

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени М.И.Калинина

Методы оценки влияния изъятия стока на гидрометеорологический
режим северных районов (сборник)

Л 4489-82 Дел.

УДК 556.535.6(282.251.2)

Г.М.Заец, В.А.Милошевич, А.Е.Михинов,
А.Ю.Сидорчук

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТОКА ВОДЫ И ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ
В ДЕЛЬТЕ р.ЕНИСЕЙ

Распределение стока воды и наносов по водотокам дельты является основой для оценки динамики и направленности процессов в ее русловой сети. Для дельты р.Енисей данные такого рода имеют кроме всего прочего и несомненное практическое значение в связи с намечаемыми на ближайшее время мероприятиями по улучшению условий судоходства на лимитирующих участках. Такие мероприятия не могут быть проведены с успехом без учета возможных изменений в распределении стока воды и наносов в дельтовых рукавах. Эти соображения привели к необходимости натурных исследований за водным режимом основных рукавов дельты, которые и были выполнены Русловой экспедицией МГУ в 1976-1978 гг. Данные этих исследований, полученные для дельты р.Енисей с момента ее изучения впервые, послужили основой для настоящей статьи.

Дельтой р.Енисей принято считать участок низовьев реки ниже селения Усть-Порт от оголовка Казанских островов. Ее вод-

ный режим определяется как сезонными изменениями речного стока, который обусловлен природными условиями в бассейне реки, так и колебаниями уровня моря. В речном стоке Енисея выделяется многоводное половодье и устойчивая летне-осенняя межень. Половодье обычно охватывает период июня и первой декады июля. Средние максимальные расходы воды для этого периода составляют $110000 \text{ м}^3/\text{с}$. Во время летне-осенней межени расходы воды в вершине дельты уменьшаются до $10000 \text{ м}^3/\text{с}$. Влияние колебаний уровня моря на водный режим дельты выражается в виде изменения величины и перераспределения расходов воды под действием приливных и нагонных волн. Заметное искажение этими явлениями стоковых характеристик в дельте наблюдается при расходах воды в ее вершине менее $60000 \text{ м}^3/\text{с}$. В этих условиях, во всех рукавах дельты расход воды испытывает суточный ход под действием приливов и отливов и происходит заметное уменьшение стока воды в течение нескольких суток при прохождении нагонной волны.

Непосредственно в вершине дельты находится первый узел разветвления, где р.Енисей разделяется на два рукава примерно равноценные по водности. В левый, судоходный рукав поступает 45 %, а в правый 55 % от общего расхода воды в вершине дельты. В этом месте расположен первый в дельте лимитирующий судоходство участок - Безымянный пережат. Здесь же производился учет стока воды и взвешенных наносов, поступающих в дельту за период половодья. Сравнение измеренных в этом створе расходов воды с расходами в Игарке дало удовлетворительную сходимость. В межень, когда расход воды в вершине дельты изменяется под влиянием колебаний уровня моря, сток воды оценивался по гидроствору Игарка.

Наблюдения за стоком в вершине дельты и месте разделения Енисея на основные рукава показало, что потери стока на этом участке в левобережные протоки составляет 5 %, т.е. в основные рукава - Малый, Большой, Каменный Енисей и протоку Охотскую поступает 95 % стока в вершине дельты. Такие же данные получены в результате расчета [1].

Большая часть стока воды, поступающего к узлу разветвления, концентрируется в двух рукавах Большого Енисея (рис.1). Рукава эти разделены цепочкой островов, не затопляемых при самых высоких уровнях. В диапазоне расхода воды в вершине дельты 70000 -

