

ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 551.482.212; 556.5

Р.С. Чалов^{1,2}**ИЗВИЛИСТОСТЬ ИЛИ РАЗВЕТВЛЕННОСТЬ ПОТОКОВ И ФОРМИРОВАНИЕ МЕАНДРИРУЮЩИХ И РАЗВЕТВЛЕННЫХ НА РУКАВА РЕЧНЫХ РУСЕЛ**

Показано, что неустойчивость прямолинейного движения речных потоков, обуславливая их извилистость (меандрирование) или разделение на ветви течения, находит отражение в развитии русел любого морфодинамического типа. В прямолинейном неразветвленном русле она проявляется в извилинах динамической оси потока, огибающей побочни – обсыхающие в межень повышенные части макроформ руслового рельефа, или в осередковой разветвленности, в которой каждая ветвь потока, в свою очередь, образует извилины. В разветвленных руслах извилистость динамической оси потока вследствие возникающего в них распределения скоростей течения, циркуляционных течений и подходов к берегам под определенным углом обуславливает их размыв и аккумуляцию наносов возле острова. В результате в одиночных разветвлениях рукава представляют собой пологие излучины, в сопряженных разветвлениях возникает извилистость главного течения реки возле следующих друг за другом островов, меандрируют рукава пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел. Таким образом, меандрирование является универсальным процессом формирования русел разных типов. В разветвлениях русла оно осуществляется на фоне рассредоточения стока по рукавам, оказывающего определяющее воздействие на параметры излучин, темпы и направленность их деформации. Меандрирующие (извилистые) русла больших рек и излучин рукавов раздвоенных русел, в свою очередь, осложняются островами на их крыльях и в привершинных частях. Однако разделение потока на ветви течения не свойственно малым и средним рекам. Выявленные закономерности должны учитываться при обосновании методов управления русловыми процессами при решении практических задач.

Ключевые слова: русловые процессы, речной поток, морфодинамические типы русел, излучины, острова, осередки, извилины динамической оси потока

Введение. При всем многообразии форм проявления русловых процессов, встречающихся в природе, в соответствии с законом ограниченности естественных русловых морфологических комплексов Великанова-Маккавеева обычно выделяют три основных морфодинамических типа русла: относительно прямолинейные, неразветвленные; меандрирующие, извилистые; разветвленные на рукава. При этом прямолинейное движение водного потока неустойчиво. Оно либо приобретает извилистые очертания вследствие влияния на него берегов и реакции дна русла [Leopold, Wolman, 1960; Leopold et al., 1964; Goryski, 1973; Замышляев, 1982; Гришанин, Замышляев, 1985], либо при большом соотношении между шириной b и глубиной h потока [Лосиевский, 1934; Карасев, 1975] разделяется на две и более ветви течения, причем каждая из них, в свою очередь, извивается (меандрирует) или вновь ветвится и т. д. Условия, обеспечивающие закрепление извилистости или разветвленности потока в формах русла (излучинах или островах с огибающими их рукавами) при одновременном, согласно другому закону Великанова-Маккавеева – взаимной обусловленности потока и русла, возникновении присущей им структу-

ры потока и циркуляционных течений, достаточно полно освещены в литературе [Маккавеев, 1955; Маккавеев, Чалов, 1986; Чалов, 2011, 2016; Чалов и др., 2004]. Также определены условия сохранения прямолинейности русла, в котором лишь образуются извилины динамической оси, огибающие побочни, расположенные в шахматном порядке у противоположных берегов, или осередки, создающие разветвления меженного потока [Чалов, 1979, 2011]. Однако на этом структурном уровне русловые процессы, как правило, рассматриваются с точки зрения режима связанных с отменями перекатов. Развитие же извилины динамической оси потока или ее деление на ветви в прямолинейном, неразветвленном русле остается вне внимания исследований. Хотя еще Н.И. Маккавеев [1949, 1955] получил зависимость радиусов кривизны r от руслоформирующего расхода воды Q_ϕ и уклона I именно для извилины динамической оси потока $r = f(Q_\phi/I)$, а не для излучин русла, как это обычно принято считать.

В разветвленном на рукава русле ветви потока, огибающие острова, образуют изгибы, и потому каждый рукав приобретает форму излучины. Меандрируют протяженные по длине рукава, отделенные друг

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: rschalov@mail.ru

² Научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, гл. науч. с.

от друга большими островами и островными массивами, пойменные протоки, расчленяющие широкую пойму, рукава развоенных русел (Малая и Горная – Большой Оби, Ахтуба на Волге и др.). С другой стороны, меандрирующие русла часто осложняются островами в привершинных частях и на крыльях излучин, в том числе в рукавах разветвлений, создающими разветвления второго или третьего порядков [Чалов, 1983, 2008]. Выделяют разветвленно-извилистые русла [Чалов и др., 2004], в которых шпоры излучин представлены группами островов, между которыми функционируют рукава, спрямляющие излучины русла. На меандрирующих реках (Ока, Вычегда, средняя Обь) нередко встречаются пойменно-русловые разветвления, рукава которых представлены сериями из двух–пяти излучин, характеризующихся параметрами, соответствующими водности рукавов.

В результате возникают сложные соотношения между двумя процессами – извилистостью или разветвленностью речных потоков, с одной стороны, и меандрированием или формированием русловых островных разветвлений – с другой.

Задача настоящей статьи – систематизировать имеющиеся сведения об одновременном проявлении на реках процессов меандрирования и разветвления потоков и самих русел, определив роль каждого из них в формировании, соответственно, русловых разветвлений или излучин русла с учетом

происходящей при этом трансформации структуры потока, рассредоточении стока, направленности смещения излучин и разветвлений и т. д.

Методы и исходные материалы. В основу статьи положены материалы многолетних исследований русловых процессов на реках России, бывших республик СССР, а также Китая, от крупнейших (Лена, Обь, Енисей, Амур, Янцзы), разветвленных на рукава, меандрирующих или с относительно прямолинейным руслом, до малых, преимущественно меандрирующих. В ходе этих исследований производились съемки и промеры русел, измерения расходов воды в рукавах и протоках, скоростных полей потока на характерных участках русел рек. Широко использовались для ретроспективного руслового анализа и выявления особенностей и темпов переформирования русел топографические и лоцманские карты (карты русел) судоходных рек, на которых отражено их состояние за разные временные срезы, космические и аэроснимки. Оценка характеристик форм русла осуществлялась по принятой системе параметризации русловых процессов [Чалов, 2017]. Морфодинамические типы русел выделялись в соответствии с классификацией МГУ [Чалов, 2008].

