

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 627.152.122

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(81-91)

**Р. С. ЧАЛОВ, А. С. ЗАВАДСКИЙ, А. А. КАМЫШЕВ, Н. М. МИХАЙЛОВА, С. Н. РУЛЁВА**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
119899, Москва, Ленинские горы, 1, Россия, rschalov@mail.ru, az200611@rambler.ru,  
arsenii.kamychev@yandex.ru, nmmikhailova@yandex.ru, mnks1@yandex.ru

### МОРФОДИНАМИЧЕСКИЕ ТИПЫ РУСЛА И РАЗВИТИЕ ИЗЛУЧИН РЕКИ ОБИ (В ПРЕДЕЛАХ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ)

*Впервые выполнен подробный анализ распространения и условий формирования русла различного морфодинамического типа на Средней Оби в пределах Томской области, от устья р. Томи до границы с Ханты-Мансийским (Югра) автономным округом. Показана роль широкой поймы и условий ее затопления в половодье, условий прохождения руслоформирующих расходов воды и устойчивости русла в преимущественном развитии меандрирования реки, в том числе рукавов пойменно-руслых разветвлений. Разветвленное и прямолинейное неразветвленное русла занимают подчиненное понижение, разделяя извилистые участки. Обнаружено, что пойменно-руслые разветвления с меандрирующими рукавами в основном приурочены к перевалам реки от одного борта долины к другому и располагаются по диагонали к направлению течения пойменного потока. Параметры излучин в разветвлениях этого типа соответствуют их водности, но четкие гидролого-морфологические зависимости не выявлены из-за периодических перераспределений стока между рукавами. Модальные (по участкам реки между основными притоками) значения параметров излучин находятся в обратной зависимости от водности (порядка) реки. Введение поправочного коэффициента на расчлененность поймы пойменными ответвлениями как показателя степени отвлечения стока воды из русла в пойму позволило установить «нормальное» соотношение между параметрами излучин и водностью руслых потоков в половодье. Также определены соотношения между степенью развитости и коэффициентом формы излучин, пределы их проявления. Для всех излучин оценены изменения параметров за 1986–2011 гг. и переход некоторых из них из одной категории в другую, установлены причины перераспределения стока и развития рукавов пойменно-руслых разветвлений.*

Ключевые слова: руслые процессы, свободные и прорванные излучины, пойменно-руслые разветвления, гидролого-морфологический анализ, разветвленное и прямолинейное русло, пойма.

**R. S. CHALOV, A. S. ZAVADSKII, A. A. KAMYSHEV, N. M. MIKHAILOVA, S. N. RULEVA**

Moscow M. V. Lomonosov State University, Leninskie gory, 1, Moscow, 119899, Russia, rschalov@mail.ru,  
az200611@rambler.ru, arsenii.kamychev@yandex.ru, nmmikhailova@yandex.ru, mnks1@yandex.ru

### MORPHODYNAMICAL TYPES OF CHANNEL, AND DEVELOPMENT OF THE OB RIVER BENDS (WITHIN TOMSK OBLAST)

*For the first time, a detailed analysis is made of the occurrence and different morphodynamical type-channel formation conditions on the Middle Ob within Tomsk oblast, from the mouth of the Tom river to the boundary with Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra. We emphasize the role of a broad floodplain and of its inundation conditions during snowmelt floods, the occurrence conditions for channel-forming water discharges and channel stability in the predominant development of river meandering, including of the branches of floodplain-channel forks. Braided and straight unbraided channels occupy a subordinate position separating sinuous reaches. It is shown that floodplain-channel forks with meandering branches occur largely at long transitions of the river from one valley side to the other, diagonally across the floodplain flow direction. The parameters of the bends in the forks of this type correspond to their hydraulicity, but no clear-cut hydrological-morphological relationships are determined because of intermittent runoff redistributions between branches. Modal (for the sections of the river between the main*

tributaries) values of the parameters of the bends depend inversely on the river hydraulicity (order). By introducing a correction coefficient for floodplain dissection by a floodplain fork as the indicator of the degree of diversion of water flow from the channel to the floodplain, it was possible to determine a "normal" relationship between parameters of the bends and hydraulicity of the channel flow during floods. Furthermore, we ascertained the relationships between the degree of development and the coefficient of the form of bends and determined their manifestations. For all the bends, we determined changes in parameters for the time interval 1986–2011 and the transition of some of them from one category to another, and ascertained the causes for runoff redistribution and the development of branches of the floodplain-channel forks.

Keywords: channel processes, free and cut-off bends, floodplain-channel forks, hydrological-morphological analysis, braided and straight channel, floodplain.

## ВВЕДЕНИЕ

Река Обь в верхнем и среднем течении (в пределах Алтайского края, Новосибирской и Томской областей) наиболее детально изучена в отношении русловых процессов [1–4]. В первую очередь это касается верхней Оби (от слияния рек Бии и Катунь до устья Томи), по которой имеется обширная литература в связи с оценкой влияния на русловый режим Новосибирского гидроузла и воднотранспортным регулированием русла. Существенно хуже исследован участок реки ниже слияния с Томью. Монография [3] содержит общие сведения о типах русла, переформированиях некоторых излучин и изменениях во времени их морфологических параметров. Особое внимание уделялось излучине у г. Колпашево, с развитием которой связан размыв значительной части городской территории [5]. Однако приведенные данные, за исключением материалов по Колпашевской излучине, носят фактологический характер и сводятся к констатации произошедших в течение XX в. изменений отдельных излучин русла.