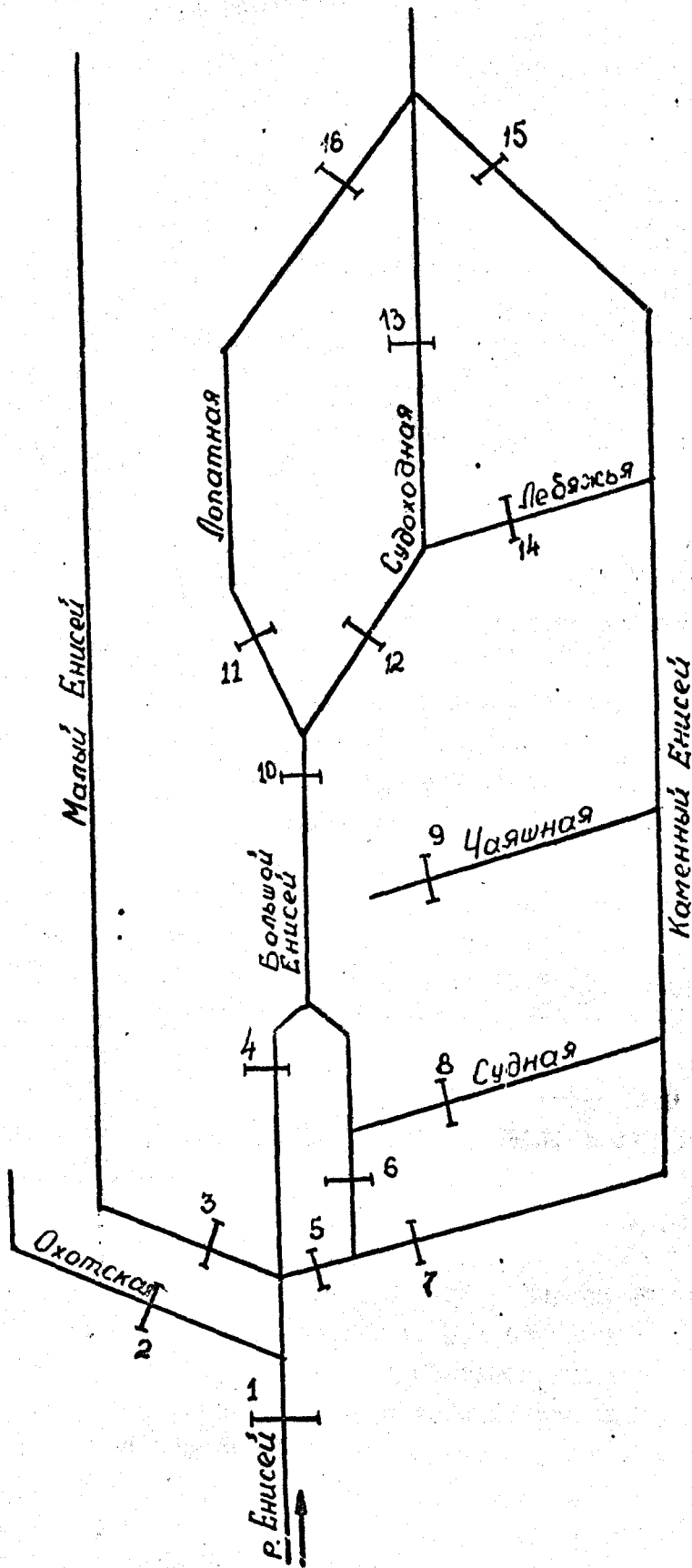


Рис. 1. Схема участка дельты р. Енисей. 1, 2, 3, ... - номера гидростворов.

30000 м³/с более 70 % от общего расхода в узле распределяется поровну между этими рукавами (створы 4, 5) и составляет 25000-10000 м³/с (таблица 1). Немногим более 20 % общего расхода поступает в Малый Енисей (створ 3) и совсем незначительная часть, порядка 3 %, в протоку Охотскую (створ 2).

По мере снижения горизонта воды и общего расхода в узле разветвления происходит его перераспределение по рукавам, которое зависит от морфометрических характеристик русла и его шероховатости, а также от положения рукава относительно динамической оси основного потока. В левом рукаве Большого Енисея наблюдается снижение доли от общего расхода во всем рассматриваемом диапазоне расходов - с 36.1 % до 27.4 %. В правом рукаве Большого Енисея также наблюдается снижение доли расхода - с 37.3 % до 35.8 %, но до некоторого значения расхода в вершине дельты - 40000 м³/с. Противоположное этому явление происходит в истоке Малого Енисея. Здесь доля общего расхода увеличивается с 23.5 % до 25.4 %, но так же до некоторого значения расхода воды в вершине дельты - 30000 м³/с (таблица 1). Такой ход явления подтверждает часто наблюдаемый факт, когда по мере снижения волны наводья уменьшается доля общего расхода в основных рукавах и возрастает доля расхода в боковые рукава.

