

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.537.551.435.1

ФОРМИРОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕНИЙ НА ИЗЛУЧИНАХ РУСЕЛ РЕК

Р.С. Чалов¹, А.А. Камышев², А.А. Куракова³, Г.Б. Голубцов⁴

¹⁻⁴ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

²⁻⁴ *Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*

¹ *Кафедра гидрологии суши, проф., д-р геогр. наук; e-mail: rschalov@mail.ru*

² *Мл. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: arsenii.kamyshev@yandex.ru*

³ *Бед. инженер, канд. геогр. наук; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

⁴ *Инженер, канд. геогр. наук; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

При изучении морфодинамики русел процессы и формы появления меандрирования и разветвления рассматриваются независимо друг от друга. Однако на больших реках развитие излучин осложняется формированием островов на их крыльях и в привершинных частях. Наиболее яркое проявление этого процесса – разветленно-извилистые русла, развитие которых происходит вследствие последовательного образования островов, создающих при причленении их к береговой пойме шпоры излучин. Рельеф пойм таких рек – ложбинно-островной (в отличие от гривистого рельефа типичных меандрирующих рек). Другой разновидностью таких русел больших рек являются чередующиеся односторонние разветвления, в которых излучины основного (многоводного) рукава огибают группы островов, расположенных в шахматном порядке, а само русло в пойменных берегах остается квазипрямолинейным (в разветвленно-извилистом русле оно образует сегментные излучины). Наличие разветвлений на излучине русла обуславливает рассредоточение стока, снижение водности основного рукава, что сказывается на параметрах излучин.

Острова формируются также в привершинных частях излучин, где вследствие нарушения условий безотрывного обтекания потоком берегов его динамическая ось смещается к выпуклому берегу, размывая его. В образующемся местном расширении русла возникает осередок и, при его зарастании, остров. На прямолинейных вставках между смежными большими излучинами местное расширение русла формируется при пересечении во время половодья пойменного и руслового потоков, и в нем также образуется осередок или остров. На верхних крыльях крутых излучин, особенно вынужденных, формирование разветвлений связано с подпором потока, возникающим при подходе его под большим углом к коренному берегу в вершине излучины.

Формирование разветвлений на излучинах русла следует учитывать при освоении рек как фактор, способный оказывать влияние на условия судоходства и влиять на особенности переформирования русла, что важно в местах пересечения рек линейными сооружениями (мостами и трубопроводами).

Ключевые слова: разветленно-извилистое русло, чередующиеся односторонние разветвления, острова, осередки, рассредоточение стока, местное расширение русла

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.6

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия (со второй половины XX в.) и в нашей стране, и за рубежом все больше внимания уделяется исследованиям русловых процессов на реках с разветвленным руслом. Однако обычно они рассматриваются при всем их многообразии в «чистом виде» – разветвлении как разновидности морфодинамических типов русел [Маккавеев, 1955; Ржаницын, 1985; Rosgen, 1994; Чалов, 2008]. При этом отмечается, что рукава разветвлений образуют излучины или также разделяются

островами меньших размеров на более короткие протоки [Чалов, 2021]. То же относится к процессам меандрирования, которые имеют намного более длительную историю исследований, начиная с первого десятилетия XX в., когда были сформулированы «законы Фарга» [Fargue, 1908]; осложнение излучин формированием островов при этом никем не рассматривалось [Schumm, 1977; Leopold, Wolman, 1960; Маккавеев, 1955; Розовский, 1957; Кондратьев, 1954; Попов, 1955; Гришанин, 1972] вплоть до начала XXI в.

Однако, как и во всех проявлениях природных процессов, морфодинамические типы речных русел не имеют жестких границ, и между ними существуют переходные (промежуточные) формы. Таковы, например, разветвленно-извилистые русла – специфический морфодинамический тип, объединяющий свойства, присущие как излучинам, так и разветвлениям. Они вошли в морфодинамическую классификацию речных русел МГУ [Чалов, 2008] как разновидность широкопойменных русел, разветвленных на рукава, но одновременно рассматриваются в качестве разновидностей речных излучин. Выделяются также чередующиеся односторонние разветвления, которые соотносятся как с разновидностями речных излучин [Чалов, 2008], так и с прибрежными односторонними разветвлениями.

Морфологические различия между этими двумя разновидностями разветвлений и неодинаковые условия их формирования обычно не принимаются во внимание, и они объединяются общим названием «разветвленно-извилистое русло», что неизбежно приводит к ошибкам при решении вопросов регулирования русел.

Кроме того, при изучении меандрирования особенно на больших реках не учитывается то, что излучины часто осложняются формированием разветвлений в их привершинных частях, на крыльях и на прямолинейных «вставках» между смежными излучинами и составными элементами (изгибами русла) сундучных (трапециевидных) излучин. Все это не только осложняет морфологию излучин русла, но и вносит существенные коррективы в режим их переформирования благодаря рассредоточению стока и наложению процессов меандрирования и разветвления.

Задача настоящей статьи – показать условия, морфологические различия, особенности формирования и многолетних деформаций разветвленно-извилистых русел, русел с чередующимися односторонними разветвлениями и разветвлений, образующихся на излучинах русла, дать их четкие определения и гидролого-морфологические характеристики, чтобы в дальнейшем избегать терминологической путаницы и оценивать их влияние на водохозяйственное и транспортное освоение рек.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу статьи положены материалы многолетних исследований русловых процессов на реках России и сопредельных стран, во время которых впервые было обращено внимание на существование переходных форм русел между разветвлениями и излучинами [Чалов, 2021], а впоследствии и на морфологические осложнения излучин русла разветвлениями на их элементах (на крыльях, в при-

вершинных частях), которые стали рассматриваться как формы второго или третьего порядков [Чалов, 2008]. При этом при крупномасштабных исследованиях выполнялся полный комплекс русловых изысканий (съемка и промеры русла, измерения расходов воды в рукавах и протоках, распределение руслообразующих наносов, скоростные поля и т. д.), причем со временем совершенствовались их технологии по мере применения все более современных приборов и аппаратуры. Так, например, скорости течения и расходы воды измерялись акустическим доплеровским измерителем скорости течения воды ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) типа RiverRay (погрешность определения расхода воды $\leq 5\%$). Запись и обработка данных измерений ADCP осуществлялись с помощью компьютерной программы. Для руслового анализа использовались разновременные карты русел, составляемые на суходонные реки, аэро- и космические снимки, лоцманские карты (последние – за длительный период, начиная с 1960-х гг. и по настоящее время). Использование картографических материалов за разные годы помогает наиболее точно отследить морфодинамику русла, так как на них зафиксировано его состояние в определенный период времени. Исследования охватили большинство средних и больших рек России и сопредельных стран (Северную Двину и Вычегду, Обь и Иртыш, Лену и ее основные притоки, нижнюю Волгу и Оку, Днестр, Неман и многие другие).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология и деформации разветвленно-извилистых русел определяются формированием островов у выпуклых берегов излучин русла, составляющих шпоры последних. При этом линия размываемого берега характеризуется четко выраженной вогнутостью, ниже плеча которой, обычно совпадающего со створом перегиба между смежными излучинами, формируются острова, создающие в процессе развития шпору, а сами пойменные шпоры характеризуются ложбинно-островным рельефом, в котором основные элементы представлены грядами – бывшими островами и ложбинами – бывшими протоками [Чернов, 1983]. Этот тип русла характерен для нижней Вычегды (ниже устья р. Виледи), где ширина русла и параметры излучин (радиусы r , шаги L) имеют наибольшие значения; выше по течению острова в извилистом русле отсутствуют [Чалов, 2021]. На нижнем Иртыше, Дону, Оке, верхней Оби (выше устья р. Томи) их или нет, или они встречаются в виде одиночных форм, не образуя морфологические однородные участки.