Для Средней Оби ниже слияния с Томью характерно свободномеандрирующее русло, что вообще не свойственно для таких больших рек [6, 7]. Разветвленное русло, типичное почти для всей Верхней Оби, представлено здесь лишь простыми разновидностями, местами русло относительно прямолинейное, неразветвленное; часто наблюдаются пойменно-русловые разветвления с извилистыми рукавами — своеобразный тип разветвлений, встречающийся на меандрирующих реках, условия формирования и режим деформаций которых наименее изучен.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РУСЛА

Сливаясь с Томью, Обь входит в категорию крупнейших рек. Ее водность возрастает в 1,6 раза: если в 300 км выше устья Томи (практически бесприточный участок) среднегодовой расход воды  $Q_{cp}$  (гидропост Новосибирск) составляет 1630 м<sup>3</sup>/с, максимальный — 9670 м<sup>3</sup>/с (в условиях регулирования стока Новосибирским гидроузлом), то за счет Томи он увеличивается более чем на 1000 м<sup>3</sup>/с (максимальный расход на гидропосту Томск достигает 13 600 м<sup>3</sup>/с). Далее вниз по течению на протяжении 950 км (в пределах Томской области) водность Оби возрастает в 1,4 раза благодаря крупным притокам — Чулыму ( $Q_{cp} = 785$  м<sup>3</sup>/с), Кети ( $Q_{cp} = 560$  м<sup>3</sup>/с), Васюгану ( $Q_{cp} = 365$  м<sup>3</sup>/с), Тыму ( $Q_{cp} = 89$  м<sup>3</sup>/с), а также большому количеству малых рек, дренирующих болота Васюганья и правобережья Оби. Эти притоки обуславливают последовательное увеличение порядка главной реки  $N$  (по системе А. Шайдеггера в модификации Н. И. Алексеевского [8]) на участках Томь–Чулым ( $N = 16,94$ ), Чулым–Кеть ( $N = 17,10$ ), Кеть–Васюган ( $N = 17,30$ ), Васюган–Тым ( $N = 17,37$ ), Тым–устье Ваха ниже с. Соснино на границе Томской области ( $N = 17,47$ ) (рис. 1).

Влияние регулирования стока Новосибирским гидроузлом ниже устья Томи ограничивается значительным снижением максимальных уровней воды и сокращением длительности затопления высоких прирусловых отмелей и поймы [3]. На фоне общей тенденции повышения водности реки вследствие глобальных изменений климата [9] это способствует активности зарастаемости отмелей (побочней, осередков) и превращению их в молодую пойму, поросшую кустарником. У гидропоста Колпашево (устье р. Кети) практически восстанавливается естественная мутность, хотя сток взвешенных наносов меньше на 12 %; ниже устья р. Кети его величина достигает бытовых значений [10].

Обеспеченность руслоформирующих расходов воды  $Q_{ф}$  (в трактовке Н. И. Маккавеева – Р. С. Чалова [7, 11, 12]) выше устья р. Томи до выхода воды на пойму, в условиях регулирования стока Новосибирским водохранилищем равна 11,9 %; после слияния с Томью и Чулым показателю  $Q_{ф}$  имеет два интервала: в бровках поймы (обеспеченность 7,3 %) и при уровнях высокой межи (37,5 %) [3]. Ниже устья Кети первый из них соответствует уже затопленной пойме [12]. Это определяет последовательное увеличение вниз по течению ее расчлененности пойменными протоками (ответвлениями).



Рис. 1. Схема верхнего и среднего течения р. Оби.

I–V — участки реки между основными притоками. Границы: 1 — выделенных участков в пределах района исследований, 2 — субъектов РФ, 3 — государственная.

По выделенным участкам между устьями крупных притоков их количество  $n$  и отношение суммарной длины ответвлений  $\Sigma l_{\text{отв}}$  к длине  $l_p$  каждого участка реки  $\varphi = \frac{\Sigma l_{\text{отв}}}{l_p}$  последовательно составляют: Томь–

Чулым —  $n = 1$ ,  $\varphi = 0,05$ ; Чулым–Кеть —  $n = 5$ ,  $\varphi = 0,53$ ; Кеть–Васюган —  $n = 7$ ,  $\varphi = 1,23$ ; Васюган–Тым —  $n = 4$ ,  $\varphi = 0,71$ ; Тым–Вах (с. Соснино) —  $n = 9$ ,  $\varphi = 0,96$ . Это усиливает рассредоточение стока, особенно во время половодья, когда пойменные протоки отвлекают на себя значительную часть расхода воды. При этом ширина поймы (в основном двусторонней) возрастает почти в четыре раза от устья Томи до устья Васюгана, после чего перед впадением Тыма сужается более чем в два раза, затем от устья Тыма до с. Александровского восстанавливает свою ширину и вновь сужается уже вплоть до границы Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа (с. Соснино). Одновременно вниз по течению увеличиваются глубина и продолжительность затопления поймы. В высокое половодье здесь формируется транзитный пойменный поток. По данным Н. Б. Барышника [13], в нижней части рассматриваемого участка Средней Оби (гидропост Прохоркино) объем воды на пойме составляет 58,5 % от общего объема половодья; в районе г. Колпашево, по измерениям в среднее по водности половодье, на долю пойменной составляющей стока воды приходится 10–20 % стока, причем пойменные протоки забирают 5–17 % расхода воды в реке [14]; в межень многие из них пересыхают.

Пойма по рельефу поверхности сегментно-гривистая; каждый сегмент оконтуривается широкой ложбиной, изогнутыми старичными озерами, пойменной протокой, излучиной русла или рукавами пойменно-русловых разветвлений. Это свидетельствует о меандрировании реки за все время формирования поймы и тем самым о регулировании стока половодья.