При снижении расхода воды в вершине дельты до 40000-30000 м³/с речной поток переходит к меженному режиму. В месте истока правого рукава Большого Енисея на положение динамической оси потока начинают оказывать большое влияние обширные мели у оголовка острова Судный, искривляя ее в сторону цепочки островов. Это приводит к тому, что доля общего расхода воды в этом рукаве растет с 35.8 % до 54.1 %, а расходы воды в нем даже превышают расходы в правом рукаве. В Малом Енисее, где меженное русло имеет более пологую траекторию, доля от общего расхода падает с 25.4 % до 16.8 % (таблица 1).

В истоке правого рукава Большого Енисея от него отделяется рукав - Каменный Енисей (рис.1). Оба эти рукава при высоких уровнях воды имеют примерно равные морфометрические показатели. Это приводит к тому, что и расходы воды в этих рукавах отличаются незначительно (таблица 2). Такое положение меняется при снижении расхода воды в вершине дельты ниже 40000 м³/с. Пропускная способность русла Каменного Енисея (створ 7) в этих условиях значительно снижается из-за наличия в его истоке перекатного участка.

В результате доля стока, поступающего в него, падает с 42,5 % до 35,0 %. На такую же долю растет расход воды в правом рукаве Большого Енисея (створ 6).

Ниже по течению от правого рукава Большого Енисея отделяются две правобережные протоки: Судная и Чаяшная (рис. I). Для протоки Судной характерны малые глубины, скорости течения и, что важно для поступления в нее стока воды, - блокированное отмелями устье. Поэтому доля поступающего в нее расхода неуклонно падает от половодья к межени, так что расход воды в ней снижается до $540 \text{ м}^3/\text{с}$ (таблица 2, створ 8). Протока Чаяшная является более активной. Средние глубины и скорости течения в ней больше чем в Судной почти вдвое. Ввиду большого угла отвода от основного потока доля от общего расхода в ней при снижении половодья растет с 23,4 % до 31,6 % (створ 9). Однако по мере перехода к межени происходит снижение поступающей в нее доли расхода в связи с падением пропускной способности русла, которая обусловлена стеснением устья отложениями наносов. В этот период расходы воды в ней снижаются от $4300 \text{ м}^3/\text{с}$ до $1300 \text{ м}^3/\text{с}$ (таблица 2). После отбора протоками значительной части стока (30-40%) правый рукав Большого Енисея сливается с левым рукавом и течет единым руслом до следующего узла разветвления у острова Лопатный, где рукав Большой Енисей разделяется на две протоки: Лопатную и Судходную, в которой расположен второй лимитирующий судходство участок - Турушинский пережат (рис. I). Обе протоки отделяются от Большого Енисея под одинаковым углом, но различие в морфометрии их истоков приводит к неравному распределению расходов воды в них.

В Судходную протоку поступает от 58,3 % до 70,4 % стока Большого Енисея (створ 12), в протоку Лопатную от 41,7 % до 29,6 % (таблица 3, створ 11). Перераспределение стока от половодья к межени в пользу Судходной протоки обусловлено большей шириной и глубинами на ее входе, в то время как вход в протоку Лопатную, особенно в межень, блокирован обширной косой у оголовка острова Лопатный.

От судходной протоки, перед гребнем Турушинского пережата, почти под прямым углом отделяется протока Лебяжья (рис. I). При снижении расхода воды в вершине дельты от $70000 \text{ м}^3/\text{с}$ до $30000 \text{ м}^3/\text{с}$ доля расхода от общего в Большом Енисее в протоку Лебяжью,

как боковую по отношению к основному руслу, растет с 24,8 % до 34,7 %. В межень, наоборот, в прямую судоходную протоку поступает большая доля расхода (таблица 3). Ниже Турушинского переката Енисей сливается в одно русло и течет широким и многоводным потоком за пределы наземной дельты в Енисейский залив.

Рассмотренные закономерности распределения стока по рукавам были получены для условий, когда расход воды в реке определяется режимом в вершине устьевой области. При переходе к межени этот режим нарушается в связи с распространением по рукавам дельты стонно-нагонных и приливо-отливных волн. Стонно-нагонные волны имеют длину несколько сот километров и ввиду большой скорости распространения не вызывают существенного изменения уклона водной поверхности, а следовательно, и расхода воды в дельте, за исключением нагонов редкой повторяемости.