Результаты и их обсуждение. В наиболее простой (элементарной) форме меандрирование потока или его разделение на ветви течения проявляется в прямолинейном неразветвленном русле. В русле этого типа в межень поток, огибая следующие друг за другом в шахматном порядке побочни, образует извилины динамической оси потока (термин, предложенный Н.И. Маккавеевым [1955]) и под тем или иным углом подходит последовательно к противоположным берегам, вызывая их размыв (рис. 1А). Во время половодья (или высокого паводка) динамическая ось потока выпрямляется, побочни и осередки как части крупных грядовых форм руслового рельефа смещаются по длине реки. Поэтому в каждую последующую межень положение побочни, осередков и мест подхода потока к размываемому берегу оказывается иным. На спаде половодья (паводка) и в межень на изгибах потока возле побочни возникают свойственные излучинам распределение скоростей и циркуляционные течения, оказывающие влияние на режим транспорта донных наносов, изменение глубины и в целом на режим переформирования связанных с побочнями перекатов. Однако в форме русла эти процессы практически не отражаются, сказываясь лишь на динамике (размыва/намыва) берегов.

При определенных условиях размыв берега и сопровождающее его увеличение размеров побочни приводят к местному расширению русла, стабилизации побочни и нарушению оптимального соотношения между параметрами изгиба потока. В этом случае, подобно излучинам русла, утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы стрежня потока (соотношения $l/L > 1,6$, где l – длина оси потока, огибающей побочень; L – шаг побочни; на излучинах русла: l – длина излучины, L – ее шаг)

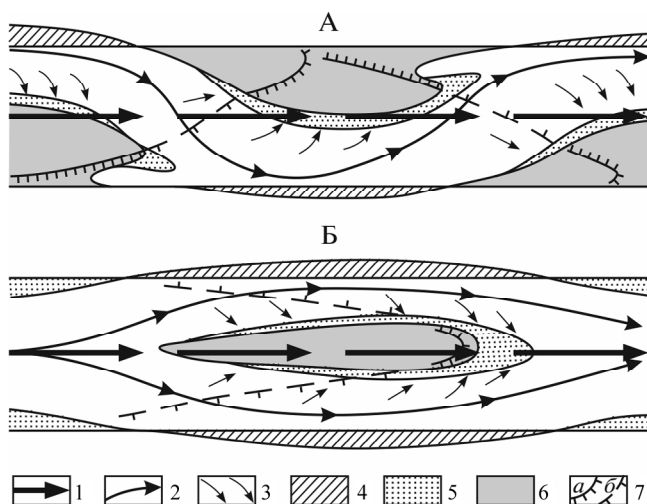


Рис. 1. Положения динамической оси потока в половодье (1) и межень (2), направления циркуляционных течений (3), зоны размыва (4) и аккумуляции наносов (5) на спаде половодья и в межень в прямолинейном неразветвленном русле при развитии в нем побочни (А) и осередков (Б). Прочие обозначения: 6 – прирусловые отмели (побочни, осередки); 7 – подвалья крупных гряд (а – на побочнях и осередках; б – в межennom русле)

Fig. 1. Position of the dynamic axis of the flow in the flood (1) and low water (2) periods, direction of the circulation currents (3), zones of channel erosion (4) and sediment accumulation (5) at flood recession and in low water period in a straight unbraided channel with the development of side bars (A) and mid-channel bars (B). Other designations: 6 – sand bars (side bars, mid-channel bars); 7 – pools of large riffles (a – on channel bars, b – in low-water channel)

[Маккавеев, 1955; Проектирование..., 1964; Чалов, 1979, 2011; Чалов и др., 2004] и происходит отторжение побочня от берега (аналогия со спрямлением развитой или крутой сегментной излучины). Если это не происходит, можно ожидать, что со временем прямолинейный участок русла трансформируется в излучину.

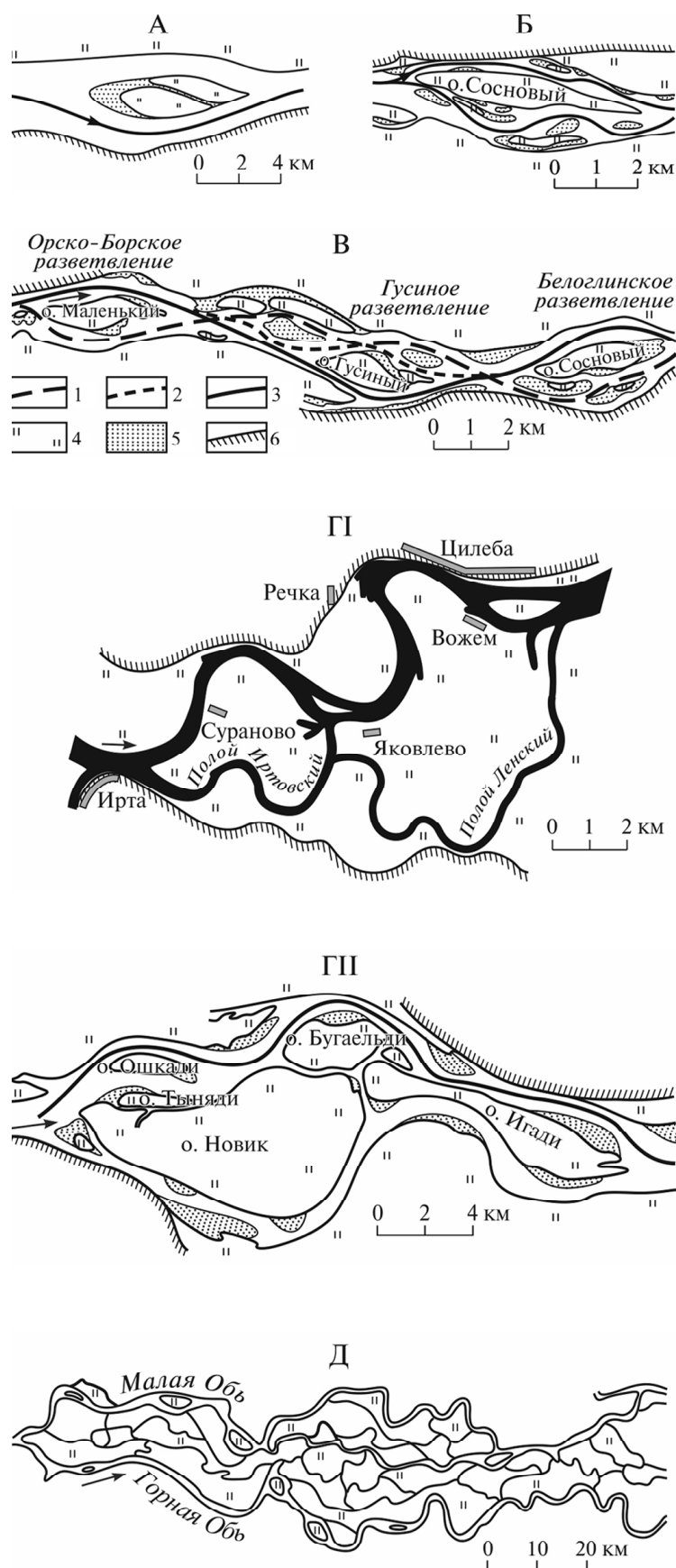
При формировании в прямолинейном неразветвленном русле осередка на спаде половодья (паводка) и в межень поток рассредотачивается по протокам возле него, возникает скоростное поле потока, соответствующее его разветвлению на ветви течения с их изгибами при обтекании осередка (см. рис. 1Б). Вследствие размывов противоположных осередку берегов, накопления возле него наносов и увеличения размеров происходит общее расширение русла, способствующее местным условиям аккумуляции наносов, дальнейшему росту осередка и созданию условий для его превращения в остров (трансформации осередкового разветвления в островное).

