низовьях (у Сталинграда) можно считать близким к 10%, т. е. примерно 2,5 млн. т/год.

Наблюдений над расходами влекомых по дну наносов в дельте не производилось. Поэтому для суждения об их вероятном режиме необходимо прибегнуть к косвенным характеристикам и, в частности, проанализировать характер скоростного поля рукавов. При гидрометрических работах в 1942—1952 гг. на гидростворах Верхне-Лебяжьего и в истоках главных рукавов удалось установить картину величин средних скоростей живых сечений русел (табл. 131).

Таблица 131

Средние скорости течения (м/сек.) на гидростворах Верхне-Лебяжьего и в истоках главных рукавов за 1942—1952 гг.

Отметка уровня у Астрахани, м	Волга, В. Лебяжье	Бузан	Рычан	Пр. Болда	Бахтемир	Камызяк	Ст. Волга	Ахтуба
—21,60	1,70	1,18	0,76	1,00	1,20	1,33	0,95	1,00
—22,00	1,48	1,08	0,73	0,87	1,10	1,20	0,86	0,88
—22,50	1,24	0,93	0,67	0,74	0,98	1,03	0,76	0,70
—23,00	1,06	0,82	0,61	0,63	0,87	0,92	0,66	0,58
—23,50	0,88	0,68	0,52	0,52	0,78	0,80	0,58	0,43
—24,00	0,70	0,54	0,45	0,41	0,68	0,69	0,48	0,29
—24,50	0,58	0,43	0,38	0,32	0,58	0,57	0,39	0,17
—25,00	0,44	0,31	0,31	0,23	0,48	0,47	0,30	0,00
—25,50	0,30	0,18	0,24	0,14	0,38	0,35	0,23	0,00
—26,00	0,26	0,10	0,17	0,08	0,28	0,25	0,17	0,00

Анализ гидрометрических данных показал, что при одном и том же уровне возможны колебания величины этих средних скоростей в пределах $\pm 10\%$: в периоды подъема уровня средняя скорость повышается, в периоды спада уровней понижается против указанных средних значений.

Табл. 131 показывает, что при одном и том же уровне скорости в истоках главных рукавов имеют весьма различия значения.

При наиболее низких уровнях (отметка —26,00) наибольшие скорости течения (примерно 0,25 м/сек.) имеют Волга, Бахтемир и Камызяк. В то же время наиболее медленное течение наблюдается у Прямой Болды (0,08 м/сек.) и Бузана (0,10 м/сек.), являющегося самым крупным рукавом дельты.

При повышении уровня всего на 1 м (отметка —25,00) уже происходит некоторое перераспределение соотношения скоростей по рукавам. По-прежнему наибольшие скорости свойственны Бахтемиру, однако скорости Бузана и Камызяка увеличиваются больше, чем скорости других рукавов.

При дальнейшем подъеме уровней скорости течений относительно быстрее возрастают по Волге, Бахтемиру, Камызяку, а при наивысших уровнях наибольшие скорости, достигающие при отметке уровня —21,60 м 1,70 м/сек., оказываются у Волги. Весьма своеобразен скоростной режим Бузана: имея при низких уровнях наиболее медленное течение, он при высоких горизонтах сравнивается по средней скорости с Бахтемиром ($v = 1,20$ м/сек.).

Наиболее равномерным режимом скоростей течения обладает Рычан. Некоторым своеобразием отличается скоростной режим Ахтубы: при отметках уровня —25,00 м и ниже на ней наблюдается еле заметное течение; при подъеме уровня ее средние скорости быстро возрастают до значений, характерных для Старой Волги и Рычана.

Для суждения об активности русловых процессов необходимо сопоставить характеристики крупности частиц русловых отложений и скоростей течения, при которых они начинают перемещаться.

Таблица 132

Механический состав донных грунтов (русловых отложений), %

Район устья и р. Волги	Крупность частиц, мм				$d_{ср}$
	> 0,25	0,25 — 0,05	0,05 — 0,01	< 0,01	
Коренное русло Волги в половодье	32,0	60,0	7,5	1,0	0,17
Истоки Бахтемира, Старой Волги и Камызяка: межень — половодье (среднее)	20,0	53,5	19,0	7,5	0,14
	19,0	60,0	15,0	6,0	0,14
Выходные участки Бахтемира, Старой Волги, Камызяка	21,0	63,0	12,0	5,0	0,14
Взморье — в 40 км от морского края 1925 г.	24,0	70,0	7,0	1,0	0,20
То же в 50 км (Чистая банка)	17,0	77,0	5,0	0,3	0,16
Свал глубин	10,0	85,0	5,0	0,2	0,16
Волга у Сталинграда	59,0	35,0	6,0		0,40
„ „ Камышина	73,0	27,0			1,0

Как видно из табл. 132, от вершины дельты до свала глубин наблюдается неуклонное уменьшение содержания фракции 0,25 мм и увеличение содержания фракции 0,25—0,05 мм. Эти фракции в сумме дают 80—95% общего состава донного грунта и определяют средневзвешенный диаметр его частиц в 0,15 мм.

По формуле Лопатина $v = 0,5(\sqrt[3]{d_{ср} h^{0,2}})$ средняя скорость течения v , при которой начинается перемещение донных частиц с $d = 0,15$ мм, составляет для $h = 3$ м и $h = 5$ м соответственно $v_3 = 0,16$ м/сек. и $v_5 = 0,18$ м/сек. Те же значения v дает известный график Хьюлстрема. Это позволяет, ориентируясь по табл. 132, установить, что перемещение донных наносов на Волге у Верхне-Лебяжьего и в истоках всех главных дельтовых рукавов, кроме Бузана, Прямой Болды и Ахтубы, происходит весь год. В истоках же Бузана и Прямой Болды оно прекращается примерно на одну треть года, а на Ахтубе более чем на полгода (в соответствии с обеспеченностью уровней —25,50 м в первом случае и —24,50 м во втором случае).

Установить объем стока влекомых по дну наносов в дельтовых рукавах пока еще не представляется возможным. Некоторое суждение об этом стоке можно составить по данным об изменениях продольных профилей Бахтемира и Камызяка (рис. 103).