По мере развития излучин происходит заполнение наносами проток между островами, причленение островов к пойме и одновременное формирование новых островов на фоне увеличивающейся кривизны излучины (степени ее развитости l/L , где l – длина русла по излучине, L – ее шаг). При этом наличие островов в пределах извилистого русла является свидетельством наличия в потоке двух динамических осей, между которыми происходит накопление наносов и, как следствие, формирование осередков и островов. В качестве параметра, количественно отражающего кинематику структуры водного потока, следует рассматривать критерий И.Ф. Карасева (Θ) [Карасев, 1975]:

$$\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\frac{2g}{c^2}},$$

где b_p – ширина русла, h – глубина русла, g – ускорение свободного падения, c – коэффициент Шези.

Примеры такого русла дают Таганская крутая излучина на р. Оби, шпора которой представлена сегментно-островной поймой, а в русле вдоль нее идет образование новых островов и осередков, линейные размеры которых сопоставимы с шириной русла – $L_0 > 1$ км, $B_0 > 0,5$ км, а величина критерия И.Ф. Карасева возрастает в 1,5 раза по сравнению со смежными участками (рис. 1, А), и Сольвычегодская сегментная развитая излучина на р. Вычегде (рис. 1, Б), где L_0 и B_0 в несколько раз превышают

ширину наиболее водного рукава, проходящего вдоль правого берега, за счет чего суммарная ширина русла достигает 2,5–3 км. При этом водность проток между островами в шпоре таких излучин составляет в сумме до 30% от общего стока реки, возрастая в многоводную фазу режима и снижаясь до 1–2%, вплоть до полного пересыхания в межень. Похожие колебания водности межостровных проток характерны и для прибрежных односторонних разветвлений на прямолинейных участках. Отвлечение части расхода воды в эти протоки в период, когда он является руслоформирующим, сказывается, во-первых, в снижении параметров излучин (радиусов кривизны, шага) и увеличении степени развитости l/L как следствие частичного рассредоточения стока по протокам среди островов, составляющих их шпору (поскольку $r, L, l/L = f(Q_\phi)$ – руслоформирующего расхода воды), и, во-вторых, в формировании мелководных перекатов в основном рукаве на перегибах между смежными излучинами. Например, у развитых излучин разветленно-извилистого русла нижней Вычегды их шаг и радиус кривизны в 2,3–2,5, на нижнем Вилное – в 3,6–4,0 раза меньше, чем у развитых сегментных свободных излучин на смежных участках этих рек (табл.). Чем круче излучина такого разветленно-извилистого русла, тем меньше водность второстепенных межостровных рукавов в привершинной части шпоры, и тем меньше их влияние на изменение параметров излучин.

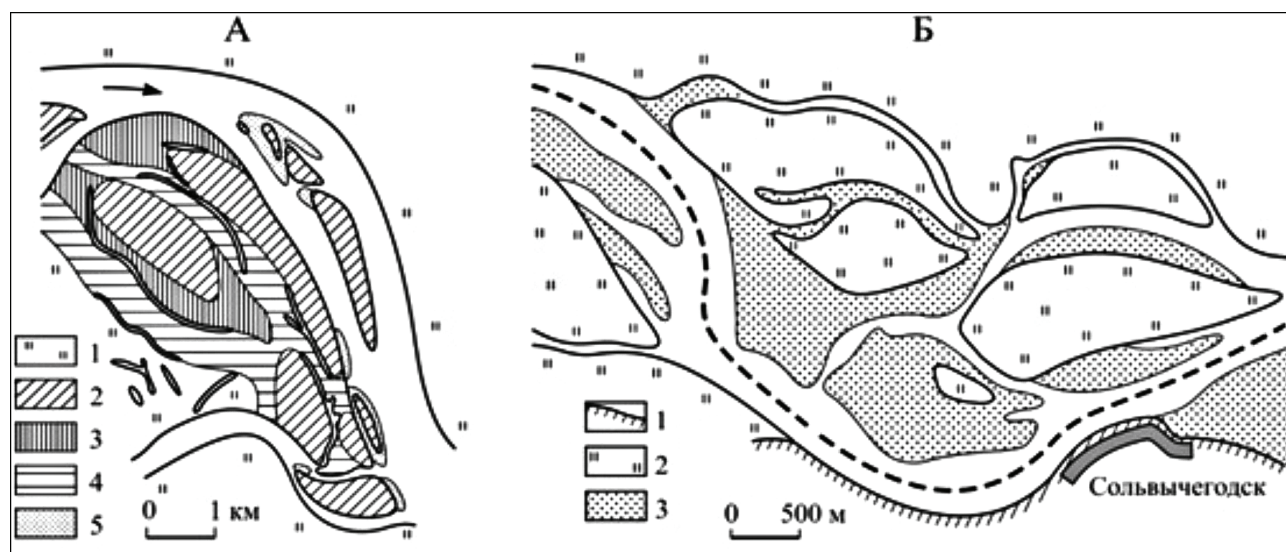


Рис. 1. Разветленно-извилистые русла:

- А – верхняя Обь, Таганская излучина (1 – береговая пойма; 2 – острова; 3 – причлененные к островам участки молодой поймы, образовавшиеся при зарастании отмелей; 4 – обмелевшие и превратившиеся в ложбины на пойме бывшие протоки; 5 – прирусловые отмели); Б – нижняя Вычегда, Сольвычегодская излучина (1 – надпойменная терраса; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели)

Fig. 1. Branched-winding channels:

- A – Upper Ob, Taganskaya bend (1 – coastal floodplain; 2 – islands; 3 – sections of young floodplain attached to the islands, formed through the overgrowth of shoals; 4 – former channels that have become shallow and turned into hollows on the floodplain; 5 – sandbanks); B – Lower Vychegda, Solvychevodskaya bend (1 – terrace above the floodplain; 2 – floodplain; 3 – sandbanks)

Таблица

Параметры развитых сегментных излучин и излучин разветвленно-извилистого русла на нижней Вычегде и нижнем Вилюе [Чалов, 2008]

Река	$Q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{с}$	Разветвленно-извилистое русло		Сегментная излучина	
		$r, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$r, \text{ м}$	$L, \text{ м}$
Вычегда	1000	600	1100	1400	2800
Вилюй	1360	500	1000	2000	3600

Наличие протоков и рукавов, расчленяющих шпору излучин разветвленно-извилистого русла, обуславливает спрямление последних уже на стадии развитой сегментной излучины при соотношении $l/L = 1,4-1,7$, причем нередко оно происходит уже при минимальных его значениях (1,4–1,5). Поэтому излучины разветвленно-извилистого русла очень редко бывают крутыми [Камышев, 2022]. Однако спрямление их происходит не по тыловой, наиболее пониженной части пойменной шпоры, а вследствие развития одного из рукавов (протоков) в привершинной части излучины, являющемся наиболее многоводным из всех, образующих разветвление. При таком спрямлении излучины разветвленно-извилистого русла обычно возникает одиночное разветвление, распределение расходов воды по рукавам которого зависит от местных условий: рукава или близки по водности, или большая часть стока сосредоточивается в спрямляющем рукаве (вдоль островов, образующих выпуклый берег излучины), или сохраняется в старом русле, но в меньшем объеме, чем до развития спрямления, если оно находится под направляющим воздействием ведущего берега выше по течению. Критерий И.Ф. Карасева при этом довольно сильно варьирует как в основном русле, так и в рукавах, расчленяющих шпору. Так, на Оби величина критерия в основном русле подобных разветвлений достигает 37,8 при среднем значении 15,0, а в рукавах, пересекающих шпору, может составлять 84,2 при среднем значении 24,6. Во втором случае это связано с большой шириной спрямляющей протоки и наличием в ней осложняющих форм в виде осередков [Камышев, 2022].