#### МОРФОДИНАМИЧЕСКИЕ ТИПЫ РУСЛА

Несмотря на высокую водоносность и размеры реки (ширина на прямолинейных участках и крыльях излучины составляет от 600 до 1500 м), русло Средней Оби отличается сравнительно неболь-

Таблица 1

Распространение морфодинамических типов русла на Средней Оби (от устья р. Томи до с. Соснино)

Но- мер п/п	Параметр	Прямо- линейное неразвет- вленное русло	Излучины				Разветвления					Всего
			Про- рван- ные	Сво- бодные	Вынуж- денные и впи- санные	Σ	Оди- ночные	Пой- менно- русло- вые	Парал- лельно- рукав- ные	Одно- сторон- ные	Σ	
1	Длина, км	160	104	304	62	470	97	180	11	33	321	951
2	Доля от суммарной длины, %	16,8	10,9	32,0	6,5	49,4	10,2	18,9	1,2	3,5	33,8	100
3	Доля от длины русла с данным морфодина- мическим типом, %	100	22,1	64,7	13,2	100	30,2	56,2	3,4	10,3	100	
4	Количество, ед.	15	15	32	8	55	8	11	1	8	28	98
5	Доля от суммарного количества форм русла, %	15,3	15,3	32,6	8,2	56,1	8,2	11,2	1,0	8,2	28,6	100

шим морфологическим разнообразием (табл. 1, рис. 2). Здесь преобладает извилистое меандрирующее русло, характерное также для рукавов пойменно-русловых разветвлений, вместе с которыми протяженность русла этого типа составляет 639 км, или 67,2 % длины реки от устья Томи до с. Соснино

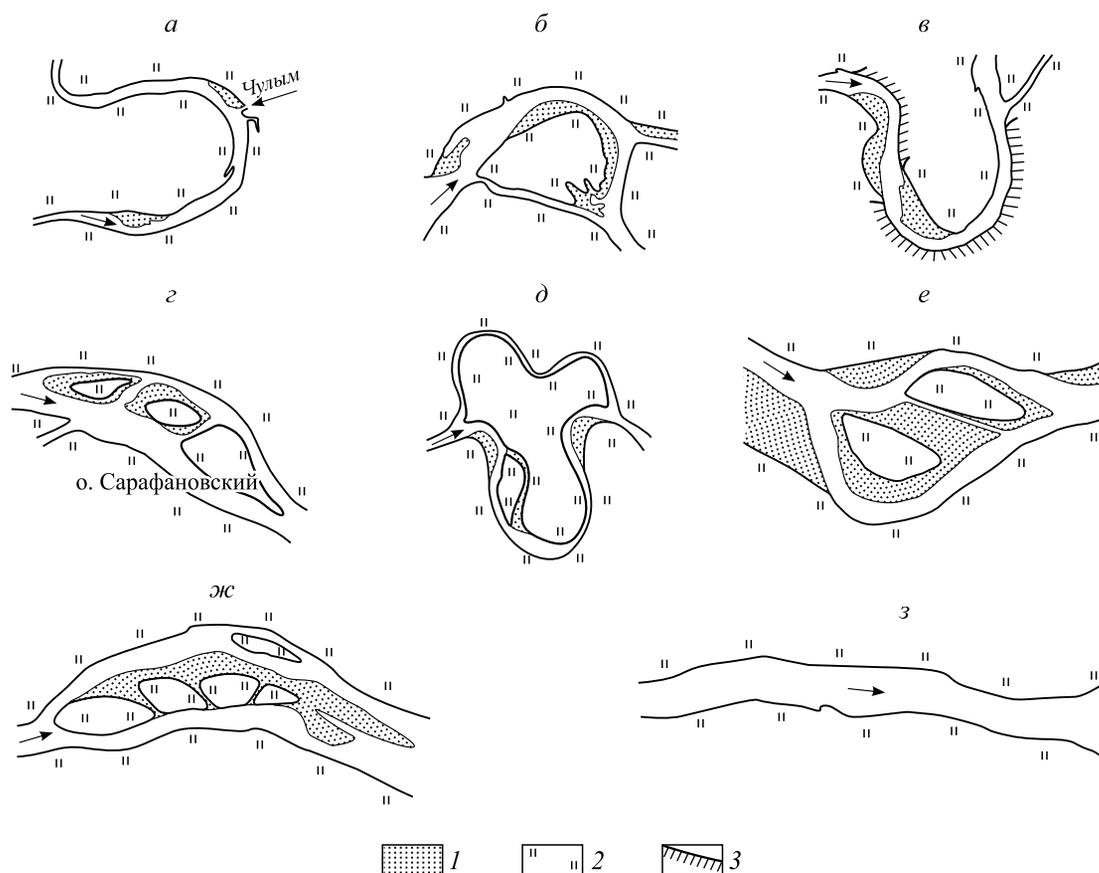


Рис. 2. Морфодинамические типы русла Средней Оби.

Излучины: а — свободная (Молчановская, 1102–1134 км), б — прорванная (Коломенская, 1169–1178 км), в — вписанная (Колпашевская, 1238–1254 км). Разветвления: г — одностороннее (Сарафановское, 1154–1161 км), д — пойменно-русловое (Кольджа, 1372–1396 км), е — одиночное (Сахарное, 1478–1486 км), ж — параллельно-рукавное (Александровское, 1856–1867 км), з — прямолинейное, неразветвленное (1812–1822 км). 1 — прирусловые отмели; 2 — пойма; 3 — коренной берег.

