

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.5.: 551.4.04

ПОЙМЕННО-РУСЛОВЫЕ РАЗВЕТВЛЕНИЯ: УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Р.С. Чалов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева, проф., гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: rschalov@mail.ru

Впервые дается анализ условий формирования пойменно-русловых разветвлений, обоснование и критерии их выделения как структурного уровня русловых процессов, их связь с водоносностью рек, русловым режимом, затопляемостью пойм во время половодий (паводков) и морфологией долин. Они характерны для широкопойменных русел, являясь специфической формой меандрирования средних и больших рек (верхняя и средняя Обь, Выгегда, Ока); на реках с разветвленным руслом встречаются реже и только на больших и крупнейших (Северная Двина, нижняя Лена) и в меандрирующих рукавах раздвоенных русел (Юганская, Малая, Горная Обь). Такие пойменно-русловые разветвления представляют собой результат эволюции излучин или русловых (островных) разветвлений, формируются на перевалах реки от одного борта долины к другому из-за несовпадения руслового и пойменного потоков во время половодий и высоких паводков. Условием их развития является прохождение руслоформирующих расходов воды при затопленной пойме. Они возникают также: ниже крупных мысов коренных берегов или изгибов долины, оказывающих на поток направляющее воздействие, отклоняя его в сторону поймы и способствуя увеличению водности пойменных протоков, в этом случае превращающихся в рукава реки; в результате внутрипойменных перехватов рукавов раздвоенного русла и пойменных протоков при размыве между излучинами русла или рукавов русловых (островных) разветвлений поймы и образования проранов между ними; при формировании и эволюции прорванных излучин; в узлах слияния больших рек вследствие развития «дельтовых» разветвлений (Обь и Томь, Амур и Буряя). В трех-четырех рукавных пойменно-русловых разветвлениях они имеют полигенетический характер. Во врезанных руслах встречаются редко, будучи приуроченными к местным крупным расширениям русла (Енисей, верхняя Лена) как следствия распластывания потока и его подпора от нижерасположенного его стеснения коренными берегами.

Между рукавами пойменно-русловых разветвлений располагаются крупные островные массивы сложной конфигурации, имеющие соотношение их длины (шага разветвления) и ширины, намного меньшей оптимальной, – 3–4, свойственной русловым (островным) разветвлениям каплевидной или веретенообразной формы. Рукава пойменно-русловых разветвлений имеют свой набор морфодинамических типов русла (до 3–5 излучин или островных разветвлений), параметры которых зависят от водности рукавов.

Ключевые слова: русловые процессы, пойменно-русловые разветвления, структурные уровни, меандрирование, острова, рукава, рассредоточение стока

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.2.2

ВВЕДЕНИЕ

Пойменно-русловые разветвления – структурный уровень формирования разветвленных русел, занимающий промежуточное положение между русловыми (островными) разветвлениями и раздвоенными руслами. Их главными гидролого-морфологическими признаками являются: 1) рассредоточение стока по рукавам, протяженность которых в несколько раз превышает длину (шаг) русловых форм (излучин, островных разветвлений), свойственных дан-

ной реке; 2) разделение основных рукавов в каждом разветвлении островными массивами, имеющими сложную конфигурацию и форму, отличную от каплевидной или веретенообразной у островов, или архипелагами островов разных размеров; 3) формирование каждым рукавом русла своего морфодинамического типа – несколькими излучинами (от 2 до 5), русловыми разветвлениями и прямолинейными участками или их чередованием. Они характерны для рек с широкопойменным и адаптированным,

очень редко врезанным руслом в виде одиночных образований, прерывающих участки меандрирующего русла, русловых (островных) разветвлений или прямолинейного неразветвленного русла, не образуя морфологически однородные участки. Геоморфологические условия развития русловых деформаций определяют особенности их формирования, расположение и морфодинамику рукавов, квазиравномерное распределение расходов воды по рукавам. Параметры форм русла рукавов π (радиусы r и шаги L излучин рукавов, шаги разветвлений рукавов) меньше, чем на смежных неразветвленных участках русла, поскольку $\pi = f(Q)$. Это же – причина снижения транспортирующей способности потока в рукавах, аккумуляции в них наносов, формирование перекаатов с побочными и излучин, осередков и островов.

Несмотря на достаточно частую встречаемость, пойменно-русловые разветвления – наименее изученный (как и раздвоенные русла) тип разветвлений русел на рукава. Они отсутствуют в большинстве классификаций и типизаций русловых процессов [Россинский, Кузьмин, 1947; Маккавеев, 1955, 1971; Leopold, Wolman, 1957; Андреев, Ярославцев, 1958; Попов, 1961, 1965; Гришанин, 1972; Карасев, 1975; Schumm, 1977; Чалов, 1979; Richards, 1980; Rust, 1981; Кондратьев и др., 1982; Шэнь Юйчан, Цянь Нин и др., 1987]. Лишь Н.А. Ржаницын [1985] выделял относительно стабильные разветвления – бифуркации, при которых рукава большой длины рассматриваются как самостоятельные потоки. Судя по приведенным характеристикам, этот тип русла объединяет пойменно-русловые разветвления и разбросанные русла.