Береговая линия разветвленно-извилистого русла изогнутая, развитие излучин происходит вследствие последовательного образования островов и их причленения к пойменной шпоре. Являясь переходной формой между излучинами и разветвлениями русла на рукава и сохраняя морфологические черты меандрирования, развитие разветвленно-извилистых русел осуществляется благодаря формированию у выпуклого берега не побочной, с зарастающими пригребневыми частями и превращения их в пойменные гривы, а осередков, превращающихся в ходе их эволюции в элементарные острова, увеличивающие

в дальнейшем свои параметры [Голубцов, Чалов, 2019]. При этом их форма в плане (соотношение L_0/B_0) может изменяться в широких пределах, соответствуя изометричным $L_0/B_0 < 3$ или вытянутым $L_0/B_0 > 4$ островам. Они характерны для больших меандрирующих рек со слабоустойчивым широким руслом, в котором в многоводную фазу режима динамическая ось потока разделяется на ряд ветвей, смещается к выпуклому берегу (как следствие зависимости радиуса кривизны r от расхода воды $r \sim Q$), способствуя развитию побочных протоков и формированию осередков, по мере развития излучин увеличивающихся в размерах и превращающихся в острова.

В результате рельеф формирующихся в процессе развития излучины пойменных шпор оказывается ложбинно-островным, присущим разветвленным руслам, но ориентировка элементов рельефа (гряд – бывших островов и ложбин – бывших межостровных протоков) соответствует изменяющейся кривизне излучин. Поэтому А.В. Чернов [2009] предложил называть такие поймы сегментно-островными, подобно сегментно-гивистым поймам меандрирующих рек, на которых изогнутость гив (прирусловых валов, формирующихся у выпуклых берегов излучин) отражает развитие излучины и уменьшение радиуса ее кривизны [Чернов, 1983].

В чередующихся односторонних разветвлениях контуры русла в бровках береговой поймы остаются относительно прямолинейными, и шпоры излучин основного рукава представлены одним прибрежным островом или группой островов. Динамическая ось потока при этом искривляется. Этим чередующиеся односторонние разветвления отличаются от разветвленно-извилистого русла, в котором происходит нарушение прямолинейности очертаний русла в бровках поймы, а шпоры излучин представлены массивами ложбинно-островной поймы. Чередующиеся односторонние разветвления формируются, как правило, в слабоустойчивом русле, уступая по показателю степени устойчивости только параллельно-рукавным и сложным сопряженным разветвлениям, и, несмотря на наличие главного рукава с наибольшей долей расхода, отличаются сложной многорукавностью и картиной расщепления стока.

Если разветвление формирует один прибрежный остров, по мере развития излучины основного рукава со временем происходит перераспределение потока в узле разветвления, и большая часть расхода воды перемещается в бывший второстепенный рукав между островом и берегом, все разветвление трансформируется в одиночное, а при расположении таких островов цепочкой вдоль реки в шахматном порядке у противоположных берегов – в сопряженные разветвления. Последующая эволюция этих разветвлений может привести к восстановлению чередующихся односторонних, но с зеркальным расположением основного рукава по отношению к исходному.

Для многорукавных чередующихся разветвлений характерно продольное смещение прибрежных островов, образующих сегменты излучин основного

(многоводного) рукава (рис. 2, А). Являясь большим по водности, основной рукав, образующий излучину, сосредоточивает до 60–70% расхода воды, остальная часть стока рассредоточивается по системе мелководных проток. Динамическая ось потока основного рукава прижимается к оголовкам островов, вызывая их интенсивный размыв (до 10–15 м/год). Напротив островов такой же интенсивный размыв противоположного пойменного берега приводит к образованию в нем выбоин (вогнутости), вследствие чего нарушается прямолинейность контуров береговой линии, которая приобретает фестончатые очертания. В низовой части группы островов происходит аккумуляция продуктов размыва, обуславливающая смещение стрежня потока к островам смежной нижележащей группы, также вызывая их размыв.

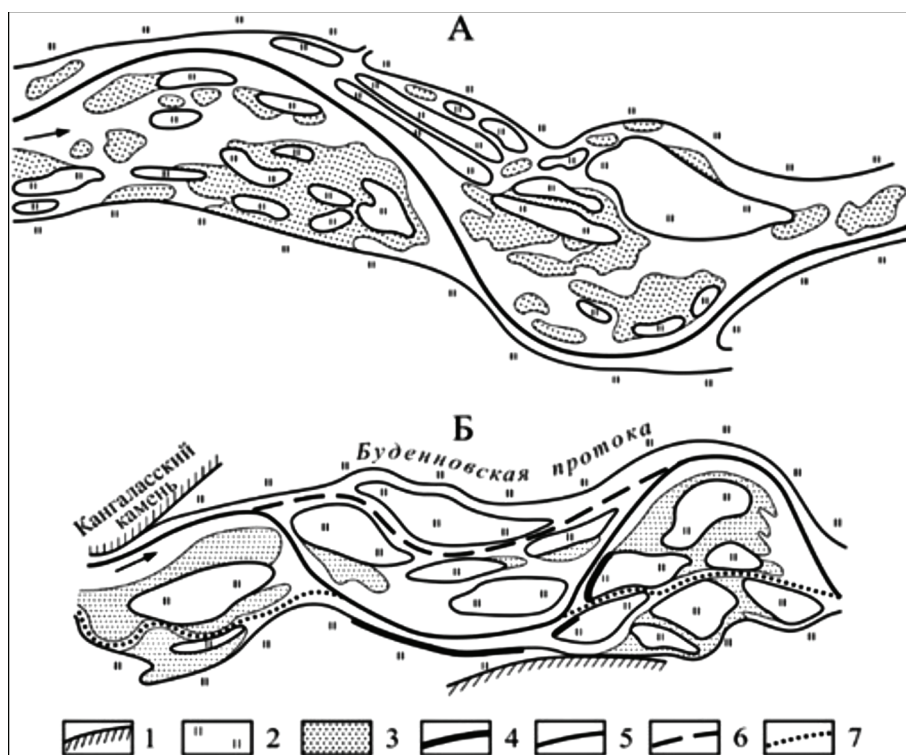


Рис. 2. Чередующиеся односторонние разветвления на верхней Оби (ниже п. Быстрый Исток) (А) и их трансформация в параллельно-рукавное (средняя Лена) (Б):