(граница Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа). Наиболее распространены свободные и прорванные излучины. Суммарная длина и количество первых равны 304 и 32 км соответственно, без учета излучин рукавов пойменно-руслowych разветвлений, водность — 104 и 15 км соответственно. В пойменно-руслowych разветвлениях общее количество свободных излучин рукавов практически одинаково (в судоходных рукавах — 28, в несудоходных — 31), т. е. их больше в два раза в рукавах пойменно-руслowych разветвлений, чем на всем остальном протяжении реки от устья р. Томи до с. Соснино. Среди всех свободных излучин, в том числе в рукавах пойменно-руслowych разветвлений, преобладают сегментные (более 70); количество петлеобразных, включая вписанные, сравнительно невелико — их всего пять в неразветвленном русле и две в рукавах разветвлений, хотя здесь большинство излучин преимущественно крутые, со степенью развитости  $l/L > 1,7$  [7] (где  $L$  — шаг излучины,  $l$  — ее длина).

Вписанные и вынужденные излучины встречаются редко, причем первые формируются возле легкоразмываемых уступов правобережных песчаных надпойменных террас, вторые — при подходе реки к левому коренному берегу. Яркий пример — Колпашевская излучина, вогнутый берег которой с расположенным на нем городом размывается со скоростью от 2,8 до 18 м/год и за 100 лет (с начала XX в.) отступил почти на 1,5 км [3, 14].

Разветвления занимают 32,8 % длины участка. Общее их количество равно 20, и половину из них составляют пойменно-руслowych с меандрирующими рукавами. Рассредоточение стока по рукавам происходит также в прорванных излучинах, в которых сосуществуют новое или развивающееся спрямленное русло и старое изогнутое или, наоборот, наряду со старым значительная часть расхода воды сосредотачивается в развивающемся, спрямляющем излучину, рукаве. Таких прорванных излучин 10, что увеличивает число мест, в которых поток разделяется на две ветви, до 30, а суммарную длину разветвлений до 416 км (42,7 % от длины участка). Таким образом, если по морфодинамическим признакам на Средней Оби преобладают излучины русла, то по рассредоточению стока по рукавам велика доля разветвлений.

Распределение русел разного типа по длине реки варьирует по участкам, ограниченными устьями основных притоков (табл. 2). Для всех участков характерно, особенно с учетом извилистости рукавов пойменно-руслowych разветвлений, преобладание излучин, доля которых (в % от длины участков) вниз по течению возрастает от 68 % на участке Томь—Чулым до 86 % на участке Васюган—Тым. Без излучин рукавов пойменно-руслowych разветвлений максимум излучин (63 %) приходится на участок Чулым—Кеть, минимум (38 %) — на участок Тым—Соснино, т. е. их количество уменьшается почти в 1,5 раза. Пойменно-руслowych разветвления (всего 11) в основном встречаются ниже слияния с р. Кетью: 33 % на участке Кеть—Васюган, 86 % — Васюган—Тым. Выше устья р. Кети имеется только одно такое разветвление — Кривошеинское, составляющее 18 % от длины участка Томь—Чулым (между Чулымом и Кетью их вообще нет), с рукавами, образующими излучины: шесть левый и четыре правый. Также всего одно пойменно-руслowych разветвление — Тымское — имеется на участке Васюган—Тым, но оно достигает 25 % от его длины. Это участок с относительно суженной поймой, что, очевидно, в первую очередь препятствует развитию пойменно-руслowych разветвлений.

Ниже устья Тыма, где пойма расширяется, вновь преобладают пойменно-руслowych разветвления (их четыре), но размеры каждого из них уменьшаются почти в два раза. Если выше по течению их длина составляет 20–26 км, то здесь она равна всего 10–12 км, а их рукава образуют не более 2–3 излучин.

Среди всех пойменно-руслowych разветвлений по своему генезису выделяется Нарымское, находящееся в нижней части участка Кеть—Васюган. Здесь располагается устье Кети Копыловской — пойменной протоки Оби, по которой проходит часть стока ее притока — р. Кети (остальная часть стока Кети проходит по Тогурской Кети, образующей устье у г. Колпашево). Смещение излучины Оби у с. Нарыма привело к размыву поймы между Кетью Копыловской и Обью, вследствие чего ее сток стал частично направляться в нижнюю часть Кети Копыловской, превратив ее в рукав пойменно-руслowych разветвления — Нарымскую луку (на Оби выше устья Томи аналогичное происхождение имеет протока Симан, представляющая собой нижнюю часть ее небольшого притока — р. Уени [3]).

За исключением Нарымского пойменно-руслowych разветвления, тяготеющего к правосторонней части дна долины и имеющего своеобразное происхождение, все остальные располагаются на переломах реки от одного борта долины к другому и характеризуются в целом диагональным направлением к ее оси. Это обуславливает несовпадение во время половодья пойменного и руслового потоков и, как следствие, периодическое изменение водности рукавов в многоводные и маловодные половодья: в первом случае преимущественное развитие получает рукав, соответствующий более прямому на-

