

ЭРОЗИЯ ПОЧВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Выпуск 7

(РАБОТЫ ПО ПРОБЛЕМНОЙ
МЕЖФАКУЛЬТЕТСКОЙ ТЕМАТИКЕ МГУ)

Сборник посвящен 70-летию профессора
Н. И. МАККАВБЕЕВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

1979

*А. Л. Богомолов, Г. М. Заец, В. Н. Коротаев, Р. В. Лодина,
В. А. Милошевич, А. Е. Михинов, А. Ю. Сидорчук, Р. С. Чалов*

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ ДЕЛЬТУ р. ИНДИГИРКИ

Река Индигирка формирует свою дельту на побережье Восточно-Сибирского моря. С юго-востока дельта ограничена отрогами Кондаковского плоскогорья, с запада — уступами Приморской низменности, на юге дельтовая равнина переходит в речную долину р. Индигирки шириной 25—30 км. Между наземной дельтой и открытым морем расположена полоса мелководья шириной до 20 км на западном и до 10 км на восточном крае дельты.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ДЕЛЬТЫ

Вершиной дельты р. Индигирки является место разделения реки на два основных рукава: Русско-Устьинский и протоку Среднюю (рис. 1). Среднегодовой расход воды в вершине дельты составляет 1570 м³/с. В многоводный год он достигает 2400 м³/с, а в маловодный уменьшается до 1000 м³/с. Максимальные годовые расходы, как правило, приурочены к половодью и изменяются в разные по водности годы от 5170 до 11 500 м³/с. Наименьшие годовые расходы незначительны — до 10 м³/с и наблюдаются в зимний период. Среднегодовой сток взвешенных наносов, который поступает в дельту, оценивается в 11,2 млн. т, а средняя мутность воды в 150 г/м³.

В исток Русско-Устьинского рукава поступает в среднем 19 км³ воды в год, что составляет около 40% общего стока в вершине дельты. Расходы воды здесь за летний период изменяются от 1100 до 3800 м³/с. Соответственно водности изменяется и расход взвешенных наносов — от 80 до 1000 кг/с. В другой основной рукав — протоку Среднюю ежегодно поступает 30 км³ воды. В зависимости от уровня воды в период, свободный от льда, расходы воды в истоке рукава колеблются от 1600 до 5800 м³/с, а расходы взвешенных наносов — от 150 до 1600 кг/с. От истока до устьевых створов рукавов происходит изменение их гидрологического режима. Причиной этого является частичная потеря стока воды и наносов через боковые

рукава и протоки, а также постепенное усиление энергетического воздействия моря на речной поток.

Русско-Устьинский рукав до 49-го км от устьевового створа практически сохраняет свою водность. Отсюда рукав разделяется на три протоки: Голыженскую (западную), Русско-Устьинскую (центральную) и протоку Нова (восточную). Все три протоки при выходе в море оконтуриваются полосой мелководья шириной около 10 км. От протоки Средней в 35 км от истока ответвляется многоводная Колымская протока, расходы воды в которой в зависимости от уровня

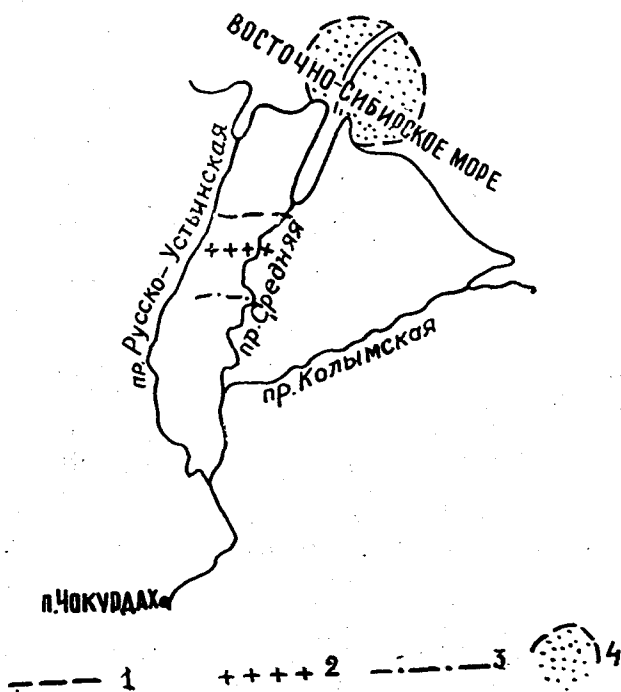


Рис. 1. Схема дельты р. Индигирки: 1, 2, 3 — границы проникновения нагонов высотой 0,3; 0,6; 1,0 м; 4 — бар

воды изменяются от 200 до 1200 м³/с, что составляет от 12,7 до 20,7% стока протоки Средней. Расход взвешенных наносов в Колымскую протоку равен 6—9% расхода протоки Средней. Ниже отвления Колымской протоки Средняя течет единым руслом до устьевового створа, теряя по пути на растекание по мелким протокам до 300 м³/с в период половодья. В межень эти потери снижаются до нуля.