1 – коренные берега; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – фронт размыва берегов; положения главного течения: 5 – в чередующихся односторонних разветвлениях; 6 – во втором рукаве при трансформации их в параллельно-рукавное (текущее); 7 – перспективное

Fig. 2. Alternating branches on the Upper Ob (below Bystryy Istok) (A) and their transformation into parallel-branch channel (Middle Lena) (B):

1 – bedrock banks; 2 – floodplain; 3 – sandbanks; 4 – coast erosion front; positions of the main stream: 5 – in alternating branches; 6 – in the second branch after their transformation into a parallel branch (nowadays); 7 – future

Спрямление излучин основного рукава в чередующихся многорукавных разветвлениях происходит редко из-за преимущественно продольного смещения излучины основного рукава и всей груп-

пы островов, образующих разветвление; при этом развитие получает рукав вдоль или вблизи береговой поймы в основании островного сегмента. На судоходных реках такому спрямлению способству-

ет разработка капитальной прорези в этом обычно наиболее водном рукаве. Нередко чередующиеся односторонние разветвления следуют сразу за параллельно-рукавными, поскольку в условиях повышения стока рек описанное выше спрямление сопровождается трансформацией чередующихся разветвлений в параллельно-рукавное. Таково, например, развитие левого рукава Буденновской протоки на средней Лене ниже Кангаласского камня (см. рис. 2, Б) и ожидаемое спрямление в смежных, расположенных выше и ниже прибрежных разветвлениях. На верхней Оби (широтный участок ниже слияния Бии и Катунь) подобная трансформация чередующихся односторонних многорукавных разветвлений произошла благодаря последовательному трансгрессивному (вниз по течению) распространению выносов наносов из сливающихся рек (главным образом, из Катунь), происходящему на фоне некоторого снижения водности и медленного направленного врезания реки. Этот процесс продолжался на протяжении всей второй половины XX в., и к настоящему времени этот тип прибрежных разветвлений сохранился только на участке ближе к устью р. Чарыш [Русловые процессы..., 1996]. Показатели устойчивости русла (числа Лохтина и коэффициента стабильности Н.И. Маккавеева) уменьшились при смене типа русла в среднем на 25–30%. Аналогично на средней Лене в районе г. Якутска участок параллельно-рукавных разветвлений сменяется чередующимися односторонними, расположенными от п. Жатай до мыса Кангаласский Камень.

Более распространены на больших реках с меандрирующим руслом одиночные разветвления, образованные элементарными и малыми, реже средними островами, иногда двумя-тремя такими островами, составляя, как правило, формы второго или третьего порядков, которые достигают нескольких км в длину. В основном средние, очень редко большие острова встречаются между смежными большими излучинами на относительно протяженных прямолинейных участках – вставках между ними (рис. 3). По своей морфологии, распределению расходов воды и многолетним переформированиям такие разветвления аналогичны одиночным, но с преобладающим влиянием на них деформаций, происходящих на верхней (считая по течению реки) излучине, эволюция которой во времени (продольное и поперечное смещение) определяет периодическое развитие левого или правого рукавов. Положение главного течения реки на каждом этапе в том или ином рукаве сказывается на развитии нижней излучины. Водность обоих рукавов при этом варьирует в пределах 1:2 и 2:1 в зависимости от происходящих переформирований. Так, например, на нижнем Иртыше средние скоро-

сти размыва берегов в верхней излучине составляют около 1 м/год (максимальные – 1,9 м/год); в рукавах одиночного разветвления в среднем от 1 до 1,4 м/год (максимум – 2,3 м/год); а на нижней излучине – 1,5 и 2,1 м/год соответственно.

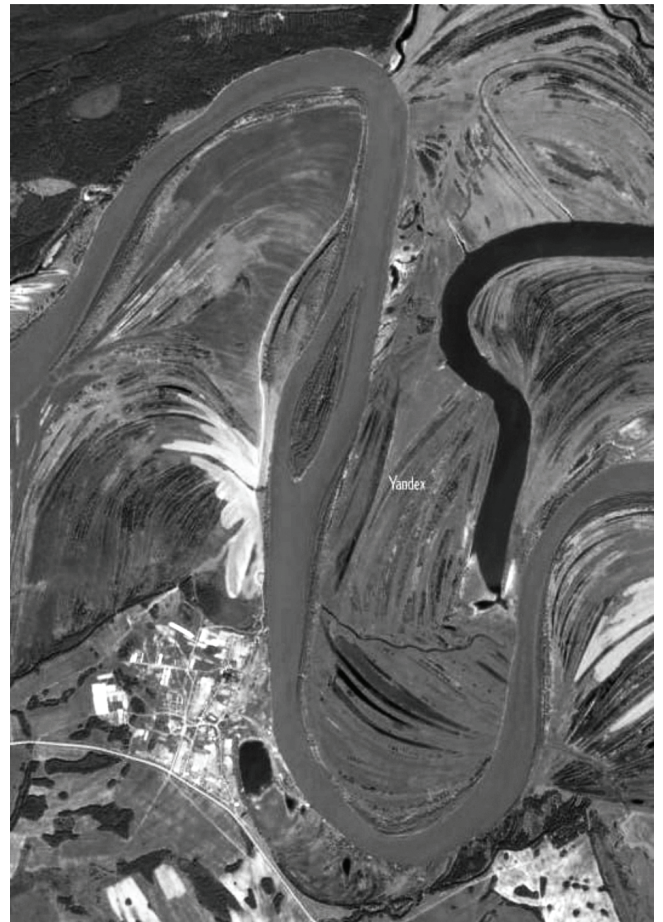


Рис. 3. Одиночное разветвление между смежными большими излучинами (р. Иртыш)

Fig. 3. Single branching between adjacent large meanders (the Irtysh River)

Образование больших излучин связано с остаточной поперечной циркуляцией [Розовский, 1957; Маккавеев, 1955], благодаря которой удлиняется область сопряжения излучин, и на переходе от одной к другой формируется прямолинейный участок (собственно это вытекает и из второго закона Фарга [Fargue, 1908]: плесовая ложина и самая мелкая часть переката сдвинуты по отношению к створам с наибольшей и наименьшей кривизной, соответственно, вниз по течению приблизительно на $\frac{1}{4}$ длины системы плес – перекат). При этом удлиненные крылья таких больших излучин превращаются в прямолинейные вставки между излучинами, ориентированными по диагонали к оси днища долины, пересекая пойму. Вследствие этого во время половодья течения в

русле и на затопленной пойме не совпадают по направлениям, происходит слив воды с поймы со стороны верхней излучины и перелив воды на пойменный сегмент нижней излучины (рис. 4). Это, в свою очередь, обуславливает активизацию размыва берегов, чему способствуют возникновение возле них вихрей с горизонтальной осью [Ле-

явский, 1893; Маккавеев, 1955], переносящих размывый материал к центральной части русла. В результате образуется (см. рис. 4) местное расширение русла, в котором формируется осередок, со временем (при зарастании) превращающийся в остров. Величина критерия И.Ф. Карасева возрастает на подобных участках в 1,3–2,0 раза.