Таблица 2

## Распространение типов русла по участкам (между основными пригоками) Средней Оби (от устья р. Томи до с. Соснино)

№ пара-метра (см. табл. 1)	Прямолинейное неразветвленное русло	Излучины			Σ	Разветвления				Σ	Всего		
		Прорванные	Свободные	Вынужденные и вписанные		Пойменно-русловые	Параллельно-рукавные	Односторонние					
					Томь–Чулым								
1	12	11	60	–	71	35	–	–	25	–	–	60	143
2	8	8	42	–	50	24	–	–	18	–	–	42	100
3	100	16	84	–	100	57	–	–	43	–	–	–	–
4	1	3	7	–	10	3	–	–	1	–	3	7	18
5	6	16	39	–	56	16	–	–	6	–	17	40	100
					Чулым–Кеть								
1	39	31	34	12	77	–	–	–	–	–	7	7	123
2	31	25	28	10	63	–	–	–	–	–	6	6	100
3	100	40	44	16	100	–	–	–	–	–	100	100	–
4	2	4	4	1	9	–	–	–	–	–	3	3	14
5	14	28	28	7	63	–	–	–	–	–	100	100	100
					Кеть–Васюган								
1	20	45	90	6	142	8	–	–	87	–	11	106	268
2	7	17	34	2	53	3	–	–	33	–	4	40	100
3	110	28	67	5	100	8	–	–	82	–	10	100	–
4	3	6	10	1	17	1	–	–	5	–	1	7	27
5	11	22	37	4	63	4	–	–	18	–	4	26	100
					Васюган–Тым								
1	17	6	46	7	59	–	–	–	25	–	–	25	101
2	17	6	45	7	58	–	–	–	125	–	–	25	100
3	100	10	78	12	100	–	–	–	100	0	0	100	–
4	2	1	4	1	6	–	–	–	1	–	–	1	9
5	22	11	45	11	67	–	–	–	11	–	–	11	100
					Тым–Соснино								
1	72	10	74	37	121	54	–	–	30	11	15	123	316
2	23	3	23	12	38	17	–	–	14	3	5	39	100
3	100	8	60	32	100	44	–	–	35	9	12	100	–
4	7	1	7	5	13	4	–	–	4	1	1	10	30
5	23	3	23	17	43	14	–	–	14	3	3	34	100

Примечание. Прочерк — данные типы русла отсутствуют.

правлению потока, во втором — более искривленному. На это накладываются русловые деформации, приводящие к изменениям угла захода в каждый из рукавов, длин рукавов из-за развития и спрямления излучин, связанные с продвижением побочной на узлы разветвления и т. д. Происходящие многолетние колебания водности рукавов сопровождаются изменениями параметров их излучин (радиусов кривизны, шагов), вследствие чего они постоянно перестраиваются, приспосабливаясь к новым гидравлическим характеристикам потока. Поэтому закономерные соотношения между показателями водности и параметрами излучин для рукавов разветвлений не устанавливаются: в более многоводном рукаве они отражают уже частично трансформировавшиеся размеры излучин, установившиеся в предшествующий период, когда рукав был маловодным, и наоборот.

Снижение доли извилистого русла вниз по течению сопровождается ростом прямолинейного неразветвленного, которое составляет 7–8 % от участков Тоть–Чулым и Кеть–Васюган, 17 % на участке Васюган–Тым и 23 % — Тым–с. Соснино. Наибольшая протяженность этого типа русла наблюдается между устьем Тыма и с. Соснино — 72 км (23 % длины), причем здесь излучины образуют шесть морфологически однородных участков протяженностью от 6 до 24 км. В целом для данного отрезка характерно наиболее частое чередование морфологически однородных участков — всего их насчитывается 19: излучины и пойменно-русловые разветвления с меандрирующими рукавами (12 участков длиной от 6 до 43 км) разделяются тремя участками с разветвленным руслом (от 11 до 24 км) и шестью — с прямолинейным неразветвленным (6–11 км, один участок — 24 км). На других отрезках между основными притоками число морфологически однородных участков примерно одинаково — 5–6, причем протяженность извилистых морфологически однородных участков, включая пойменно-русловые разветвления с меандрирующими рукавами, изменяется от 155 км (между устьями Чулыма и Васюгана), 56 и 63 км (два) до 25 км (между устьем Тыма и с. Соснино).

Для разветвлений русла Средней Оби характерны, кроме пойменно-русловых, одиночные и односторонние. Во многих случаях они либо сопрягаются с прямолинейным руслом, либо образуют самостоятельные отрезки между сериями излучин и пойменно-русловыми разветвлениями. Протяженность таких «вставок» обычно варьирует в пределах от 3 до 11 км. Наибольшая длина участка с одиночными разветвлениями (26 км) — непосредственно ниже слияния с Тотью. Однако еще в середине XX в. здесь было прямолинейное неразветвленное русло с побочными, последовательно располагающимися возле правого и левого берегов (в шахматном порядке) и имеющими развитые побочные протоки, т. е. представляющие собой осередки. Снижение максимальных уровней из-за регулирования стока