Таким образом, в прямолинейном неразветвленном русле меандрирование и разделение потока на ветви течения осуществляются на уровне развития макроформ грядового рельефа – побочней, осередков, перекастов, сказываясь в частичном изменении морфометрических характеристик русла и, как следствие, на русловых деформациях. Только при их зарастании и превращении в пойму (осередков – в пойменные острова), что обычно происходит в маловодные периоды лет, оно трансформируется в русло другого типа (извилистое или разветвленное на рукава).

Наиболее сложны соотношения извилистости потока с руслами рек, разветвленных на рукава, отличающихся к тому же очень большим разнообразием [Чалов, 1978, 2011]. Можно выделить следующие основные (типичные, наиболее распространенные) ситуации (рис. 2): а) одиночные разветвления, образованные отдельными элементарными или малыми (образованными двумя-тремя объединившимися элементарными, причленившимися к ним и превратившимися в пойму побочнями и разросшимися в устье косами) островами; б) сопряженные разветвления, в которых в каждом следующем звене (возле острова) большая часть расхода воды сосредоточивается в рукаве, проходящем у противоположного берега; формируются излучины, огибающие острова, с вогнутыми последовательно левым – правым – левым и т. д. (или наоборот) берегами [Чалов, 1979]; в) разветвления, образованные большими островами, представляющими собой «конгломераты», состоящими из большого количества объединившихся бывших элементарных островов, заросших побочней и обмелевших, но иногда продолжающих функционировать маловодных проток; г) пойменно-русловые разветвления с меандрирующими или разветвленными, в свою очередь, рукавами (до двух–пяти излучин или островов в каждом), встречающиеся как на реках с извилистым (меандрирующим) руслом (Ока, Вычегда, средняя Обь),

так и, реже, на реках, разветвленных на рукава (Киренга); д) раздвоенные русла (Обь и Юганская Обь, Малая и Горная – Большая Обь, Волга и Ахтуба, Днестр и Турунчук и др.), в которых каждый рукав, имеющий протяженность многие десятки и даже сотни километров, находится в противоположных сторонах днища речной долины (на нижней Оби ширина поймы достигает 60 км), характеризуется своими набором морфодинамических типов русла и особенностями руслового и гидрологического режимов, т. к. зачастую испытывает влияние различных природных условий лево- и правобережных частей бассейна; е) пойменная многорукавность, представленная расчленяющими пойму на отдельные крупные массивы сравнительно маловодными (по отношению к реке и ее рукавам) протоками (ответвлениями, по терминологии Н.И. Маккавеева [1955]), обычно меандрирующими, характерная для рек с широкопойменным руслом в условиях ее глубокого затопления и прохождения руслоформирующих расходов воды во время половодья [Чалов, 1979]. Чем сложнее структура разветвлений, тем многообразнее соотношения с процессами меандрирования, и на одной и той же реке, в пределах одного морфологически однородного участка встречаются самые разные комбинации извилистости рукавов и пойменных проток.

В *одиночных разветвлениях* рукава, огибающие элементарные острова, образуют пологие излучины ($l/L < 1,4$; здесь l – длина рукава, L – шаг разветвления) с соответствующим распределением зон ускорения и замедления течения и циркуляционными течениями, вызывающими размыв вогнутых берегов напротив островов и аккумуляцией наносов возле них, образующих выпуклые берега (шпоры) излучин обоих рукавов, и в устье островов, где формируются косы (рис. 3А). Оголовок острова в зависимости от местных условий или общей направленности вертикальных русловых деформаций, определяемой соотношением величины их стока W и транспортирующей способности потока $W_{тр}$ ($W > W_{тр}$ – направленная аккумуляция наносов, $W < W_{тр}$ – врезание реки), либо размывается, либо возле него формируются отмели. Размывы берегов и аккумуляция наносов возле острова в результате сопровождаются суммарным (вместе с островами в бровках береговой поймы) расширением русла и увеличением степени развитости излучин рукавов, особенно со стороны рукава, имеющего большую водность. Со временем это приводит к трансформации излучины рукава сначала в развитую ($l/L < 1,4-1,7$), а затем в крутую ($l/L > 1,7$) излучину. При достижении этих соотношений происходит перераспределение стока между рукавами. Если в более прямом рукаве формируется новый остров, то в конечном счете может возникнуть своеобразное верное разветвление (см. рис. 3Б), состоящее из нескольких островов, разделенных рукавами, имеющими форму излучин разной степени развитости. В других случаях при расположении одного из рукавов под направляющим воздействием на поток ве-



дущего берега, его излучина приобретает гипертрофированную форму, получившую в китайской литературе (на примере р. Янцзы) название «голова утки» (см. рис. 3В) [Чалов и др., 2000].