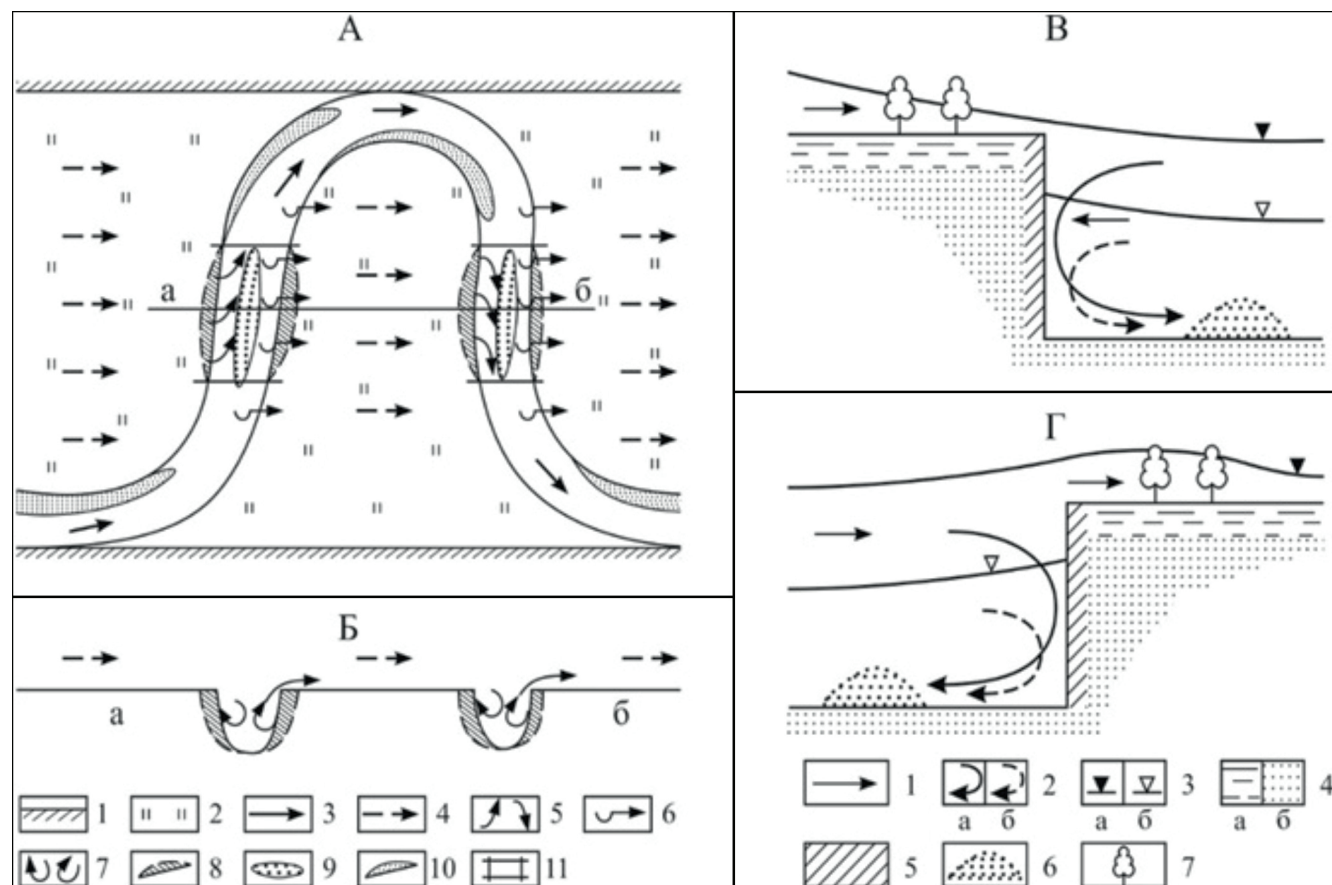


Рис. 4. Формирование одиночных разветвлений между смежными большими излучинами:

А – план русла; Б – профиль по оси днища долины (1 – борта днища долины; 2 – пойма; 3 – направление течения руслового потока; 4 – течения на затопленной пойме; 5 – слив воды с поймы в русло; 6 – перелив воды из русла в пойму; 7 – вихревые течения в русле при пересечении руслового и пойменного потоков; 8 – размывы берегов при пересечении руслового и пойменного потоков; 9 – осередки в местных расширениях русла; 10 – прирусловые отмели у берегов излучин; 11 – прямолинейные вставки между излучинами); В, Г – течения, возникающие возле пойменных подмываемых берегов между смежными излучинами, связанные с ними их размыв и образование осередка при сливе воды с поймы (В) и при переливе воды из русла на пойму (Г) (1 – течения, набегающие на берег; 2 – вихрь с горизонтальной осью при сливе воды с поймы в русло и переливе воды из русла (а) и в межень (б); 3 – уровни водной поверхности при затопленной пойме (а) и в межень (б); 4 – аллювиальные отложения – пойменный наилок (а), русловая фация (б); 5 – размываемый берег; 6 – аккумуляция размывого материала; 7 – растительность на пойме)

Fig. 4. Formation of single branching between adjacent large meanders:

A – plan of the channel; Б – profile along the axis of the valley bottom (1 – sides of the valley bottom; 2 – floodplain; 3 – direction of the channel flow; 4 – currents on the flooded floodplain; 5 – drain water from the floodplain to the channel; 6 – overflow of water from the channel to the floodplain; 7 – turbulent streams in the channel at the intersection of channel and floodplain flows; 8 – bank erosion at the intersection of channel and floodplain flows; 9 – sandbanks in local channel widenings; 10 – sandbanks near the banks of meanders; 11 – straight channel between the meanders); В, Г – currents that occur near the floodplain eroded banks between adjacent meanders, their erosion and formation of a sandbank when water is drained from the floodplain (B) and when water is overflowed from the channel on the floodplain (Г) (1 – currents running ashore; 2 – a vortex with a horizontal axis when water is drained from the floodplain into the channel and water overflows from the channel (a) and during the low water (б); 3 – water surface levels with a flooded floodplain (a) and during the low water (б); 4 – alluvial deposits – floodplain silt (a), channel facies (б); 5 – eroded coast; 6 – accumulation of eroded material; 7 – vegetation on the floodplain)

Сходные условия возникают на сундучных излучинах, которые представляют собой комбинацию из двух излучин, вершины которых располагаются возле одного и того же берега, и прямолинейной вставки между ними. Чаще всего такие излучины формируются возле коренных берегов (в этом случае верхняя излучина – вынужденная, нижняя – адаптированная [Маккавеев, 1971], нижнее крыло верхней и верхнее крыло нижней располагаются вдоль коренного берега и, объединяясь, создают прямолинейную вставку), но иногда встречаются

среди поймы, если роль ведущего берега между вершинами играет уступ высокой, редко затопляемой поймы. Здесь также возникает местное расширение русла благодаря направляющему воздействию на поток неровности ведущего берега в нижнем крыле верхней излучины (рис. 5). В данном случае на средней Оби средние скорости размыва берегов для верхнего и нижнего крыльев сундучной излучины составляют более 3 м/год, а максимальные – до 6,5 м/год, тогда как в районе местного расширения они достигают 2,4 и 4,1 м/год соответственно.