Энергетическое воздействие моря на речной поток проявляется в виде распространения вверх по течению приливных и сгонно-нагонных волн, которые существенно меняют рельеф водной поверх-

ности и режим течений. Влияние приливных волн на изменение уровня воды в реке незначительно. Они проникают вверх по течению на 10—15 км от устьевого створа, а изменение их величины во времени зависит от ледовитости Восточно-Сибирского моря и фаз Луны и Солнца. В период стояния льда вблизи свала глубин приливные колебания уровня в устьевом створе не превосходят 5 см, а с удалением кромки льда в море возрастают до 10—15 см. Основные изменения водного режима реки от воздействия моря происходят в результате сгонно-нагонных колебаний уровня воды. Эти колебания формируются под действием ветра и достигают наибольшей величины на устьевом взморье. Распространяясь вверх по течению, они встречают сопротивление потока и на некотором расстоянии от устьевого створа затухают. По протоке Средней нагон высотой 0,3 м на устьевом взморье распространяется на 15—20 км выше устьевого створа и имеет повторяемость один раз в 3 дня. Нагон высотой 0,6 м имеет повторяемость один раз в 5 дней и распространяется до 35—40 км, а нагон высотой 1 м затухает на 60 км от устьевого створа. Нагоны редкой повторяемости 1,5—2,0 м выклиниваются на 100—120 км от устьевого створа (см. рис. 1).

МОРФОЛОГИЯ РУСЛА ДЕЛЬТОВЫХ РУКАВОВ

По морфологии русла в пределах основных рукавов можно выделить характерные участки. От истока протоки Средней до ответвления от нее Колымской протоки (130—100 км от устьевого створа) река протекает вдоль коренного берега, сложенного кристаллическими породами. Этот участок с полого меандрирующим, широким многорукавным руслом. Крутизна излучин характеризуется отношением $S/\lambda = 1,02—1,12$ (табл. 1), где λ — расстояние по прямой между точками смены знака кривизны на излучине, а S — длина русла по излучине. Большие радиусы кривизны излучин обуславливают плавное обтекание потоком вогнутых берегов. На этом участке расположен единственный в протоке Средней перекатный участок (111—104 км от устьевого створа). На втором участке (100—60 км от устьевого створа), где рукав выходит на дельтовую равнину, русло свободно меандрирует. Излучины хорошо выражены, имеют синусоидальную форму, для которых отношение S/λ меняется от 1,29 до 2,20 (см. табл. 1). Русло в основном одорукавное; повсеместно происходит безотрывное обтекание потоком вогнутого берега. Как первый, так и второй участок находятся в области преобладания речных факторов на динамику водных масс. Начало третьего участка (60—28 км) совпадает с верхней границей проникновения по реке нагонов высотой до 1 м. Русло здесь расширяется до 1000 м, излучины слабо выражены, имеют большие радиусы кривизны. Четвертый участок (28—0 км) — область развития пологих излучин, здесь еще больше возрастает ширина реки, уменьшается глубина потока, в русле вновь появляются осередки и острова. Третий и четвертый участки русла рас-

Таблица I

Характеристики излучий основных рукавов дельты р. Индигирки

№ излучий	Расстояние от устьевостворца, км	Длина излучий S , м	Шаг излучий λ , м	Кривизна излучий S/λ	Радиус кривизны R , м	Средняя ширина B , м	Отношение R/B	Средний диаметр дольных наносов, $\bar{d}_{ср}$, мм	Коэффициент стабильности K_c	Коэффициент эрозивной способности K_3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Протока Средняя