Приливо-отливная волна в дельте Енисея имеет полусуточный период, ее длина порядка 100 км, а амплитуда в среднем составляет 30 см. Распространяясь по дельтовым рукавам, она существенно изменяет кривую свободной поверхности так, что при максимуме прилива в районе слияния Большого и Каменного Енисея в одно русло на участке от истока основных рукавов до устья формируется кривая подпора, а выше по реке - кривая спада.

Влияние приливной волны на перераспределение расходов воды в дельте исследовалось при меженном расходе воды, поступающем в дельту - $17000 \text{ м}^3/\text{с}$. Для этого на ряде створов (таблица 4) проводился суточный цикл измерения расходов воды. Полученные данные свидетельствуют о том, что при приливе в устье рукавов разница между суммарным расходом в истоке и устье Большого и Каменного Енисея за 6 часов составляет $15000 \text{ м}^3/\text{с}$. Эта масса аккумулируется на рассматриваемом участке, чтобы в следующие 6 часов (отлив) поступить за его пределы. Промежуточные гидростворы от истоков до устья рукавов находятся при этом в различных фазах режима. Мгновенная картина такого распределения расходов воды по ряду створов приведена в таблице 4.

Сток взвешенных наносов, поступающих в дельту, оценивался по измерениям в районе Безымянного переката. При изменении расходов воды в вершине дельты от $70000 \text{ м}^3/\text{с}$ до $10000 \text{ м}^3/\text{с}$ сток взвешенных наносов колеблется от 1800 кг/с до 77 кг/с . На учас-

тке от вершины дельты до деления Енисея на основные рукава в дельте аккумулируется от 9,3 % в половодье до 60 % в межень поступающих взвешенных наносов.

В исток левого рукава Большого Енисея при расходах воды в вершине дельты $70000 \text{ м}^3/\text{с}$ - $40000 \text{ м}^3/\text{с}$ поступает расход взвешенных наносов почти в два раза больший, чем в правый (при равенстве расходов воды), соответственно 800-220 кг/с и 361-148 кг/с (таблица 1). Это объясняется перекосом водной поверхности в сторону истоков рукава, средний продольный уклон которого наибольший [2]. Именно таким и является левый рукав. Довольно значительное количество взвешенных наносов за этот период поступает в исток Малого Енисея - от 434 кг/с до 140 кг/с (таблица 1). Этот рукав, круто отклоняющийся от основного русла, выполняет роль "наносоотсасывающего". Таким образом, в половодье поступление наносов в рукава не пропорционально расходам воды. С наступлением меженного периода величины расходов взвешенных наносов в рукавах следуют за расходами воды, а их доля от общего стока наносов определяется перераспределением стока воды. После отделения от правого рукава Большого Енисея рукава Каменный Енисей, расход взвешенных наносов распределяется по ним следующим образом. В половодье в левый рукав поступает от 206 кг/с до 98 кг/с, а в Каменный Енисей от 155 кг/с до 50 кг/с взвешенных наносов. Во время межени расход взвешенных наносов в обоих рукавах одинаков. Правобережные протоки Судная и Чайная при больших расходах воды в вершине дельты ($70000 \text{ м}^3/\text{с}$ - $60000 \text{ м}^3/\text{с}$) забирают из правого рукава Большого Енисея от 60 % до 35 % стока его наносов, значительная часть которых идет на формирование кос в их устьях (таблица 2).

В узле Турушинского переката расход взвешенных наносов распределяется поровну между Судоходной и Лопатной протоками, хотя расходы воды в последней значительно ниже. Это объясняется большим углом отвода протоки Лопатной от основного русла. Поступающие на Турушинский перекат наносы частично осаждаются на его акватории - от 46 % при расходах воды в вершине дельты $70000 \text{ м}^3/\text{с}$ до 10 % в межень. Через протоку Лебяжью в Каменный Енисей при тех же расходах воды в вершине дельты выносятся от 19 % до 50 % взвешенных наносов.