Рис. 5. Сундучная излучина в левом судоходном рукаве Канеровского разветвления средней Оби (ниже г. Колпашево) с островом в местном расширении русла

Fig. 5. Chest-meander in the left navigable branch of the Kanerovskoe branching of the Middle Ob (below the Kolpashevo town) with an island in a local widening of the channel

Если образование разветвления на прямолинейной вставке не происходит, большие излучины трансформируются в петлеобразные благодаря развитию вторичных излучин на их крыльях, на которых берега отступают со скоростью в среднем более 2 м/год при максимуме почти 4 м/год. Однако иногда одно из крыльев излучин сохраняет относительно прямолинейные очертания, и тогда в его пределах формируется одиночное разветвление с одновременным расширением русла за счет размыва берегов со средней скоростью до 2 м/год, максимальной – до 3 м/год.

В пределах самих излучин острова формируются в их привершинных частях, на верхнем или ниж-

нем крыльях. В большинстве случаев они также приурочены к местным расширениям русла (иногда в 2–3 раза по сравнению с участками тех же излучин выше и ниже по течению, значение критерия И.Ф. Карасева при этом увеличивается до 2 раз) (рис. 6). Расширение русла обуславливает разделение потока на несколько ветвей течения, что приводит к образованию островов в зонах замедления течения между ними. Форма, размеры и структура островов, а также распределение расходов воды по рукавам разветвлений – средних, малых и элементарных – зависит от степени развитости (крутизны) излучин l/L , их типа – свободная, вынужденная или вписанная, а также генезиса самих островов. Зача-

стую на больших реках такие острова имеют вытянутую, несколько изогнутую форму в соответствии со своим расположением и имеют длину L_0 от 1 до 4 км, а максимальную ширину B_0 – 0,5–1 км. Скорости размыва берегов на таких излучинах варьируют в широких пределах: средние – от 1 до 4,4 м/год, максимальные – 1,4–6,3 м/год.

На крыльях и в привершинных частях излучин преобладают острова, образовавшиеся при зарастании осередков – начальной формы развития островов. Они могут быть элементарными, малыми или средними, состоящими из нескольких объединившихся элементарных и малых, являются следствием эволюции как самих островов, так и излучины, в пределах которой они формируются. При этом основной расход воды обычно проходит в рукаве вдоль вогнутого берега излучины, составляя от 70 до 90% стока реки. При достижении излучиной в ходе ее развития стадии крутой, большая часть рас-

хода воды перемещается в рукав у выпуклого берега. В привершинных частях крутых излучин, у которых $l/L > 1,7$, острова могут иметь эрозионное происхождение, являясь следствием частичного спрямления излучин (рис. 7) – отторжения крайней выпуклой части шпоры при размыве потоком половодья, затопившего пойму, одной из ложбин грядистого рельефа поймы. В приведенном примере образование спрямляющего рукава в вершине Мануйловской излучины р. Иртыша произошло при $l/L = 1,98$; однако из-за сопряжения с выше находящейся излучиной и отходом от верхнего крыла излучины почти под прямым углом этот рукав дальнейшего развития не получил: несмотря на сопоставимую с основным рукавом ширину, его водность в половодье – около 8–9%, в межень он обсыхает, будучи перекрыт на заходе массивным побочнем. В основном русле наблюдаются интенсивные отступления берегов (максимальные – до 15 м/год).

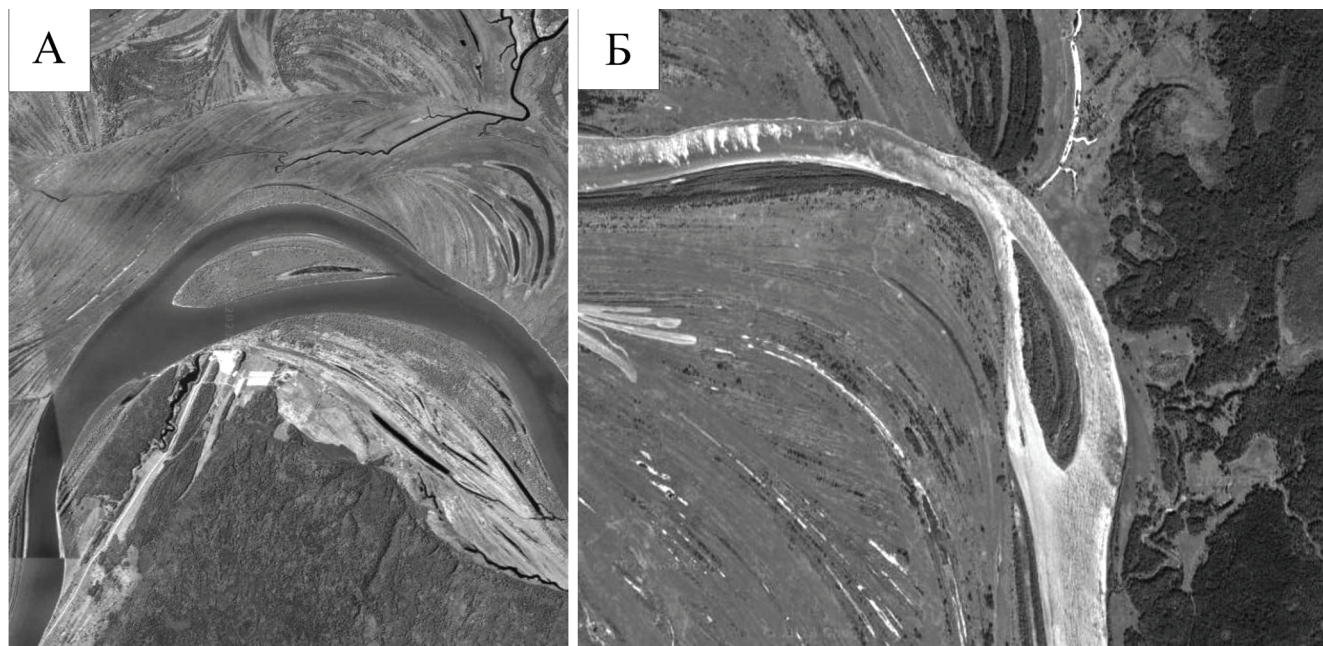


Рис. 6. Разветвления в местных расширениях русла на излучинах р. Иртыш:
А – в привершинной части; Б – в верхнем крыле

Fig. 6. Branches in the local widened channels on the meanders of the Irtys River:
А – in their top part; Б – in their upper wing

На крутых излучинах, на которых произошло нарушение условия безотрывного обтекания потоком берегов (правило Миловича – $r < 3b_p$), в привершинной части русло расширяется в 2–3 раза, стрежень потока перемещается к выпуклому берегу, размывая его со средней скоростью на нижней Оби 1–2 м/год (максимум – более 3 м/год), на нижнем Иртыше – до 9 и 13 м/год, соответственно, а у вогнутого возникает водоворотная зона. В таких условиях в вершине

излучины формируется осередковое разветвление, причем осередок имеет овальную форму. Со временем он зарастает, превращаясь в элементарный остров, сохраняющий такую же форму. Протока вдоль вогнутого берега мелеет, превращается во второстепенную (водность – первые проценты), а сам остров заполняет выбоину.