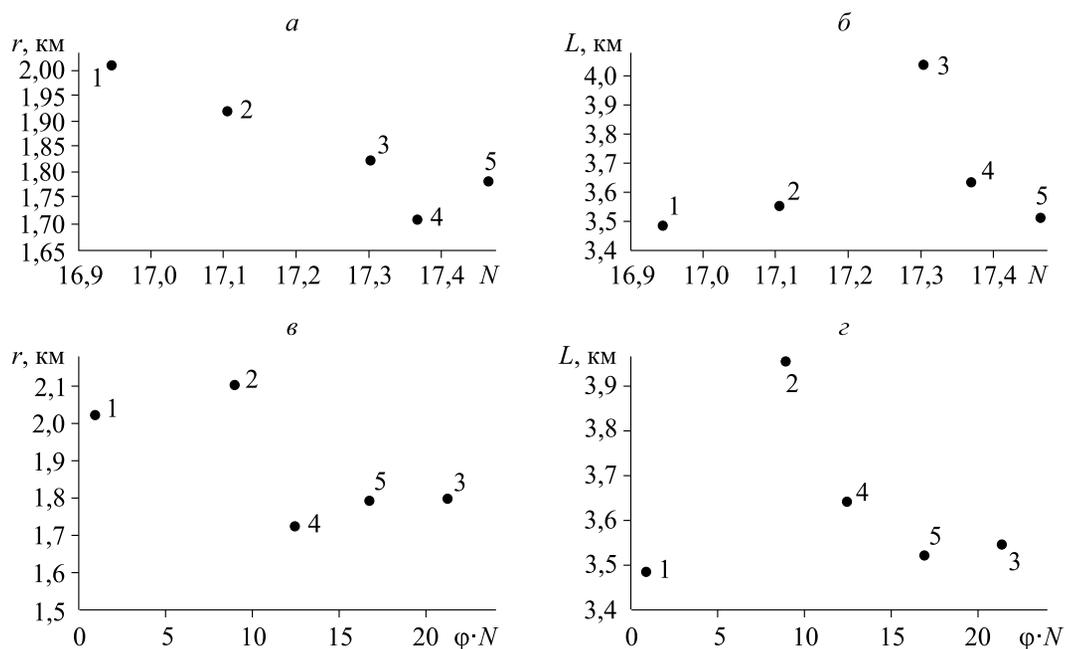


Рис. 3. Зависимости модальных радиусов кривизны  $r$  (а, в) и шагов излучин (б, г) от порядка реки  $N$  (а, б) и показателя  $\phi N$  (в, г).

Участки Оби: 1 — Тоть–Чулым, 2 — Чулым–Кеть, 3 — Кеть–Васюган, 4 — Васюган–Тым, 5 — Тым–с. Соснино.

Новосибирским гидроузлом привело к зарастанию осередков и превращению их в острова с периодическими увеличением/уменьшением водности левого и правого рукавов возле них под влиянием надвигающихся на узлы разветвления право- или левобережных побочней и кос [3, 7].

Анализ рельефа прирусловой поймы по космическим снимкам в сопоставлении со старыми лоцманскими картами первой половины XX в. показывает, что во многих случаях в наше время или 150–200 лет тому назад там, где сейчас находятся прямолинейное неразветвленное русло, одиночные и односторонние разветвления, русло также образовывало свободные излучины, со временем спрямившиеся, или существовали прорванные излучины, развитие которых сопровождалось отмиранием старого изогнутого русла. Отмечено также отмирание одного из рукавов в пойменно-русловых разветвлениях, существовавших еще в начале XX в. (у пос. Могочин ниже устья Чулыма, протока Казальцевская) и превратившихся сейчас в пойменные протоки — ответвления.

Наиболее протяженные участки прямолинейного, неразветвленного русла, односторонние и одиночные разветвления (более 20 км) приурочены к сужениям дна долины (непосредственно ниже устья р. Томи и ниже устья р. Тыма), где они характеризуются относительным постоянством своего планового положения. В сужении дна долины у с. Александровского находится единственный участок параллельно-рукавного русла, проходящий вдоль левого коренного берега. Протяженность этого участка — 11 км, он образован цепочкой вытянутых посередине русла островов.

### ГИДРОЛОГО-МОРФОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗЛУЧИН МЕАНДРИРУЮЩЕГО РУСЛА

Преимущественное развитие меандрирующего (извилистого) русла ниже слияния с р. Томью и его сокращение в нижней части исследуемого участка реки (до границы с Ханты-Мансийским автономным округом) можно объяснить двумя причинами. Первая — изменение устойчивости русла. На Верхней Оби русло (по числу Лохтина  $L$  и коэффициенту стабильности Н. И. Маккавеева) относится к слабо устойчивому и в основном разветвленное [3]. На Средней Оби меандрирующее русло и пойменно-русловые разветвления с меандрирующими рукавами относительно устойчивы ( $L = 5–10$ ) и даже устойчивы ( $L = 13–33,4$ ), за исключением Нарымского разветвления ( $L = 2,3–2,9$ ), имеющего необычный генезис. Все участки с разветвлениями (одиночное, одностороннее, параллельно-рукавное) слабоустойчивы ( $L = 2,3–4,4$ ), а иногда и неустойчивы. Вниз по течению показатель устойчивости в целом снижается, что соответствует увеличению числа разветвлений и большей частоте чередования типов русла.

Вторая причина связана со значительным увеличением ширины поймы (кроме участка Васюган–Тым) и, соответственно, с большим оттоком воды в периоды половодья в ее пределы и меньшей водностью руслового потока в многоводную фазу режима. Это проявляется в зависимости модальных значений параметров излучин (радиусов кривизны  $r$  и шагов  $L$ ) на беспристочных участках от порядка реки  $N$  (по системе А. Шайдеггера в модификации Н. И. Алексеевского [8]) как показателя ее водоносности (рис. 3, а, б): для  $r$  она обратная на всем протяжении Средней Оби (Томь–с. Соснино), а для  $L$  она такова на участках ниже устья Кети (точки 3–5 на рис. 3, б) что не соответствует общепринятым представлениям, согласно которым  $r(L) \sim Q(N)$ . Правда, было установлено, что на крупнейших реках параметры излучин не зависят от характерных (среднемаксимальных, руслоформирующих) расходов воды [7, 15]. Роль разливов реки по широкой пойме в формировании излучин

проявляется, если порядок реки умножить на коэффициент  $\varphi = \frac{\sum l_{\text{отв}}}{l_p}$ : для  $r$  зависимость становится

прямой, дифференцируясь на две ветви — выше (точки 1 и 2) и ниже (точки 3, 4, 5) устья Кети (г. Колпашево) (см. рис. 3, в). Очевидно, это связано с различными условиями прохождения руслоформирующих расходов воды  $Q_{\text{ф}}$ : выше устья Кети, несмотря на широкую затопленную пойму, пойменная многорукавность развита слабо и  $Q_{\text{ф}}$  проходят в ее бровках; ниже по течению  $Q_{\text{ф}}$  соответствует затопленной пойме. Для  $L$  (см. рис. 3, г) зависимость от  $\varphi N$  прямая для реки выше и обратная — ниже устья Кети.