Пока излучина рукава одиночного разветвления является пологой ($l/L < 1,4$), темпы размыва берегов и протяженность фронта размыва определяются местными условиями (расположением в них прирусловых отмелей, ответвлением или слиянием с пойменными протоками, сливом воды с затопленной поймы или наоборот и т. д.) и не связаны с параметрами излучины. Лишь при превращении ее в развитую и крутую скорости (средние и максимальные) размыва берегов возрастают – $C_6 = f(l/L)_{рук}$, что объясняется развитием циркуляционных течений и дифференциацией скоростного поля потока [Куракова, Чалов, 2019].

Таким образом, развитие одиночных разветвлений, наряду с рассредоточением стока по рукавам (в отличие от осередковых, они сохраняются в многоводную фазу режима из-за большей высоты островов и наличия на них растительности), ведущим фактором, определяющим само их существование, важным условием и механизмом их эволюции является меандрирование рукавов. Перераспределение стока между ними или приобретение излучинами их русел гипертрофированной формы происходит вследствие превышения критического соотношения параметров, при котором утрачивается, по Н.И. Маккавееву [1955, Проектирование..., 1964], гидравлическая выгодность извилистой формы русла. Но развитие одного и обмеление другого рукава может происхо-

Рис. 2. Основные типы соотношений разветвленных русел с процессами меандрирования: А – одиночное разветвление (нижняя Обь, Кынинское разветвление); Б – разветвление, образованное большим островом (верхняя Обь, Чичканское разветвление); В – сопряженные разветвления (верхняя Обь, Орско-Борское-Гусиное-Белоглинское разветвления); Г – пойменно-русловое разветвление на меандрирующей (I – Вычегда и полои Иртовский-Ленский) и разветвленной на рукава (II – нижняя Печора) реке; Д – раздвоенное русло и пойменная многорукавность (Малая и Горная Обь)

Fig. 2. The main types of relations of braided channels with meandering processes: A – single braided reach (the Lower Ob' river, Kyninsky braided pattern); Б – braided reach formed by a large island (the Upper Ob' river, Chichkanskoie braided pattern); В – conjugated braided reach (the Upper Ob' river, Orsko-Borskoe-Gusinoe-Beloglinskoe braided reaches); Г – braided-anabranching reach on the meandering (I – the Vychechga river and poloi Irtofsky – Lensky) and on the braided (II – the lower Pinega river) river; Д – split channel and anabranching reach (the Malaya and Gornaya Ob' river)

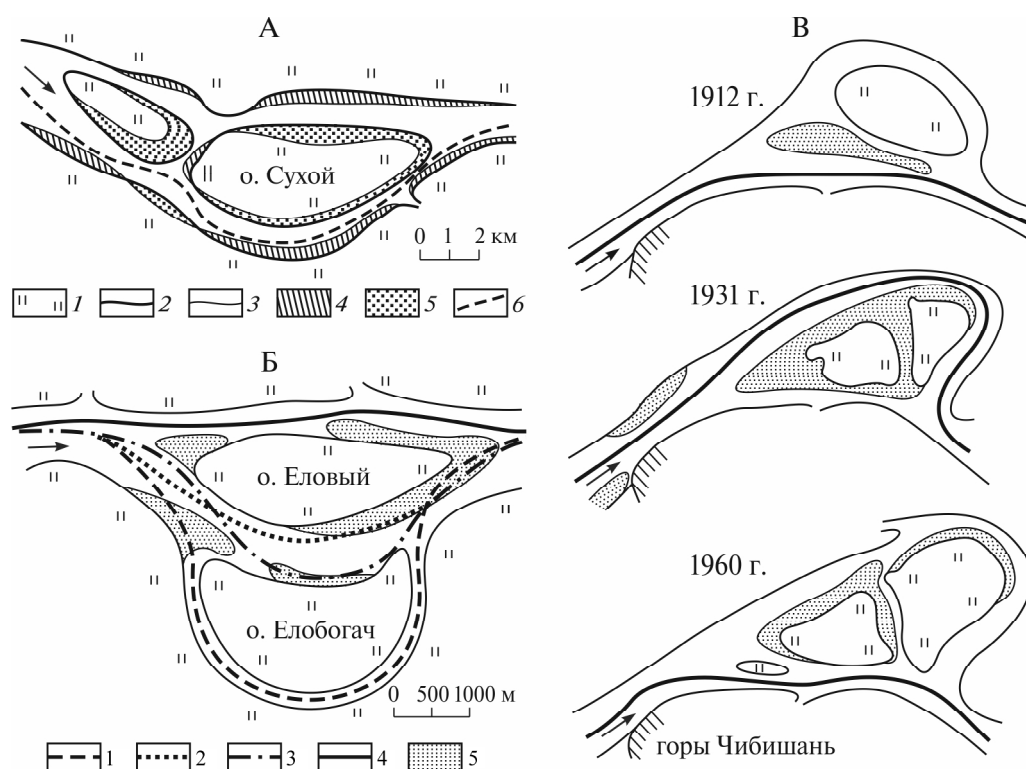


Рис. 3. Развитие излучин рукавов одиночных разветвлений: А – образованное малым островом (широтный участок средней Оби, о. Сухой): 1 – пойма; 2 – бровка русла в 2017 г.; 3 – то же в 1974 г.; 4 – зоны размыва берегов; 5 – зоны аккумуляции наносов; 6 – динамическая ось потока в основном рукаве; Б – веерное (р. Обь, Елобогачское разветвление): 1–4 – положения динамических осей потока в разные временные интервалы; 5 – прирусловые отмели; В – гипертрофированное (р. Янцзы, «голова утки»)

Fig. 3. Development of bends on single braided reaches: А – formed by a small island (the middle Ob' river, Sukhoi Island): 1 – floodplain; 2 – channel edge in 2017; 3 – channel edge in 1974; 4 – zones of bank erosion; 5 – zones of sediment accumulation; 6 – dynamic axis of the flow in the main branch; Б – "fan" braided pattern (the Ob' river, Yelobogatsky braided reach): 1–4 – positions of the dynamic axes of the flow at different time intervals; 5 – channel bars; В – hypertrophied braided pattern (the Yangtze River, "duck head")

дить и по другим причинам, из которых наиболее часто встречающаяся – надвижение на узел разветвления смещающихся с вышележащего участка побочней. Однако и в этом случае заход в рукав, на который надвигается побочень, получает избыточное искривление. Поэтому поток направляется в другой рукав, который начинает развиваться, если не произойдет образование побочневого протока и отторжение побочня подобно спрямлению крутой излучины при $l/L > 1,6$.