Соответственно изменению расхода воды в дельте под действием приливной волны, происходит перераспределение взвешенных наносов. Данные такого рода приведены в таблице 4.

При рассмотрении баланса наносов в дельтовых рукавах может возникнуть вопрос о роли приливо-отливных колебаний уровня в выносе или аккумуляции наносов на различных участках дельты. Такие исследования были проведены для условий меженного режима при расходе воды в вершине дельты $17000 \text{ м}^3/\text{с}$.

При распространении приливной волны в устье происходит увеличение ее асимметрии за счет различных скоростей движения гребня и подошвы, в результате чего время падения уровня преобладает по отношению к росту. При периоде прилива - отлива 12 ч 25 м время роста составляет 5 ч 45 м, а падения 6 ч 40 м. За счёт этого должна существовать разница между стоком наносов за приливной цикл. Кроме того, баланс наносов за приливной цикл должен зависеть от хода мутности во времени, так как экстремумы мутности опережают экстремумы уровня. Построенная связь

$\frac{\rho_{\Phi}}{\rho_{\text{ст}}} = f\left(\frac{\Delta h}{A}\right)$, где ρ_{Φ} - фактически наблюдаемая мутность, $\rho_{\text{ст}}$ - мутность при стоковом режиме, Δh - величина прилива-отлива над стоковым уровнем, A - амплитуда прилива, показала, что ее характер отвечает общепринятой при анализе кинематики прямой и обратной волны в устье, т.е. имеет вид восьмерки. Опережение экстремумов мутности по отношению экстремумов уровня составляет 40 минут. Полученная связь была использована для расчета фактических мутностей за приливной цикл. В результате были получены эпюры расходов взвешенных наносов за период прилива-отлива. Результаты расчетов показали, что дополнительный вынос взвешенных наносов за приливной цикл составляют: створ 3 - 30 тонн, створ 4 - 125 тонн, створ 7 - 74 тонны, створ 8 - 2 тонны, створ 9 - 9 тонн, створ 22 - 43 тонны, створ 12 - 203 тонны, створ 15 - 376 тонн, створ 16 - 43 тонны.

Данные, приведенные в таблицах I, 2, 3 с достаточной полнотой освещают распределение стока по основным водотокам дельты до расхода в ее вершине $70000 \text{ м}^3/\text{с}$. Проведение подобных исследований при более высоких расходах встречает большие трудности. Этот пробел может быть восполнен путем расчета, либо моделирования. Кроме того, такие расчеты позволили бы получить харак-

Таблица I

Распределение расходов воды и взвешенных наносов
по основным дельтовым рукавам

Створ № 1		Створ № 2				Створ № 3			
Расход воды Q m^3/c	Расход взве- шенных наносов R $кг/с$	Q m^3/c	%	R $кг/с$	%	Q m^3/c	%	R $кг/с$	%
66500	1643	2020	3.0	48	2.9	15660	23.5	434	26.4
57000	1140	1000	3.3	41	3.6	13600	23.8	270	23.7
47500	860	1600	3.4	27	3.2	11600	24.4	228	26.5
38000	523	1300	3.4	15	2.9	9400	24.7	140	26.8
28500	246	1000	3.5	13	5.3	7100	25.4	88	35.8
19000	111	700	3.7	6	5.4	4500	23.7	22	19.8
9500	55	380	4.0	1	1.8	1600	16.8	6	10.9
		Створ № 4				Створ № 5			
		24000	36.1	800	48.7	24820	37.3	361	22.0
		20300	35.6	590	51.8	21010	36.8	239	20.9
		17000	35.8	410	47.7	17300	36.4	195	22.6
		13600	35.8	220	42.1	13640	35.8	148	28.2
		10000	35.1	44	17.9	10640	37.3	101	41.0
		6300	33.2	35	31.5	7740	40.7	48	43.3
		2600	27.4	25	45.5	5140	54.1	23	41.8