1	133,8	7100	6500	1,09	5000	970	5,2	0,18	6,1	650
2	126,7	8100	7400	1,08	8350	790	10,6	0,18	7,6	1690
3	118,6	6250	6100	1,02	10500	1030	10,2	0,18	5,8	2310
4	112,4	6000	5700	1,05	11800	1090	12,8	0,24	7,3	1400
5	106,4	4850	4350	1,12	3040	590	5,2	0,19	10,7	1050
6	101,5	6450	2920	2,20	2200	500	4,4	0,15	10,0	1320
7	95,0	6000	3870	1,55	2560	410	6,2	0,17	16,6	500
8	89,0	4075	2350	1,73	1850	470	3,9	0,18	12,8	430
9	80,1	3550	2750	1,29	1350	460	2,9	0,20	9,3	110
10	77,4	3325	2470	1,35	1490	470	3,2	0,18	14,1	154
11	74,1	2900	1780	2,04	1040	350	3,0	0,16	16,3	74
12	71,2	4100	3100	1,32	1770	550	3,2	0,21	14,7	200
13	67,1	6300	3850	1,64	2820	380	7,4	0,18	18,5	180
14	60,8	4850	4600	1,06	4950	1070	4,6	0,19	7,1	440
15	56,0	4350	4200	1,04	8080	820	9,9	0,15	7,3	650
16	48,3	6500	5450	1,19	4400	850	5,2	0,18	8,5	350
17	41,8	4400	3600	1,22	2720	920	3,0	0,18	7,8	530
18	37,4	6100	5180	1,18	4350	620	7,0	0,18	11,6	690
19	31,3	2500	1780	1,40	1250	450	2,8	0,15	13,3	160
20	28,8	2000	1930	1,04	2050	500	4,1	0,12	12,0	440
21	26,8	1500	1500	0,00	4050	620	6,5	0,12	9,2	1070
22	25,3	6000	5700	1,05	7500	1390	5,4	0,10	3,6	3000
23	19,3	4850	4650	1,04	7150	1200	6,0	0,10	4,2	3200
24	14,4	3250	3050	1,06	4460	1000	4,5	0,09	4,5	3100
25	11,2	4750	4300	1,10	4700	1370	3,4	0,09	3,3	3520
26	6,4	1850	1750	1,06	2800	890	3,2	0,08	4,5	3740
27	4,6	4600	4125	1,12	4390	880	5,0	0,08	4,5	3550

Рукав Русско-Устьинский

1	133,8	5350	4250	1,26	5900	620	9,2	0,28	18,0	700
2	128,4	5750	3380	1,70	2300	130	2,0	0,30	10,6	1100
3	122,6	5050	2720	1,86	1880	790	2,4	0,26	13,1	1100
4	117,5	5150	3750	1,38	2780	640	4,3	0,28	17,5	950
5	112,4	3620	2400	1,51	1800	430	4,2	0,25	23,2	500
6	108,8	3500	1550	2,26	1300	480	2,7	0,25	20,8	—
7	105,3	4420	1960	2,26	1670	400	4,2	0,23	23,0	235
8	100,9	4550	2900	1,57	1790	535	3,3	0,24	17,9	700
9	96,3	4875	4800	1,02	6340	665	9,5	0,18	9,0	1260
10	91,4	4350	4350	1,00	5630	1490	3,8	0,20	6,7	1260
11	87,0	3750	2700	1,39	1950	580	3,4	0,21	18,1	935
12	83,2	4300	3000	1,43	2140	680	3,2	0,21	15,4	1320

Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
13	78,9	4100	3000	1,36	2000	460	4,4	0,19	20,7	740
14	74,8	6350	4650	1,36	5400	820	6,6	0,16	9,8	1780
15	68,4	5150	4500	1,14	2960	780	3,8	0,15	9,6	—
16	63,2	6250	5800	1,08	5530	650	8,5	0,15	11,5	1320
17	57,0	6000	4500	1,33	3820	610	6,3	0,17	13,9	1150
18	51,0	5650	2400	2,35	2860	540	5,0	0,18	16,7	1000
19	45,4	5800	3200	1,81	—	350	—	0,15	21,4	740
20	39,6	4000	3800	1,05	—	600	—	0,12	10,0	2500
21	35,6	5500	3500	1,57	—	540	—	0,12	11,1	2000
22	30,1	4500	3400	1,32	—	500	—	0,12	12,0	1810
23	25,6	6000	5500	1,09	—	1000	—	0,10	5,0	3200

положены в области активного взаимодействия речных и морских факторов динамики водных масс.

Морфология излучин Русско-Устьинского рукава характеризуется следующими особенностями. В связи с тем, что от истока рукав протекает по дельтовой равнине в пойменных берегах, характеристики излучин до 49-го км от устьевого створа соответствуют второму участку протоки Средней. Ширина русла на всем участке изменяется от 500 до 800 м, крутизна излучин имеет тенденцию уменьшаться вниз по реке. От 49-го до 27-го км излучины выражены слабей и имеют большие радиусы кривизны (см. табл. 1). Этот участок соответствует третьему участку протоки Средней. Морфология нижнего участка (27—0 км) полностью соответствует такому в протоке Средней.