В сопряженных разветвлениях русла поток, обладающий большей водностью, образует серии пологих или развитых излучин, обтекая последовательно острова, расположенные цепочкой посередине русла. В каждом звене таких разветвлений процесс их развития происходит аналогично одиночному разветвлению, но степень развитости их излучин может существенно различаться в зависимости от большей или меньшей рассредоточенности стока по рукавам, их расположения в разных условиях по отношению к ведущим берегам, взаимодействию с течением воды по затопленной пойме, сливом воды с поймы или переливом ее из русла в пойму и т. д. Избыточное искривление рукава в одном из звеньев сопряженной системы, особенно в верхнем, и пе-

рераспределение в нем расходов воды отражается, как и в развитии смежных излучин русла, на состоянии всех остальных звеньев, вызывая перемещение и, соответственно, углубление и развитие вторых рукавов (из-за этого схема переформирования сопряженных рукавов получила название «правило восьмерки»).

В параллельно-рукавных разветвлениях рукава, разделенные цепочкой островов, образуют свои системы излучин, причем между островами, где вершины излучин обоих рукавов оказываются максимально сближенными, стрежневые зоны ветвей потока разделяются либо повышением отметок дна, либо подводными отмелями, соответствующими зонам понижения скоростей течения посередине реки. Это отличает, иногда при внешнем морфологическом сходстве, этот тип разветвлений от сопряженных, в которых острова составляют «шпоры» следующих друг за другом излучин, вершины которых опираются на противоположные берега реки, а главное течение последовательно между островами переваливает от одного берега реки к другому (рис. 4). Но главным в обоих случаях является извилистость рукавов с присущими излучинам скоростными полями, циркуляционными течениями и зако-

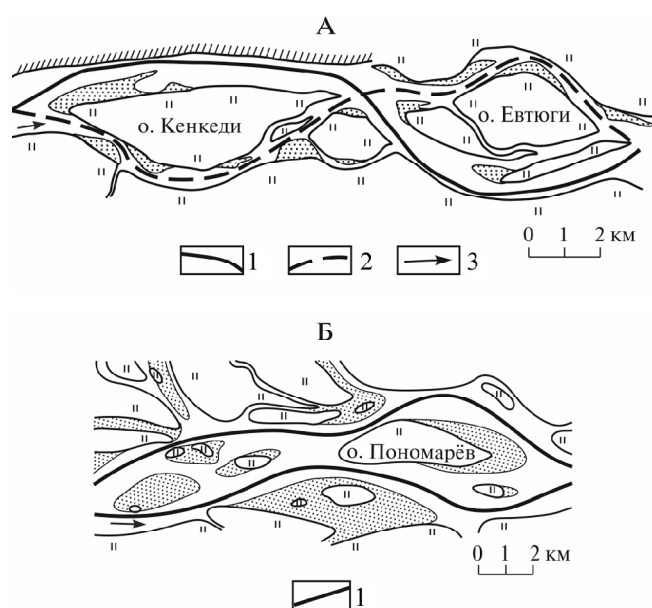


Рис. 4. Извилистость потока в сопряженных (А – р. Печора: 1, 2 – положения динамической оси потока в периодически развивающихся рукавах; 3 – направление течения реки) и параллельно-рукавных (Б – р. Лена, Якутский узел: 1 – оси потоков в равнозначных по водности рукавах) разветвлениях

Fig. 4. River flow sinuosity in conjugated (A – the Pechora River braided reach: 1, 2 – positions of the dynamic axis of the flow in the conjugated channel branches; 3 – direction of the river flow) and sub-parallel braided reach (B – the Lena river, Rassoloda braided reach: 1 – flow axis in the equal in water content) branches

номерностями переформирования. Однако в сопряженных разветвлениях излучины объединяют в каждом звене рукава с наибольшей водностью, проходящие у противоположных берегов, тогда как в параллельно-рукавных, имеющих большую относительную ширину b_p/h (здесь b_p – ширина русла, h – его глубина), излучины составляют самостоятельные серии в каждом из рукавов.

В разветвлениях, образованных большими островами, параметры излучин рукавов часто не соответствуют их водности. Известно, что радиусы кривизны излучин r и их шаги L зависят от характерных (или руслоформирующих) расходов воды [Маккавеев, 1955; Экспериментальная геоморфология, 1969; Чалов и др., 2004], т. е. $r = f(Q_\phi)$ или $L = f(Q_\phi)$. Соответственно, в разветвленном русле параметры излучин рукавов $r_{рук} = f(Q_{\phi,рук})$ или $L_{раз} = f(Q_{\phi,рук})$ [Львовская, 2016] – зависимости, которые нарушаются в рукавах, огибающих большие острова. В таких условиях в рукавах формируются излучины меньших размеров (и тогда рукав образует две, реже три излучины), r и L которых отвечают их водности, или одиночные и даже сопряженные разветвления второго порядка, в рукавах которых скоростные поля потока и циркуляционные течения соответствуют их извилистости. То же обычно происходит в рукаве, имеющем относительно прямолинейное русло, либо в нем формируются извилины динамической оси потока, огибаю-

щие побочни. Подобные же процессы (образование излучин рукавов или разветвлений второго порядка, извилины динамической оси потока) имеют место, если в одиночных разветвлениях образующие их острова получают удлиненную форму благодаря их трансгрессивному (за счет роста косы в устье) и регрессивному (образование отмелей у оголовка) росту, вследствие чего рукава приобретают относительно прямолинейную конфигурацию.

Пойменно-русовые разветвления обычно приурочены к участкам, где реки пересекают широкую пойму от одного борта долины к другому. В результате направление руслового потока и пойменных течений во время половодья при затопленной пойме пересекаются. На меандрирующих реках оба рукава также меандрируют, образуя от двух до пяти-шести излучин, параметры которых соответствуют их водности. При этом один рукав, по которому осуществляется короткий, иногда почти поперек днища долины, перевал реки, получает преимущественное развитие в маловодные периоды лет. Это определяет меньшие параметры (r , L) излучин. Наоборот, излучины длинного рукава, в который сливаются воды с поймы в максимальные по водности половодья, характеризуются большими радиусами r и шагами L (напомним, что $r_{рук} \sim L_{рук} \sim Q_{\phi,рук}$).