В англоязычной литературе пойменно-русловым разветвлениям соответствует термин *anabranching channels*, которому дается такая характеристика: острова стабильные, их ширина гораздо больше ширины рукавов; потоки в рукавах не объединяются даже в условиях высоких вод; в рукавах возможно меандрирование, появление осередковых и островных разветвлений [Chalov, Alabyan, 1997].

Сам термин «пойменно-русловое разветвление» и его определение появились недавно, и тогда же этот тип русла был включен в морфодинамическую классификацию МГУ [Чалов, 1999] как разновидность русловых (островных) разветвлений, хотя подчеркивалось его отличие от них, связанное с формой островных массивов, длиной рукавов и развитием в них своих типов русла. Позднее было обосновано отнесение его к более высокому структурному уровню русловых процессов [Чалов, 2011; Чалов, Чалов, 2020].

Такое положение пойменно-русловых разветвлений – следствие недостаточной изученности разветвленных русел вообще, а их встречаемость на меан-

дрирующих реках – как некий феномен извилистых русел. Отсюда задача статьи – дать оценку условий, которые определяют формирование пойменно-русловых разветвлений, их генезиса, морфологических и морфометрических особенностей, отличающих от разветвлений других типов, влияния рассредоточения стока по рукавам на развитие в них излучин и разветвлений.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

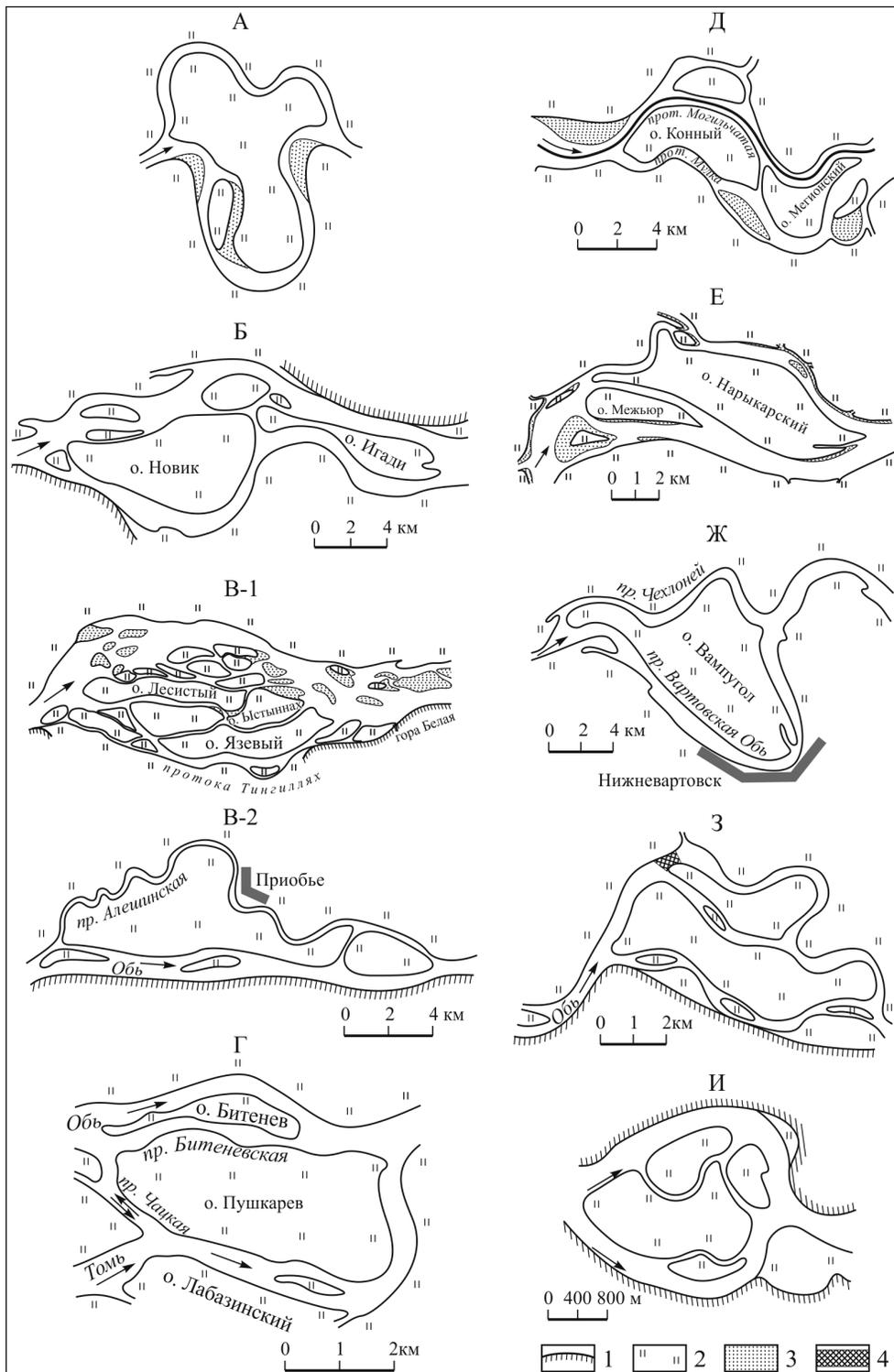
В основу руслового анализа при решении поставленной задачи положены материалы многолетних исследований (более 60 лет) на реках, характеризующихся различными условиями развития русел и имеющих разветвленное на рукава русло. В соответствии с разработанной в МГУ методологией изучения русловых процессов были определены структурные уровни формирования разветвлений, морфодинамические типы русел рукавов, выполнен ретроспективный анализ переформирований. В состав исследований входили съемки и промеры русел, измерения стока воды и наносов в рукавах, в том числе с применением современной аппаратуры и приборов, определение состава и распределения руслообразующих наносов, оценка затопляемости поймы и рассредоточения стока воды и наносов. Широко использовались космические снимки, карты и планы русел за разные временные интервалы. Объектами исследований были Обь, Иртыш, Томь, Лена и ее основные притоки, Амур, Северная Двина и Вычегда, Енисей, Печора, нижняя Волга, другие реки России и сопредельных стран, Янцзы и Хуанхэ, для которых был выполнен ретроспективный анализ, разработаны прогнозные оценки переформирования русел. Были выполнены обобщение и критический анализ литературных источников, в том числе зарубежных [Чалов и др., 2021], обзор космических снимков по крупнейшим рекам мира и лоцманских карт на реки России.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пойменно-русловые разветвления формируются: а) на реках со свободно меандрирующим руслом (Ока, Вычегда, средняя Обь между устьями Томи и Ваха), где их русла по диагонали пересекают пойму при ее глубоком затоплении в половодье (рис. 1, А); б) на широкопойменных реках с разветвленным руслом (Северная Двина, Печора, Обь, Киренга); связаны с образованием островных массивов тоже на перевале реки от одного борта долины к другому (рис. 1, Б); в) ниже выступов и мысов коренных берегов (верхняя и нижняя Обь, Лена между устьями Алдана и Вилюя, нижняя Волга), оказывающих на поток направляющее воздействие, и изгибов долины реки (рис. 1, В); г) в узлах слияния больших рек (Обь