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ДЕЛЬТОВЫХ РУКАВОВ

По характеру распределения донных отложений рассматриваемые русла дельтовых рукавов разделяются на те же участки, что и по морфологии (анализируется изменение средневзвешенного — осредненного по площади дна излучины русла — медианного диаметра современного аллювия). Русловые отложения протоки Средней и Русско-Устьинского рукава представлены песками, алевритами и мелкоалевритовыми илами. На долю песчаных отложений приходится около 60% площади русла и прирусловых отмелей. Непосредственно перед разветвлением р. Индигарки на основные рукава донные наносы имеют средневзвешенный диаметр 0,22 м. Значительное укрупнение наносов наблюдается в истоках Русско-Устьинского рукава, где средневзвешенный диаметр на первых 10—15 км рукава равен 0,30 мм. Вниз по течению средняя крупность донных наносов падает до 0,20—0,15 мм. Полоса среднезернистых песков выстилает глубокие плесовые ложины, располагаясь

то у выпуклого, то у вогнутого берега крутых излучин. Более тонкий материал, представленный мелко- и тонкозернистыми песками, слагает песчаные отмели, расположенные у выпуклого берега излучины. В протоке Средней максимальная средневзвешенная крупность наносов не превышает 0,24 мм. В истоках ее средневзвешенный диаметр наносов равен 0,18 мм. Эти значения сохраняются на протяжении первого участка, где в стрежневой зоне располагаются мелко-средне- и мелкозернистые пески. На втором участке наблюдается частая изменчивость средневзвешенного диаметра наносов от 0,18 до 0,12 мм без видимой тенденции к общему уменьшению крупности вниз по течению. Вытянутые полосы среднезернистого песка расположены или в местах размыва потоком крутых берегов, к которым прижимаются максимальные глубины, или у выпуклых берегов крутых излучин. Каждая крутая излучина имеет более крупные наносы по сравнению со смежными участками с меньшей кривизной. На всем протяжении третьего участка средневзвешенный диаметр наносов равен 0,14—0,15 мм. На более пологих излучинах русла, свойственных этому участку, донные отложения максимальной крупности располагаются вдоль стрежня потока, который приближается к геометрической оси русла. На четвертом участке крупности донных наносов составляет 0,09 мм. От начала к концу участка средневзвешенный диаметр наносов заметно уменьшается — от 0,16—0,13 до 0,07 мм, т. е. в два раза. Доля площади, занятой песчаными грунтами, сокращается по сравнению с вышележащими участками от 80 до 8% и только непосредственно в устьевом створе возрастает с 8 до 30%, происходит укрупнение наносов до 0,08 мм.

Изменение вдоль русел рукавов их устойчивости оценивалось с помощью коэффициента стабильности по Н. И. Маккавееву (Маккавеев, Шатаева, Митякова, 1967):

$$K_c = \frac{d_{cp}}{IB} \cdot 1000$$

где d_{cp} — средний на отрезке русла диаметр наносов; I — уклон; B — ширина русла. Коэффициент стабильности вычислялся для каждой излучины. Выяснилось, что на первом участке протоки Средней устойчивость русла мала, значения K_c изменяются от 6 до 10. На втором участке устойчивость русла возрастает, коэффициент стабильности достигает 18,5. Близкие значения K_c характерны для Русско-Устьинского рукава до 49-го км от устья (табл. 1). На третьем участке устойчивость русла уменьшается. Значения K_c резко падают на четвертом участке, снижаясь до 3,3.

Таким образом, выделенные только по морфологическим признакам участки русла основных протоков существенно различаются и по характеру руслового аллювия, и по устойчивости русла. Следовательно, можно ожидать различий и в характере, и в интенсивности современных русловых переформирований на выделенных участках.

РУСЛОВЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В ДЕЛЬТОВЫХ РУКАВАХ

Русловые переформирования в основных рукавах дельты р. Индигирки можно разделить на горизонтальные деформации, выраженные в смещениях стрежня потока внутри русла и в передвижении всей формы русла по дну долины, и на вертикальные переформирования, приводящие к однонаправленным изменениям среднего положения отметок дна.

Интенсивность горизонтальных русловых переформирований оценивалась коэффициентом эрозионной способности K_3 , который получен в предположении, что интенсивность отступления берегов пропорциональна величине радиальной скорости на излучине (Милюшевич, Сидорчук, 1977):

$$K_3 = \frac{v_p R}{v_{cp} H},$$

где V_p — средняя скорость размыва берегов русла, м/год; R — радиус кривизны, м; H — средняя максимальная глубина русла, м; V_{cp} — средняя скорость потока, м/с. Изменение рассчитанного коэффициента K_3 по длине рукавов позволяет сделать вывод о том, что по степени эрозионной способности русла рукавов разбиваются на те же участки, что и по морфологии, донным грунтам и устойчивости.