На реках с разветвленным руслом оба рукава пойменно-русовых разветвлений также меандрируют или формируют разветвления второго порядка, либо они имеют различные типы русла. Например, на р. Киренге на участках с таким типом русла один из рукавов, больший по водности, отличается вторичной разветвленностью, тогда как второй – обычно извилистый [Белый и др., 1979]. При этом возле островов при обтекании их потоком, как и во всех разветвлениях, формируется структура потока, и развиваются излучины рукавов, имеющие параметры (r , L), соответствующие их водности.

Еще более сложно и многообразно соотношение между разветвленностью потока и русла, с одной стороны, и меандрированием потока и развитием излучин в *раздвоенном русле* – с другой. Представляя собой самый высокий структурный уровень развития разветвлений [Чалов, Чалов, 2020], он включает все возможные комбинации как ветвления потока, образования осередков и формирования разветвлений – одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных, пойменно-русовых, так и извилистости динамической оси потока и развития излучин рукавов разветвлений всех типов. При этом меандрирование (извилистость) потока проявляется в ручьях, малых, больших и крупнейших реках и морфологически закрепляется в виде излучин как самого русла, так и излучин рукавов от простых одиночных до самых сложных, разбросанных разветвлений.

Раздвоенные русла по соотношению разветвленности и извилистости основных рукавов можно охарактеризовать двумя крайними примерами. На нижней Волге от основного русла ответвляется маловодный (от стока Волги в нем – всего 3–4%) ле-

вый рукав – Ахтуба, проходящий в тыловой части Волго-Ахтубинской поймы. Почти на всем своем протяжении он меандрирует и лишь местами, проходя вдоль левого коренного берега, русло становится относительно прямолинейным, но с извилинами динамической оси потока и иногда с осередковыми разветвлениями. В русле собственно Волги (точнее ее правый основной рукав) относительно прямолинейные участки, но часто осложненные разветвлениями второго порядка и извилинами динамической оси меженного потока, огибающего побочни (в том числе в спрямляющих прорванные излучины рукавов), одиночные разветвления и излучины распространены приблизительно в равном долевым соотношении [Коротаяев и др., 2019], причем параметры излучин самого русла Волги и ее рукавов на несколько порядков величин больше, чем у излучин Ахтубы.

Другую разновидность раздвоенного русла дает нижняя Обь. В 294 км ниже слияния с Иртышом она разделяется на два соизмеримых по водности рукава – Малую и Горную Обь (60 и 40% в половодье). Характерно, что впервые раздвоенное русло встречается на широтном участке средней Оби, где от нее отходит в сторону левого борта долины система проток Юганская Обь – Салманская – Неулева, относительная водность которых варьирует в пределах 15–30% от общего расхода воды в реке. Русла этих рукавов меандрирующие, параметры излучин зависят от их водности. В русле собственно Оби излучины отсутствуют, но они характерны практически для всех рукавов русловых (островных) разветвлений, принимают иногда сложную петлеобразную форму. На нижней Оби Малая и Горная Обь, в свою очередь, формируют раздвоенные русла: от Малой Оби сначала отходит Тоготская Обь в центральную часть поймы, а затем влево Вайсова протока, ниже захода в которую доля стока в Малой Оби от общего на реке составляет меньше 15% в половодье. Лишь после слияния сначала с Тогутской Обью, а затем и с р. Северной Сосьвой, расход воды в которой в нижнем течении включает воды Вайсовой протоки и ряда обских пойменных проток, сток Малой Оби восстанавливается. Похожая ситуация характерна и для Горной Оби, от которой отходит Сомутнельская протока, создающая на ней раздвоенное русло (в нее впадает правый приток Оби – р. Казым). Все рукава раздвоенного русла Оби меандрируют, образуя на Малой Оби иногда очень крутые излучины с коленообразными изгибами потока в их привершинных частях. При этом параметры излучин рукавов зависят от их водности, определяя, в свою очередь, у развитых и крутых скорости размыва берегов: на пологих излучинах Малой, Горной и Тоготской Оби эта связь, подобно рассмотренной выше зависимости $C_{рук} = f(I/L)$ для пологих излучин одиночных русловых разветвлений, не проявляется, т. к. превалирует влияние других факторов, в т. ч. из-за развития островов на их крыльях или возле вершин, что приводит к снижению расхода воды в основном русле рукава.

Пойменные протоки (ответвления), создающие пойменную многорукавность, сопровождают русла любого морфодинамического типа, являясь, с одной стороны, результатом эволюции излучин (их спрямления) или русловых разветвлений (причленение островов к пойме при неполном отмирании рукавов), а с другой – следствием глубокого затопления поймы и прохождения руслоформирующих расходов в эту фазу водного режима. Вследствие этого на пойме формируются достаточно мощные течения [Барышников, 2012], отдельные ветви которых, в первую очередь, сосредоточиваются по староречьям и отшнуровавшимся от русла протокам, не давая им отмереть и превратиться в ложбины на пойме. Уже исходная форма русел этих потоков предполагает их извилистость (изогнутые староречья меандрирующих рек или излучин бывших рукавов русловых разветвлений). Однако она со временем трансформируется, приспособляясь к водности пойменных проток (кстати, они иногда носят местное название – воложки на Волге, полои на Северной Двине, шары на Печоре), но из-за сравнительно небольшого стока наносов в них параметры форм русла не соответствуют проходящему по ним расходу воды. Относительная водность пойменных проток невелика, составляя обычно первые проценты от расхода воды в реке (в самых многоводных – до 10–15%), хотя в сумме при их многочисленности они забирают до 30%. По данным Н.Б. Барышникова [2012], на средней Оби с раздвоенным руслом по пойме и пойменным протокам проходит всего 14,2% расхода половодья (3500 м³/с), тогда как в основном русле Оби в Юганской Оби – 85,8% (21 200 м³/с). По данным натурных измерений в половодье 2019 г. только самые крупные пойменные протоки (без учета затопленной поймы) в совокупности забирали от 500 до 1500 м³/с (при расходе воды в русле реки – около 25 000 м³/с).