Формирование островов на верхних крыльях излучин является следствием подпора потока

от изгиба русла, в зоне влияния которого поток «блуждает», русло расширяется, аккумулируются наносы и формируются осередки, со временем также превращающиеся в острова. Наиболее ярко это проявляется на вписанных и вынужденных излучинах, где вогнутый берег в привершинной части является коренным или представлен высокой, редко затопляемой поймой, и вдоль него располагается нижнее крыло излучины (рис. 8). Параметры таких островов сопоставимы с шириной русла, а из-за направленной аккумуляции нано-

сов происходит их объединение и укрупнение, со временем они могут достигать стадии большого острова.

На больших реках острова формируются иногда в нижних крыльях излучин, если здесь интенсивный размыв вогнутого берега приводит к образованию местного расширения русла. Межостровные протоки и рукава, отделяющие острова от шпоры излучины, обычно маловодны, так как располагаются ниже вершины излучины, направляющей поток к вогнутому берегу.



Рис. 7. Разветвление в привершинной части крутой излучины, образовавшееся вследствие частичного отторжения ее шпоры (Мануйловский поворот на р. Иртыш)

Fig. 7. Branching in the near-top part of a steep meander, formed as a result of partial rejection of its spur (Manuilovsky turn on the Irtysh River)

Формирование расширения русла в нижнем крыле излучины и разветвления в нем связаны также с трансформацией сегментной излучины в заваленную и приобретением ею асимметричной формы, т. е. со смещением вершины излучины вниз по течению по отношению к ее геометрической оси. Распределение расходов воды в таких разветвлениях зависит от направляющего воздействия на поток берегов на смежных вышележащих участках русла и изменяется в широких пределах.

В разветвлениях в привершинных частях вписанных излучин наибольшую водность обычно сохраняет рукав, проходящий вдоль коренного вогнутого

берега; тенденция к обмелению характерна для рукава у выпуклого берега, так как заход в него находится за плечом пойменного берега в верхнем крыле излучины. Имеет значение также и расширение его в области аккумуляции наносов во время половодья.

Формирование разветвлений возможно также и в рукавах прорванных излучин, особенно если они играют наносотсасывающую роль (для влекомых наносов) при большом угле их ответвления. Такие острова составляют формы русла второго и чаще третьего порядка, а их размеры невелики и зависят от ширины и водности спрямляющего второстепенного рукава.

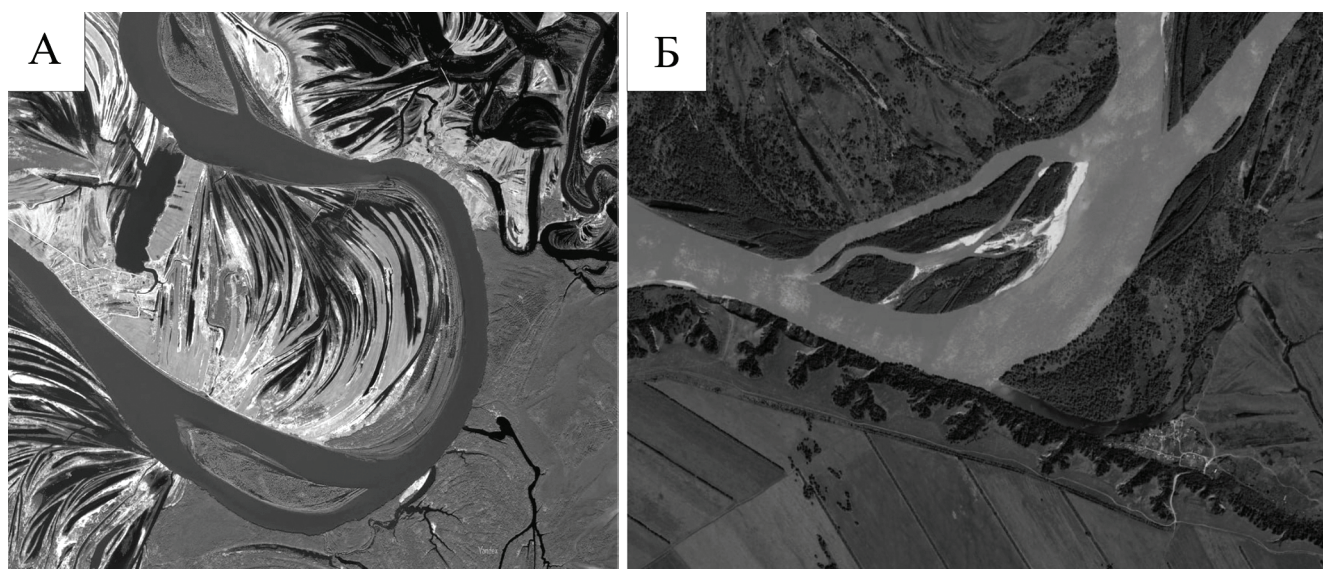


Рис. 8. Разветвления:

А – в расширении на верхнем крыле вписанной излучины (р. Иртыш); Б – в привершинной части вынужденной излучины (верхняя Обь ниже устья р. Чумыша)

Fig. 8. Branches:

А – in the extension on the upper wing of the inscribed meander (the Irtysh River); Б – in the near-top part of the forced meander (Upper Ob below the mouth of the Chumysh River)

ВЫВОДЫ

Разветвленно-извилистые русла и чередующиеся односторонние разветвления характеризуются формированием островов, огибая которые, основные по водности рукава образуют сегментные излучины. В одних случаях острова частично объединяются и, причленяясь к берегам, создают шпоры излучин, и только привершинные части последних остаются представленными островами, разделенными межостровными протоками. В других случаях на реках больших размеров односторонние чередующиеся разветвления составляют островные пойменные сегменты, и в бровках береговой поймы русло сохраняет квазипрямолинейные очертания. В результате разветвленно-извилистое русло в своем развитии отражает эволюцию излучины, тогда как излучина основного рукава в односторонних чередующихся разветвлениях – развитие русловых разветвлений. Обе разновидности разветвлений свойственны большим рекам, для которых характерно разделение потока на ветви течения. Происходящее при этом рассредоточение стока по рукавам между островами обуславливает изменение морфологических параметров основного рукава, образующего излучину, в соответствии с его водностью и, как следствие, формирование в нем перекатов из-за снижения транспортирующей способности потока.

Образование разветвлений на излучинах русла

также характерно для больших меандрирующих рек. Острова возникают в привершинных частях излучин, если здесь в процессе русловых деформаций происходит расширение русла или при его искривлении (крутые излучины) нарушаются условия безотрывного обтекания берегов, а динамическая ось потока смещается к вогнутому берегу, вызывая его размыв. На крутых излучинах может также происходить отчленение привершинной части шпоры с образованием спрямляющей протоки, но ее дальнейшее развитие зависит от угла ответвления от основного русла.

Разветвление возникает также на прямолинейных вставках между смежными большими излучинами, располагающимися по диагонали (или поперек) поймы; вследствие взаимодействия руслового и пойменного (во время половодья) потоков в водоворотных зонах возникает местное расширение русла, и в нем формируется осередок, со временем превращающийся в остров. В верхних крыльях излучин, особенно вынужденных, разветвления связаны с подпором потока, возникающим при встрече потока с коренным берегом или из-за крутого поворота русла в вершине излучины.

Условия формирования разветвлений на излучинах или в основных рукавах разветвленно-извилистых русел определяют состав регуляционных мероприятий при водохозяйственном и транспортном освоении больших рек.