Первому участку протоки Средней соответствует высокая эрозионная способность, коэффициент K_3 достигает значения 1300. На протяжении второго участка эрозионная способность значительно ниже и колеблется в широких пределах от 74 до 440. На третьем участке она несколько возрастает и достигает максимума (более 3000) на четвертом участке. Сравнение K_3 с коэффициентом стабильности, по Н. И. Маккавееву, K_c показало обратную связь между значениями коэффициентов. Это означает, что физический смысл K_3 как показателя интенсивности горизонтальных русловых переформирований определен верно.

В соответствии с изменением интенсивности горизонтальных переформирований русла меняется характер его вертикальных деформаций, определяемый по балансу взвешенных наносов на отдельных участках рукава. При расходах воды в истоке рукава 3080 м³/с изменение мутности потока и расхода взвешенных наносов по длине происходит следующим образом. От истока до конца первого участка расход воды остается неизменным, мутность уменьшается со 146 до 104 г/м³, а расход взвешенных наносов с 450 до 320 кг/с, т. е. около 30% взвешенных наносов осаждаются в русле. Основной очаг аккумуляции здесь — перекатный участок Ребятишки (111—104 км от устья). Наиболее динамичными формами в этом месте являются песчаные косы, которые за последние 25 лет превратились в острова, разделяющие русло реки на две протоки. За это время произошел рост отмелей как в плане со средней скоростью 3—4 м/год, так и в высоту. В начале второго участка, по-

сле отделения протоки Колымской, расход воды уменьшается до 2650 м³/с, а мутность потока и расход взвешенных наносов несколько возрастают — до 130 и 344 кг/с. С этого места начинается область размыва, максимум которого отмечается на 75-м км от устья, где расход взвешенных наносов достигает 516 кг/с, а мутность 195 г/м³. В дальнейшем расход взвешенных наносов постепенно снижается до 480 кг/с в конце второго участка и до 375 кг/с в устьевом створе. На третьем участке меняется и медианный диаметр переносимых потоком взвешенных наносов от 0,13 до 0,19 до 0,03—0,09 мм. Основным очагом аккумуляции является отрезок русла от 13-го до 5-го км от устья. За последние 15 лет отметка дна повысилась здесь на 0,7 м.

Итак, русла основных рукавов дельты р. Индигирки разделяются на ряд участков.

Первый — с пологомеандрирующим широким неглубоким руслом, разбитым на протоки островами, со смещающимися вниз по руслу грядами и широко блуждающей динамической осью потока — характеризуется относительно крупнозернистым аллювием, малыми коэффициентами стабильности русла и высокой эрозионной способностью потока. На этом участке русла происходит активная аккумуляция наносов.

Второй участок, в пределах которого крутизна излучин возрастает, увеличивается глубина и уменьшается ширина русла, характеризуется более мелким русловым аллювием и относительно высокой стабильностью русла. Здесь идет размыв дна русла, горизонтальные деформации замедленны.

На третьем участке излучины становятся менее выраженными, русло расширяется, падают его устойчивость и глубина, возрастает эрозионная способность потока к горизонтальным переформированиям. Эрозия здесь сменяется аккумуляцией.

Четвертый участок — область развития пологих излучин с большими радиусами кривизны. Ширина русла сильно возрастает, аллювий в днищах плесов варьирует по медианному диаметру в широких пределах — от мелких алевроитов в расширенных участках до мелко-средних песков в сужениях. Мала устойчивость русла, резко увеличивается эрозионная способность. На этом участке идет активная аккумуляция наносов. В конце участка русло переходит в наиболее изменчивый элемент рельефа дельты — устьевой бар.

УСТЬЕВОЙ БАР ПРОТОКИ СРЕДНЕЙ

Устьевой бар начинается от устьевого створа в районе о. Немков и простирается на 25 км в сторону моря, где ограничивается свалом глин. Ниже устьевого створа до 16-го км обширное аккумулятивное тело бара прорезается узкой русловой бороздой, являющейся продолжением русла протоки Средней. Русловая борозда образует серию излучин с постепенно уменьшающимся радиусом кривизны от 2000 до 1000 м, при этом в направлении к морю умень-

шаются глубина и ширина русловой борозды. Начиная от 16-го км и до морского края русловая борозда морфологически слабо выражена. Ширина и глубины на этом участке значительно падают, и здесь можно выделить гребень бара (в пределах 18—21 км) — зону наименьших глубин. За гребнем поверхность бара приобретает наклон в сторону моря и через 2—3 км переходит в дно Восточно-Сибирского моря.