Выводы:

– неустойчивость прямолинейного движения потока, обуславливая его извилистость или разделение на ветви течения, является причиной абсолютного преобладания меандрирующих или разветвленных на рукава речных русел, и в условиях свободного развития русловых деформации (широкопойменные русла) на прямолинейные, неразветвленные русла приходится всего 14,3% (для рек длиной более 500 км) [Русловой режим..., 1994]. Однако и в руслах этого типа имеет место извилистость динамической оси потока, огибающей побочни перекатов, или формирование осередковой разветвленности. При этом ветви потока, обтекая в межень осередки, представляющие собой обсыхающие или мелководные, как и побочни, части крупных грядовых форм руслового рельефа, образуют извилины с соответствующими им полем скоростей и циркуляционными течениями;

– меандрирование или разветвление русел на рукава связано с закреплением побочней или осередков растительностью и превращением их в пой-

менные шпоры излучин или острова. Однако в «чистом» виде развитие излучин характерно только для малых и отчасти средних рек. Чем больше река и, соответственно, ее ширина и соотношение ширины и глубины русла b_r/h , тем вероятнее осложнение излучин формированием островов на их крыльях и привершинных частях. Вследствие этого на больших и, тем более, крупнейших реках шпоры излучин представлены островами, которые в своем развитии не достигают стадии крутой петлеобразной формы, спрямляясь по протокам между островами, составляющими их шпоры, при превышении критического соотношения $l/L = 1,4-1,7$, при котором, по Н.И. Маккавееву [1955], утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла. В свою очередь это дает основание для выделения в классификационных схемах разветвленно-извилистых русел [Чалов, 1979, 2008];

– в разветвленном русле формирование излучин рукавов предопределяется уже превращением осередка в остров, возле которого в потоке каждого из огибающих его рукавов возникают скоростное поле и циркуляционные течения, свойственные излучинам русла. Поэтому эволюция разветвлений происходит, по сути дела, по законам меандрирования рукавов с учетом рассредоточения по ним стока и водности каждого рукава;

– для рукавов, огибающих большие острова, пойменно-руслowych разветвлений и раздвоенных

русел характерно образование излучин или меандрирование русел на всем их протяжении (в раздвоенных руслах – десятки и сотни километров), причем параметры излучин и темпы деформации определяются водностью рукавов, т. е. рассредоточением стока;

– таким образом, можно говорить о всеобщности процесса меандрирования, развивающегося в руслах любого морфодинамического типа, определяющего их переформирования и трансформацию на всех структурных уровнях – от извилин и разделений на ветви динамической оси меженного потока в прямолинейном неразветвленном русле до сложных русловых (островных) разветвлений и меандрирования рукавов пойменно-руслowych разветвлений и раздвоенного русла. С этой точки зрения процесс разветвления представляется накладывающимся на меандрирование и отражающимся на параметрах излучин. Однако рассредоточение потока по рукавам определяет особенности развития в них излучин и режим переформирования, и поэтому разветвление русла является равноценным по значимости процессом формирования русла. Его известная ограниченность связана с размерами рек: для малых и отчасти средних рек он не свойствен, проявляясь лишь в специфических условиях (подпор от слияния с притоком или местного сужения долины, в местном расширении русла и т. д.).

Благодарности. Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (исходные данные, речные излучины) и при финансовой поддержке РНФ (проект № 18-17-00086 – полевые исследования на крупнейших реках, многорукавные русла рек).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барышников Н.Б. Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. СПб.: РГТУ, 2012. 426 с.
- Белый Б.В., Беркович К.М., Борсук О.А., Зайцев А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология, динамика и регулирование русла р. Киренги в связи с транспортным освоением зоны БАМ // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 7. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. С. 119–135.
- Гришанин К.В., Замышляев В.И. Возникновение меандрирования как проблема гидродинамической неустойчивости // Тр. ГГИ. 1985. Вып. 301. С. 5–12.
- Замышляев В.И. О плановой устойчивости прямого русла // Тр. ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 48–55.
- Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
- Кортаев В.Н., Иванов В.В., Чалов Р.С. Морфодинамика русла нижней Волги // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 21. М.: Географический ф-т МГУ, 2019. С. 170–192.
- Куракова А.А., Чалов Р.С. Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 34–47.
- Лосиевский А.И. Лабораторные исследования процессов образования перекатов // Тр. ЦНИИВТ. 1934. Вып. 36. 98 с.
- Львовская Е.А. Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках севера ЕТР: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2016. 30 с.
- Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949. 202 с.
- Маккавеев Н.И. Руслa реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 264 с.
- Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. М.: Транспорт, 1964. 262 с.
- Русловой режим рек Северной Евразии. М.: Географический ф-т МГУ, 1994. 336 с.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Факторы русловых процессов и иерархия русловых форм // Геоморфология. 1983. № 2. С. 16–26.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.

Чалов Р.С. Руслование: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.

Чалов Р.С. Руловые процессы (руслование). М.: ИНФРА-М, 2016. 569 с.

Чалов Р.С. Параметризация руловых процессов для их прогнозных оценок и диагностики опасных проявлений // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 5. С. 551–562.

Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 371 с.

Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и руловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 212 с.

Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация руловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 1–47.

Экспериментальная геоморфология. Вып. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. 173 с.

Gorycki M.A. Hydraulic drag: a meander-initiating Mechanism, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1973, vol. 84, no. 1, p. 175–186.

Leopold L.B., Wolman M.G. Rivermeanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.

Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. Fluvial processes in geomorphology San-Francisco, Freeman, 1969, 522 p.

Поступила в редакцию 29.03.2020

После доработки 15.06.2020

Принята к публикации 06.11.2020

R.S. Chalov^{1,2}

SINUOUS OR BRAIDING WATER FLOWS AND FORMATION OF MEANDERING AND BRAIDED RIVER CHANNELS

The paper demonstrates that the instability of straight movement of river flows causes their sinuosity (meandering) or splitting into branches and is reflected in the evolution of any channel pattern type. In a straight unbraided channel the instability is manifested as a sinuosity of the dynamic axis of river flow which bends round side-bars, i. e. elevated parts of channel relief drying out during the low water, or in braided channel reaches, where each branch of the stream forms further bends. In braided channels the sinuosity of the dynamic axis of the flow causes a specific distribution of flow velocities, circulation currents and particular angles of approaching the banks, thus resulting in bank erosion and sediment accumulation near the islands. Therefore, the channel branches look like gentle bends in single braided reaches, while in conjugated braided reaches the sinuosity of main river flow occurs along a series of the islands, and the branches of anabranching and split channels also form meanders. Thus, meandering is a universal process of different channel patterns formation. In braided channels it occurs in line with the distribution of water flow over the branches, which determine the parameters of bends, as well as the rate and direction of their deformation. Meandering channels of large rivers and bends of branches of split channels are, in their turn, complicated by islands in the wings and the top parts of meanders. However, the distribution of water flow into branches is not characteristic for small and medium-size rivers. The patterns discussed in the paper should be taken into account when substantiating the methods of channel processes management for the solution of practical problems.