Параметры излучин  $r$  и  $L$  связаны между собой (рис. 4, а). Однако при увеличении радиусов кривизны ( $r > 2,5$  км) дисперсия (разброс точек на графике) существенно возрастает, и при  $r = 8,5$  км величина  $L$  может различаться в 2–2,5 раза, определяясь, по-видимому, формой излучины. Между степенью развитости излучин  $l/L$  и показателем их формы  $r/h$  (здесь  $h$  — стрела прогиба излучин) прослеживается обратная экспоненциальная зависимость (см. рис. 4, б), но она ограничивается пре-

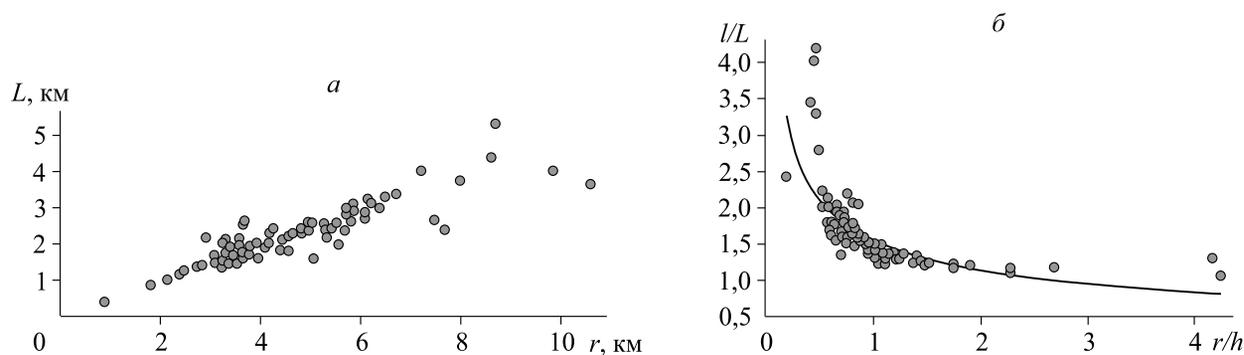


Рис. 4. Соотношение между морфологическими параметрами излучин Оби:

а — шагом  $L$  и радиусом кривизны  $r$ ; б — степенью развитости  $l/L$  и показателем формы  $r/h$ .

делами  $l/L = 2,5$  и  $r/h = 2,5$ , выше которых коэффициент формы или степень развитости излучины остаются неизменными. Первый случай характерен для крутых петлеобразных излучин, второй — для пологих сегментных. В то же время анализ графиков связи параметров каждой излучины ( $r$ ,  $l/L$ ) с соответствующим ей порядком реки зависимости не выявляет, что объясняется большим разнообразием форм излучин, находящихся на разных стадиях развития; наблюдается только общий рост верхней огибающей точек на графике.

Параметры излучин изменяются в процессе их развития. У большинства из них за 25 лет (измерения по лоцманским картам 1986 и 2011 гг.) уменьшился радиус  $r$  и возросла степень развитости рек  $l/L$  (табл. 3). Лишь в случаях, когда в это время произошло образование прорванной излучины с перемещением основного течения реки в спрямляющий рукав, параметр  $r$  увеличился, а отношение  $l/L$  уменьшилось. Так, для прорванной излучины на 1542–1548 км  $r$  был равным 1,94 км, стал 2,05 км,  $l/L$  — было 1,6, стало 1,54; на излучине 1440–1448 км  $r$  изменился с 1,92 до 2,0 км,  $l/L$  — с 2,26 до 2,14. То же иногда происходило на синусоидальных излучинах, у которых в привершинной части стрежень потока перемещается к выпуклому берегу (Назинская излучина на 1770–1780 км).

Смена параметров излучин в пойменно-русловых разветвлениях определяет изменение водности их рукавов. Например, для Кривошенского разветвления заметно возросло соотношение  $l/L$  излучин левого рукава, вследствие чего его водность за 1986–2011 гг. сократилась с 53 до 30 %, и он перестал быть судоходным. Увеличение водности правого рукава сопровождалось незначительным повышением  $l/L$  при возрастании радиусов кривизны некоторых излучин. Перераспределение расходов воды между рукавами произошло также в Басмановском и Лукашкинском пойменно-русловых разветвлениях (1340–1360 и 1822–1832 км).

Таблица 3

Изменения параметров некоторых излучин Средней Оби в 1986–2011 гг.

Расстояние от устья, км (название излучины)	Параметры				Тип излучины и его изменение
	$r$ , км		$l/L$		
	1986 г.	2011 г.	1986 г.	2011 г.	
1058–1067	3,32	2,88	1,39	1,48	Сегментная пологая → сегментная развитая
1083–1091 (Абрамцевская)	3,46	3,18	1,22	1,25	Сегментная пологая
1033–1140 (Игрековская)	3,22	2,17	1,44	1,59	Сегментная развитая
1163–1169	2,82	2,35	1,21	1,29	Сегментная пологая
1264–1268	1,14	1,13	1,74	1,94	Сегментная крутая
1269–1272	1,14	0,86	1,35	1,59	Сегментная развитая
1372–1377	1,95	1,58	1,36	1,59	Сегментная пологая → сегментная развитая
1601–1607	1,77	1,75	1,67	1,85	Сегментная развитая → сегментная крутая
1676–1681 (Новоникольская)	2,36	1,92	1,20	1,32	Сегментная пологая