От устьевоего створа до 5-го км (в сторону моря) русловая борозда выстилается песчаными наносами — тонкими, мелкими и средними песками. Алевриты и мелкоалевритовые илы локально распространены на прирусловых отмелях. После 5-го км вплоть до гребня бара в русловой борозде залегают мелкоалевритовые илы, а крылья бара сложены более крупными наносами — алевритами и песками. Мористее 16-го км грунты крупнее тонкого песка не обнаружены. Почти вся акватория бара в пределах гребня выстилается крупным алевритом, а морской склон бара — мелкоалевритовым илом. Локально встречаются пятна тонкого песка на западном крыле бара.

Устьевой бар протоки Средней, как и вся дельта Индигирки, расположен в области развития многолетнемерзлых пород. Образование и распространение мерзлоты на акватории бара обусловлены промерзанием донных отложений через лед, где толщина его соизмерима с глубиной взморья. Зимой большая часть устьевоего бара промерзает, сезонная мерзлота смыкается с многолетней. Подрусловые талики наблюдаются только в углубленной русловой борозде и на морском склоне бара за изобатой 2 м. После очищения акватории бара от льда происходит оттаивание верхней части донных грунтов. На большей части бара мощность оттаявшего слоя не превышает 1 м, на наиболее отмелых участках — 0,5—0,6 м.

Необычны мерзлотные условия на гребне бара. Исследования экспедиции СО АН СССР (Григорьев, 1966) и наши наблюдения показывают, что несмотря на крайнюю мелководность гребня многолетняя мерзлота здесь отсутствует по крайней мере на 6 м ото дна. Слой сезонной мерзлоты маломощен, быстро стает в начале лета, лишь на самых мелководных участках иногда сохраняется и в конце лета в виде «kozyрьков» мерзлого грунта. Отсутствие мерзлоты связывается с засоленностью грунтов приморской части бара.

Динамика вод на устьевом баре протоки Средней обусловлена речным стоком, поступающим на бар через устьевое створ у водопоста Немков, влиянием сгонов и нагонов, приливов и ветрового волнения на взморье дельты р. Индигирки. На побережье Восточно-Сибирского моря штилевые условия отмечаются крайне редко. Характерна также малая продолжительность летней межени, так как паводки следуют практически один за другим. В штиль волны полусуточных приливов приводят к падению или росту уровней воды и скоростей течения в зависимости от фазы прилива, причем ско-

рость приливного течения в период сизигии достигает 15 см/с, а в квадратуру — около 5 см/с. Все это создает серьезные трудности при анализе динамики вод на баре.

Расходы воды во время летних паводков в устьевом створе бара протоки Средней составляют 2000—3000 м³/с, а расходы взвешенных наносов до 700 кг/с. Средняя скорость потока в этих условиях — 0,80—0,90 м/с. В штиль с выходом потока на устьевой бар часть воды и наносов сосредоточивается в русловой борозде на продолжении русла протоки Средней, остальная — растекается в основном по восточному крылу бара. К 10-му км от устьевом створе

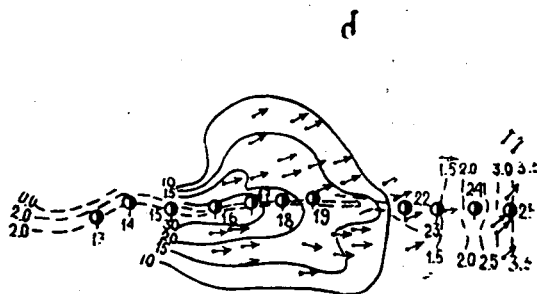
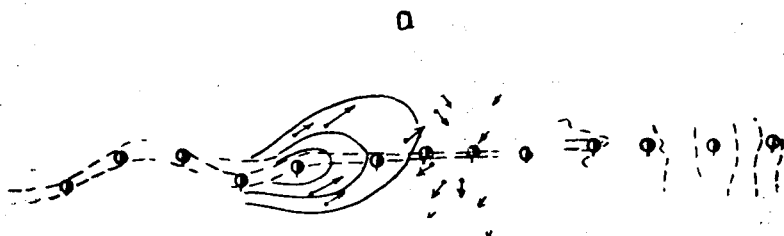


Рис. 2. Скорости и направления течения на баре р. Индигирки: 1 — изотахи, 2 — изобаты, 3 — направление течения, 4 — километраж

ра в русловой борозде (в пределах изобаты 2 м) сохраняется лишь половина стока воды, поступающей в устьевой створ. Скорости течения уменьшаются до 0,5 м/с. После 16-го км от устьевом створа происходит окончательное растекание стоковых вод на обширном мелководье. Расходы воды в бороздине в 1,9—2,0 км от устьевом створа не превышают 300—400 м³/с, а скорости течений падают до 0,1—0,15 м/с.