Key words: channel processes, river flow, channel pattern types, river bends, islands, mid-channel bars, sinuosity of dynamic axis of the flow

Acknowledgements. The study was carried out according to research plans (state tasks) of the Department of Land Hydrology and the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of the Lomonosov Moscow State University (source data, river bends) and financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-17-00086 – field studies on the largest rivers, anabranching river channels).

REFERENCES

Baryschnikov N.B. *Problemy morfologii, gidrologii i gidravliki poim* [Problems of floodplain morphology, hydrology and hydraulics], St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., RGGVU, 2012, 426 p. (In Russian)

Belyi B.V., Berkovich K.M., Borsuk O.A., Zaicev A.A., Lodina R.V., Chalov R.S., Chernov A.V. [Morphology, dynamics and regulation of the Kirenga River channel under the transport development of the BAM area], *Eroziya pochvy i ruslovye processy* [Soil erosion and channel processes], iss. 7, Moscow, Moscow University Publ., 1979, p. 119–135. (In Russian)

Chalov R.S. Faktory ruslovykh processov i ierarhiya ruslovykh form [Factors of channel processes and the ranking of channel forms], *Geomorfologiya*, 1983, no. 2, p. 16–26. (In Russian)

Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh processov* [Geographical Studies of Channel Processes], Moscow, Moscow University Publ., 1979, 232 p. (In Russian)

Chalov R.S. Parameterization of channel processes for their forecast estimation and diagnostics of hazardous manifestations, *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 5, p. 738–748.

Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, T. 1, Ruslovye processy: faktory, mehanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [River channel science: theory, geography, practice, vol. 1, Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and conditions of river channel formation], Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor, PhD. in Geography; Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Leading Scientific Researcher; e-mail: rschalov@mail.ru

² Nauchno-issledovatel'skaya laboratoriya erozii pochv i ruslovykh protsessov im. N.I. Makkaveyeva, gl. nauch. s.

Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, T. 2, Morfodinamika rechnykh rusel [River channel science: theory, geography, practice, vol. 2, Morphodynamics of river channels], Moscow, KRASAND Publ., 2011, 960 p. (In Russian)

Chalov R.S. Ruslovyie processy (ruslovedenie) [Channel processes (River channel science)], Moscow, INFRA-M Publ., 2016, 569 p. (In Russian)

Chalov R.S. Intricately braided river channels of lowland rivers: formation conditions, morphology and deformation, *Water Resources*, 2001, vol. 28, no. 2, p. 145–150.

Chalov R.S., Chalov S.R. Structural levels and morphodynamic classification of channel braiding, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 3, p. 374–386.

Chalov R.S., Liu Sghuguan, Alekseevskii N.I. Stok nanosov i ruslovyie processy na bolskikh ravninnykh rekakh [Sediment Runoff and Channel Processes on Large Lowland Rivers], Moscow, Moscow University Publ., 2000, 212 p. (In Russian)

Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. Rechnye izluchiny [River meanders], Moscow, Moscow University Publ., 2004, 371 p. (In Russian)

Eksperimentalnaya geomorfologiya [Experimental geomorphology], iss. 2, Moscow, Moscow University Publ., 1969, 73 p. (In Russian)

Gorycki M.A. Hydraulic drag: a meander-initiating mechanism, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1973, vol. 84, no. 1, p. 175–186.

Grischanin K.V., Zamyshlyayev V.I. Vozniknovenie meandrirovaniya kak problema gidrodinamicheskoi neustoischivosti [Meandering processes as a problem of hydrodynamic instability], *Trudy GGI*, 1985, iss. 301, p. 5–12. (In Russian)

Karasev I.F. Ruslovyie processy pri perebroske stoka [Channel processes in the course of water diversion], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)

Korotaev V.N., Ivanov V.V., Chalov R.S. [Channel morphodynamics of the Lower Volga River], *Eroziya pochvy i*

ruslovyie processy [Soil erosion and channel processes], iss. 21, Moscow, Moscow University Publ., 2019, p. 170–192. (In Russian)

Kurakova A.A., Chalov R.S. Razmyvy beregov na schirotnom uchastke srednei Obi i ih svyaz s morfologiej rusla [Shore erosion within the latitudinal section of the Middle Ob and its correlation with morphology of the channel], *Geograficheskij vestnik*, 2019, no. 3(50), p. 34–47. (In Russian)

Leopold L.B., Wolman M.G. River meanders, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, p. 769–794.

Leopold L.B., Wolman M.G., Miller J.P. *Fluvial processes in geomorphology*, San-Francisco, Freeman, 1969, 522 p.

Losievskii A.I. *Laboratornye issledovaniya processov obrazovaniya perekatov* [Laboratory studies of the processes of riffles formation], *Trudy CNIIBT*, 1934, iss. 36, 98 p. (In Russian)

Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River channel and erosion in the river basin], Moscow, AN SSSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)

Makkaveev N.I. *Ruslovoi rezhim rek i trassirovanie prorozei* [Channel regime of rivers and cuts tracing], Moscow, Rechizdat Publ., 1949, 202 p. (In Russian)

Makkaveev N.I., Chalov R.S. *Ruslovyie processy* [Channel processes], Moscow, Moscow University Publ., 1986, 264 p. (In Russian)

Proektirovanie sudovykh hodov na svobodnykh rekakh [Designing navigation passes on free rivers], *Trudy CNIIEBT*, vol. 36, Moscow, Transport Publ., 1964, 262 p. (In Russian)

Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii [Channel regime of North Eurasian rivers], Moscow, Moscow University Publ., 1994, 336 p. (In Russian)

Zamyshlyayev V.I. O planovoi ustoischivosti pryamogo rusla [About planimetric stability of the straight channel], *Trudy GGI*, 1982, iss. 278, p. 48–55. (In Russian)

Received 29.03.2020

Revised 15.06.2020

Accepted 06.11.2020