Таблица 2

Распределение расходов воды и взвешенных наносов по правобережным рукавам

Створ № 5		Створ № 6				Створ № 7			
Расход воды Q м³/с	Расход взве- шенных наносов R кг/с	Q м³/с	%	R кг/с	%	Q м³/с	%	R кг/с	%
24820	361	14220	57.2	206	57.0	10600	42.8	155	43.0
21010	239	11960	57.0	165	69.0	9050	43.0	74	31.0
17300	195	9900	57.1	132	57.7	7400	42.9	63	32.3
13640	148	7840	57.5	98	56.2	5800	42.5	50	33.8
10640	101	6340	59.6	66	55.3	4300	40.4	35	34.7
7740	48	4840	62.5	24	50.0	2900	37.5	24	50.0
5140	23	3340	65.0	10	43.4	1800	35.0	13	56.6
		Створ № 8				Створ № 9			
		3420	13.8	31	8.6	5800	23.4	94	26.1
		2860	13.6	13	5.4	5500	26.2	43	18.0
		2300	13.3	9	4.6	5000	28.9	15	7.7
		1740	12.8	7	4.7	4300	31.6	10	6.8
		1340	12.6	5	5.0	3300	31.2	9	8.9
		940	12.1	4	8.4	2300	29.8	8	16.7
		540	10.5	2	8.6	1300	25.4	2	8.7

Таблица 3

Распределение расходов воды и взвешенных наносов
по рукавам в узле Турушинского переката

Створ № IO		Створ № II				Створ № I2			
Расход воды Q м³/с	Расход взвешенных наносов R кг/с	Q м³/с	%	R кг/с	%	Q м³/с	%	R кг/с	%
29000	910	12100	41.7	510	56.0	16900	58.3	400	44.0
23650	554	8650	36.5	290	52.5	15000	63.5	264	47.5
19150	326	6650	34.8	184	56.5	12500	65.2	142	43.5
15400	195	5100	33.0	104	53.4	10300	67.0	91	46.6
11800	101	3750	31.8	45	44.5	8050	68.2	56	55.4
8250	63	2500	30.4	34	54.0	5750	69.6	29	46.0
4210	20	1250	29.6	10	50.0	2960	70.4	10	50.0
		Створ № I3				Створ № I4			
		9700	33.5	140	15.4	7200	24.8	76	8.3
		8100	34.3	96	17.4	6900	29.2	66	11.9
		6500	34.0	64	19.6	6000	31.2	55	16.9
		5100	32.2	40	20.5	5200	33.8	43	22.0
		3950	33.5	22	21.8	4100	34.7	27	26.7
		3050	37.0	11	17.4	2700	32.6	15	23.8
		1750	41.6	5	25.0	1210	28.8	6	30.0

Таблица 4

Мгновенное распределение расходов воды и взвешенных наносов в дельте р. Енисей при расходе воды в вершине дельты 17000 м³/с и

Приливе у пос. Байкалово с амплитудой 0,3 м

База уровня- ного стока	Расход воды и взве- шенных наносов	Номера гидростворов									
		2	3	4	7	8	9	12	13	15	16
Сток	Q м ³ /с	600	3630	5200	2570	820	2000	4910	2790	7420	2120
	R кг/с	4	17	32	21	3	6	23	9	45	20
Прилив	Q м ³ /с	1085	5490	7500	3485	750	1300	2450	1140	3530	930
	R кг/с	8	37	78	46	5	6	35	18	140	18
Отлив	Q м ³ /с	280	2195	4685	1610	470	1490	4375	4160	12540	3830
	R кг/с	1	3	6	4	1	1	3	3	12	2

теристики многочисленных второстепенных водотоков обширной дельты Енисея. Поэтому, представляет интерес сравнение натуральных данных с данными аэродинамического моделирования [I]. Расходы воды, полученные в результате моделирования, в среднем отличаются от фактически измеренных на 20 %. Особенно большие ошибки (до 70 %) получены для проток Судной и Чаяшной, что можно объяснить отсутствием до настоящего времени данных о глубинах в протоках. Но даже ошибки в 20 % находятся за теми пределами, когда можно проследить перераспределение стока между рукавами. Возможно, что более точный учет рельефа рукавов, который имеет грядový характер, а также гидравлических сопротивлений даст более удовлетворительные результаты.

Л и т е р а т у р а

1. Иванов В.В., Гиляров Н.П. Экспериментальные исследования перераспределения стока в дельте Енисея. Труды ААНИИ, т.297 с.103-115.

2. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозии в ее бассейне. М., 1955, с.313.