В сгон на акватории бара наблюдается довольно симметричное растекание речной струи по крыльям бара, что связано с отсутствием в данный период поперечного уклона водной поверхности

(рис. 2, а). Уменьшение скоростей течения как на стрежне, так и на крыльях бара происходит медленней, чем в штиль. Так, на участке от 19-го до 20-го км, где русловая борозда еще достаточно хорошо морфологически выражена, скорости в ней заметно выше, чем на крыльях бара, и составляют 0,15—0,2 м/с и только мористее, на участке 20—25-го км, где борозда слабо выражена, скорости на всей акватории бара одинаковы, не более 0,1 м/с.

В период даже небольшого нагона (около 30 см высотой) картина течения на баре резко изменяется (рис. 2, б). Струя, выходя на мелководную часть бара (16-й км) и расплываясь, на протяжении еще 3 км сохраняет северное направление, при этом скорости существенно падают (от 0,32 до 0,06 м/с). В районе гребня (19—20-й км) под действием нагонной волны течение постепенно разворачивается на северо-восток, а далее, на участке 20—25-й км отмечается обратное течение — из моря в сторону устья. Приведенные планы течений при сгоне и нагоне (см. рис. 2а, 2б) получены в период среднего по величине паводка, при этом расход воды в устьевом створе составлял 2600 м³/с, расход наносов — 430 кг/с.

Наиболее существенные русловые деформации на баре происходят в период половодья при наибольшем стоке воды и наносов. В первую очередь эти переформирования отражаются в изменении продольного профиля дна бара, т. е. в режиме глубин в русловой борозде и на гребне бара.

Большую часть половодья сток на устьевом баре сосредоточен в естественном лотке из ледового «серпантина» сверху и мерзлого грунта по бортам борозды (Антонов, Бушуев, Налимов, 1970). Изменение глубины за период от начала половодья до конца ледохода на баре зависит от объема воды, прошедшей за это время. Размыв гребня судоходной борозды соответствует невысоким половодьям, когда мутность потока относительно мала — до 200 г/м³ (табл. 2). Заиление борозды (увеличение отметок дна) отвечает мощным половодьям, когда мутность потока возрастает до 600 г/м³. Характерно, что установившаяся после половодья отметка дна гребня бара определяет среднюю минимальную глубину в течение лета

Таблица 2

Изменение отметок дна на устьевом баре Δh , см

W	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Δh	-10	-20	-24	-19	-12	-6	0	+4	+7	+9	+10

размыв

аккумуляция

W км³ — объем воды, поступивший в вершину дельты за период от начала половодья до конца ледохода на баре.

На фоне этой средней минимальной глубины в течение лета происходят относительно кратковременные знакопеременные ее колебания, зависящие от интенсивности прохождения летних паводков и влияния моря.

При движении паводочной волны по устьевому бару стоковые характеристики существенно изменяются. Интегральным выражением этого является изменение средней минимальной глубины на гребне бара. На подъеме паводка с увеличением мутности воды идет аккумуляция: повышается дно тем быстрее, чем интенсивнее подъем уровня в вершине дельты (с учетом времени добегания). На спаде паводков наблюдается обратная картина: чем интенсивнее падает уровень в вершине дельты, тем быстрее размывается гребень бара (табл. 3). Следует отметить, что для большинства паводков типично, что отложенные на подъеме наносы к концу спада размываются, и поэтому отметки дна до и после прохождения паводка практически неизменны.

Таблица 3

Изменение отметок дна на устьевом баре $\left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)$ в зависимости от интенсивности подъема — спада летних паводков $\left(\frac{\Delta h}{\Delta t}\right)$

$\frac{\Delta H}{\Delta t}$ см/сутки	70	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20	-30
$\frac{\Delta h}{\Delta t}$ см/сутки	+7,3	+6,8	+6,1	+5,3	+4,2	+3,0	+1,8	0	-2,0	-5,3	-10,1