Вместе с тем отмечено несколько спрямлений крупных сегментных излучин, образование новых прорванных и перемещение основного потока в спрямляющие рукава уже существующих. Эти переформирования подробно рассмотрены в [3]. Их перечень может быть дополнен происшедшим в 1986–2011 гг. спрямлением Кашинской излучины и прогнозируемым спрямлением Петропавловской и Березовской излучин. В первом примере (1515–1520 км) во второй половине XX в. сформировался спрямляющий рукав Каргасовская прямца ( $l/L$  излучины к этому моменту возросло до 1,8); к 2011 г. сюда переместился основной поток (79 % расхода воды), произошло выполаживание излучины: в 1986 г.  $l/L = 1,38$ , а сейчас русло квазипрямолинейно —  $l/L = 1,1$ . Во втором примере величина  $l/L$  в 1986 и 2011 гг. составляла соответственно 1,84 и 1,99 для Петропавловской и 1,35 и 1,49 для Березовской излучин. В обоих случаях образовались спрямляющие рукава — протоки Хлебница и безымянная, в которые со временем должно перейти главное течение реки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования русловых процессов на Средней Оби в пределах Томской области позволили в значительной мере уточнить имеющиеся представления о распространении и условиях развития русла, выполнить гидролого-морфодинамический анализ излучин (что для крупнейшей реки с их массовым распространением представляет собой принципиально новый аспект в изучении процесса меандрирования), установить условия спрямления свободных и формирования прорванных излучин. Специфическая особенность меандрирующего русла Средней Оби — широкое распространение пойменно-русловых разветвлений с извилистыми рукавами, параметры излучин которых соответствуют водности рукавов. Их доля от суммарной длины русла (от устья Томи до границы Томской области и Ханты-Мансийского автономного округа) составляет 18,9 %. Все они формируются на участках, где река перемещается от одного борта долины к другому, т. е. в условиях пересечения направлений пойменного и руслового потоков во время половодий.

Параметры излучин Оби (радиусов кривизны, шагов) находятся в обратной зависимости от характерных расходов воды в реке, что обусловлено растеканием потока половодья по широкой пойме и его рассредоточением по пойменным ответвлениям (при руслоформирующем расходе воды, который ниже устья Кети проходит выше бровок поймы). Введение в зависимость соответствующего коэффициента приводит ее (для радиусов кривизны излучин) к традиционному виду ( $r \sim Q$ ).

Переформирования излучин заключаются в их спрямлении и образовании прорванных излучин, увеличении степени их развитости, уменьшении радиусов кривизны, а в пойменно-русловых разветвлениях — в перераспределении расходов воды по рукавам. В ряде случаев произошла трансформация одного типа русла в другой (отмирание одного из рукавов в пойменно-русловых разветвлениях и образование извилистого русла, при спрямлении излучин русло стало относительно прямолинейным, неразветвленным и т. д.).

Результаты работы позволяют обоснованно подходить к решению водохозяйственных и водно-транспортных задач, вопросов предотвращения опасных проявлений русловых процессов, а также к прогнозным оценкам переформирования русла при изменениях водности реки и антропогенных воздействиях на русло и факторы русловых процессов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (15–05–03762), Российского научного фонда (14–17–00155), по планам научно-исследовательской работы (госзадание) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева МГУ.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И. В. Применение морфологического анализа к оценке общих русловых деформаций р. Оби // Тр. ГГИ. — 1962. — Вып. 94. — С. 22–86.
2. Русловые процессы на реках Алтайского региона / Ред. Р. С. Чалов — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. — 243 с.
3. Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна / Ред. Р. С. Чалов, Е. М. Плескевич, В. А. Баула. — Новосибирск: РИПЭЛ-плюс, 2001. — 300 с.
4. Беркович К. М., Виноградова Н. Н., Завадский А. С., Рулёва С. Н., Сурков В. В., Чалов Р. С. Нижний бьеф Новосибирской ГЭС в прошлом, настоящем и будущем (опыт исследования формирования природно-тех-

- ногенной системы) // Эрозия почв и русловые процессы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. — Вып. 16. — С. 132–147.
5. **Завадский А. С., Ильясов А. К., Рулёва С. Н., Сурков В. В., Турыкин Л. А., Чалов Р. С.** Эволюция Колпашевской излучины Оби и развитие опасных проявлений русловых процессов // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 1. — С. 56–64.
  6. **Великанов М. А.** Русловой процесс. — М.: Госфизматиздат, 1958. — 395 с.
  7. **Чалов Р. С.** Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. — М.: КРАСАНД, 2011. — 960 с.
  8. **Алексеевский Н. И.** Формирование и движение речных наносов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. — 203 с.
  9. **Будыко М. И.** Климат в прошлом и будущем. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 352 с.
  10. **Вострякова Н. В., Лысенко В. В., Широков В. М.** Преобразование твердого стока в среднем течении р. Оби // Труды СибНИИЭ. — 1975. — Вып. 27. — С. 34–45.
  11. **Маккаев Н. И.** Русло реки и эрозия в ее бассейне. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 347 с.
  12. **Чалов Р. С.** Географические исследования русловых процессов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. — 234 с.
  13. **Барышников Н. Б.** Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. — СПб.: Изд-во Рос. гос. гидрометеорол. ун-та, 2012. — 426 с.
  14. **Чалов Р. С., Сурков В. В., Рулёва С. Н., Беликов В. В., Завадский А. С., Бондарев В. П., Ильясов А. К., Крыленко И. В., Крыленко И. Н., Турыкин Л. А.** Русловые процессы на р. Оби в районе г. Колпашево, размыв города, компьютерное моделирование потока и обоснование оптимального варианта защитных мероприятий // Эрозия почв и русловые процессы. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. — Вып. 18. — С. 205–143.
  15. **Чалов Р. С., Завадский А. С., Панин А. В.** Речные излучины. М.: — Изд-во Моск. ун-та, 2004. — 371 с.

*Поступила в редакцию 8 декабря 2015 г.*

---