Благодарности. Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и НИЛ эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-17-00065).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Острова верхней Оби: морфометрическая характеристика, эволюция и динамика // Геоморфология. 2019. № 1. С. 81–92.
- Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
- Камышев А.А. Гидроморфология и переформирования широкопойменных русел больших равнинных рек (на примере Оби и Лены): автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М., 2022. 27 с.
- Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
- Кондратьев Н.Е. Русловые деформации в меандрирующих руслах // Труды ГГИ. 1954. Вып. 44(98). С. 5–13.
- Лебявский Н.С. О речных течениях и формировании речного русла: сб. науч. тр. 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб., 1893 // Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 108–136.
- Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 116 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
- Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.
- Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 188 с.
- Русловые процессы на реках Алтайского региона. М.: Изд-во МГУ, 1996. 244 с.
- Чалов Р.С. Извилистость или разветвленность потоков и формирование меандрирующих и разветвленных на рукава речных русел // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 3. С. 3–12.
- Чалов Р.С. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел // Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. Т. 1. 608 с.
- Чернов А.В. География и геоэкологическое состояние речных русел и пойм рек Северной Евразии. М.: Крона, 2009. 684 с.
- Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во МГУ, 1983. 198 с.
- Fargue L. La forme du lit des a fond mobile, Paris, Gauthier – Villars, 1908, 187 p.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Rosgen D.L. A classification of natural rivers, *Catena*, 1994, vol. 22, p. 169–199.
- Schumm S.A. The fluvial system, New York, Wiley, 1977, 338 p.

Поступила в редакцию 10.05.2023

После доработки 15.07.2023

Принята к публикации 27.07.2023

FORMATION OF BRANCHES AT RIVER MEANDERS

R.S. Chalov¹, A.A. Kamyshev², A.A. Kurakova³, G.B. Golubtsov⁴^{1–4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography^{2–4} Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes¹ Department of Land Hydrology, professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rachalov@mail.ru² Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: arsenii.kamyshev@yandex.ru³ Leading Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru⁴ Engineer, Ph.D. in Geography; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

When studying channel morphodynamics, the processes and forms of meandering and branching are considered independently. However, the development of meanders on large rivers is complicated by the formation of islands on their limbs and in the near-top parts. The most striking manifestation of the process is the branched-winding channels, which develop as a result of the successive formation of islands, creating spurs of meanders if attached to the coastal floodplain. The relief of the floodplains of such rivers is hollow-island in contrast to the ridged relief of typical meandering rivers. Another form of such channels of large rivers is alternating unilateral ramifications, in which the meanders of the main (high-water) branch go around the groups of islands located in a checkerboard pattern, and the channel itself in the floodplain banks remains quasi-rectilinear while in a branched-winding channel it forms segmental meanders. The presence of branches at a meander of the channel disperses the runoff, and decreases the amount of water in the main branch, thus affecting the parameters of the meanders.

Islands are also formed in the near-top parts of meanders, where its dynamic axis shifts towards the convex coast due to the violation of continuous flow around the banks, and erodes it. In the resulting local widening of the channel, a middle center appears and, when it is overgrown, an island is formed. A local widening of the channel is formed on rectilinear «inserts» between adjacent large meanders when the floodplain and channel flows intersect during the flood, and a middle or island is also formed in it. On the upper wings of steep bends,

especially forced meanders, the formation of branches is associated with the flow backwater that occurs when it approaches the bedrock bank at the top of the meander at a high angle.

The formation of branchings at the meanders of a channel should be taken into account during river development as a factor that can influence the conditions of navigation and influence the channel reshaping, which is particularly important at the places where linear structures, such as bridges and pipelines, cross the rivers.

Keywords: branched-winding channel, alternating branching, islands, sandbanks, dispersal of runoff, local widened channel

Acknowledgements. The paper is prepared according to the scientific research plans of the Department of Land Hydrology and the Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Lomonosov Moscow State University and financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-17-00065).

REFERENCES

- Chalov R.S. Izviliystost' ili razvetvlennost' potokov i formirovanie meandriruyushchikh i razvetvlennykh na rukava rechnykh rusel [Meandering or branching of streams and the formation of meandering or branching river channels], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no 3, p. 3–12. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, vyp. 1, Ruslovyte protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 1, Channel processes: factors, mechanisms, forms and conditions of channel formation], Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)
- Chernov A.V. *Geografiya i geoekologicheskoe sostoyanie rechnykh rusel i poim rek Severnoi Evrazii* [Geography and geoecological standing of the channels and floodplains of the rivers of northern Eurasia], Moscow, Krona Publ., 2009, 684 p. (In Russian)
- Chernov A.V. *Geomorfologiya poim ravninnykh rek* [Geomorphology of lowland river floodplains], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1983, 198 p. (In Russian)
- Fargue L. La forme du lit des a fond mobile. Paris, Gauthier – Villars, 1908, 187 p.
- Golubtsov G.B., Chalov R.S. *Ostrova verhnjej Obi: morfometricheskaya kharakteristika, evolyuciya i dinamika* [Islands of the Upper River Ob: morphometric characteristic, evolution and dynamics], *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2019, no. 1, p. 81–92. (In Russian)
- Grishanin K.V. *Teoriya ruslovogo protsessa* [Channel process theory], Moscow, Transport Publ., 1972, 216 p. (In Russian)
- Kamyshev A.A. *Gidromorfologiya i pereformirovaniya shirokopoimennykh rusel bol'shikh ravninnykh rek (na primere Obi i Leny)* [Hydromorphology and reformation of wide-floodplain channels of large plain rivers (case study of Ob and Lena Rivers)], Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, 2022, 27 p. (In Russian)
- Karasev I.F. *Ruslovyte protsessy pri perebroske stoka* [Channel processes during river flow transfer], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
- Kondrat'ev N.E. *Ruslovyte deformatsii v meandriruyushchikh ruslakh* [Channel deformations in meandering channels], *Trudy GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1954, vol. 44(98), p. 5–13. (In Russian)
- Lelyavskii N.S. [About river flows and riverbed formation Proceedings of 2nd meeting of hydrotecnic engineers, St. Petersburg, 1893], *Voprosy gidrotekhniki svobodnykh rek* [Hydrotechnical problems of open rivers], Moscow, Rechizdat Publ., 1948, p. 108–136. (In Russian)
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River channel and erosion in its basin], Moscow, AS USSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I. *Stok i ruslovyte protsessy* [Runoff and channel processes], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1971, 116 p. (In Russian)
- Popov I.V. *Deformatsii rechnykh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Riverbed deformations and hydrotechnical construction], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 328 p. (In Russian)
- Rosgen D.L. A classification of natural rivers, *Catena*, 1994, vol. 22, p. 169–199.
- Rozovskii I.L. *Dvizhenie vody na povorote otkrytogo rusla* [Movement of water at a bend of an open channel], Kiev, AS USSR Publ., 1957, 188 p. (In Russian)
- Ruslovyte protsessy na rekakh Altaiskogo regiona* [Channel processes on the rivers of the Altai region], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1996, 244 p. (In Russian)
- Rzhanitsyn N.A. *Rusloformiruyushchie protsessy rek* [Processes of riverbed formation], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 264 p. (In Russian)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, New York, Wiley, 1977, 338 p.

Received 10.05.2023

Revised 15.07.2023

Accepted 27.07.2023