аккумуляция

размыв

Влияние моря на динамику потока устьевого бара проявляется в неперриодических колебаниях уровня воды и изменениях в скоростном поле под действием ветра. Во время нагона, который обычно возникает при ветрах северного и северо-западного направления, на баре формируется кривая подпора свободной поверхности с обратным уклоном, тем большим, чем выше подъем уровня. Ветровые волны взмучивают большое количество наносов, отложение которых вызывает уменьшение глубин. В таких условиях заиление тем больше, чем меньше речной сток и выше нагон. Когда расходы воды в устьевом створе достигают руслоформирующих, такая закономерность нарушается, и заиление определяется поступающими с реки наносами, которые выпадают в осадок в условиях подпора. Во время сгонов поток на устьевом баре течет более концентрировано, формируется кривая спада свободной поверхности, отсутствуют поперечные уклоны. В результате происходит размыв гребня бара. При окончании сгонно-нагонных колебаний уровня глубины на гребне бара восстанавливаются.

За последние 20 лет однонаправленной тенденции в изменении планового положения морского края устьевого бара протоки Средней не обнаруживается. Однако наблюдаются знакопеременные миграции его в зависимости от колебаний водности реки. В 1957 г. морской край располагался в 23 км от устьевого створа, ширина гребня составляла 6 км, длина русловой бороздины — 17 км (все границы по изобате 2 м). Речной склон бара имел уклон 0,0015, а морской — 0,0003. Последующий период (1957—1966 гг.) совпал с повышенной водностью р. Индигирки, когда на устьевой бар протоки Средней поступало ежегодно 4—7 млн. т наносов. В результате этого произошло существенное обмеление гребня устьевого бара. Ширина гребня увеличилась до 7 км. Весь бар выдвинулся в море на 1,4 км. В то же время удлинилась русловая борозда на 0,4—0,5 км. Речной склон бара стал несколько положе, на морском крае уклоны увеличились до 0,0005. С 1966 по 1974 г., когда водность р. Индигирки уменьшилась, морской край бара сначала стабилизировался, а затем отступил на 0,7 км. В этот период происходило заполнение речными наносами русловой борозды, ее длина уменьшилась на 1,3 км. Ширина гребня бара увеличилась, но глубины здесь возросли.

ВЫВОДЫ

Таким образом, современные процессы дельтообразования в устьевой области р. Индигирки соответствуют схеме, предложенной Н. И. Маккавеевым (1951). На верхнем участке русел рукавов происходит аккумуляция наносов при довольно интенсивных горизонтальных русловых переформированиях. Второй и третий участки в средней части русел рукавов характеризуются общими процессами размыва при довольно малой интенсивности плановых смещений. Четвертый, нижний, участок рукавов и устьевые бары вновь являются зонами аккумуляции, горизонтальные русловые деформации здесь наиболее активны. Следует отметить, что динамичность крупных русловых образований в устье р. Индигирки много меньше, чем в руслах рек немерзлотной зоны (Чалов, 1976). В протоке Средней коэффициент стабильности изменяется от 3,9 до 18,5, а интенсивность размыва берегов не превышает 4 м/год, что в несколько раз меньше, чем на реках немерзлотной зоны с теми же величинами K_c . Видимо, активность процессов переформирования русла тормозится повсеместным развитием многолетнемерзлых пород. В то же время периодические русловые деформации в пределах активного немерзлого слоя могут достигать большой величины, особенно в зонах взаимодействия вод суши и моря. Так, на устьевом баре протоки Средней в течение навигации изменение отметок дна может достигать 0,7 м. В этих условиях единственным способом решить транспортную проблему и увеличить глубины на устьевом баре является создание искусственного канала через гребень бара.

ЛИТЕРАТУРА

- Антонов В. С., Бушуев А. В., Налимов Ю. В. Обнаружение глубоководных борозд через бары арктических рек. — «Тр. ААНИИ», 1970, т. 290, с. 83—91.
- Григорьев Н. Ф. Многолетнемерзлые породы приморской зоны Якутии. М., «Наука», 1966.
- Маккавеев Н. И. Особенности формирования русла в низовьях равнинных рек. — В сб.: «Проблемы физической географии», 1951, вып. 16, с. 49—78.
- Маккавеев Н. И., Шатаева С. Г., Митякова М. Н. Показатель устойчивости русла реки. — «Метеорология и гидрология», 1967, № 5.
- Милошевич В. А., Сидорчук А. Ю. Об определении верхней границы зоны взаимодействия вод суши и моря в устьевых областях рек. — В сб.: Гидрология и гидрохимия юга Дальнего Востока. Владивосток, 1977, с. 143—151.
- Чалов Р. С. Исследование руслового режима крупных равнинных рек. — В сб.: Речная гидравлика и русловые процессы, ч. 2. М., Изд-во Моск. ун-та, 1976, с. 72—84.