и Томь), в которых при различном сочетании уровней воды на главной реке и притоке один из рукавов характеризуется переменным направлением течения (рис. 1, Г); д) при трансформации меандрирующих рукавов раздвоенных русел, их спрямлении, размыве пойменных межукавий – участков поймы между ними [Смирнова, 2002] и образовании сложных многорукавных разветвлений с крутыми и прорванными излучинами (рис. 1, Д); е) вследствие размыва пойменного перешейка между основным руслом (или

рукавами раздвоенного русла) и пойменной протокой (средняя Обь, левый рукав раздвоенного русла нижней Оби – Малая Обь, Енисей в Минусинской котловине) и увеличения водности последней из-за отвлечения в нее части стока из основного русла и превращения ее в рукав реки (рис. 1, Е); ж) при образовании прорванных излучин, спрямлении смежных излучин (средняя и нижняя Обь) и рассредоточении стока между старым руслом и спрямляющим рукавом, русло которого меандрирует или разветвляется



на рукава (рис. 1, Ж); 3) трех-четырёхрукавные пойменно-русловые разветвления при комбинации рукавов различного генезиса – на перевале реки между бортами долины и размыве пойменного перешейка, разделяющего один из рукавов от пойменной протоки (рис. 1, З); и) во врезанном русле в его крупных местных расширениях (рис. 1, И).

На *меандрирующих реках* пойменно-русловые разветвления располагаются на перевалах реки от одного борта долины к другому, имея диагональное направление к ее оси. Это обуславливает несоответствие во время половодья пойменного и руслового потоков и периодическое изменение водности рукавов в многоводные и маловодные половодья: в первом случае развивается рукав, соответствующий более прямому направлению потока (длинный перевал), во втором – более искривленному (короткий перевал). На это накладываются русловые деформации, приводящие к изменениям угла захода в рукава при продвижении побочной на узлы разветвления, длин рукавов, развитие и спрямление излучин. Многолетние колебания водности рукавов сопровождаются изменениями параметров их излучин, вследствие чего они постоянно перестраиваются, приспосабливаясь к новым гидравлическим характеристикам потока. Поэтому закономерные соотношения между показателями водности и параметрами излучин рукавов разветвлений не устанавливаются; в более многоводном рукаве они отражают частично трансформировавшиеся размеры излучин, установившиеся в предшествующий период, когда рукав был маловодным, и наоборот (в этом случае несоответствие параметров водности компенсируется формированием в рукаве побочной и осередков).

При многолетней стабилизации распределения расходов воды параметры излучин рукавов соответствуют их водности, но меньше, чем на смежных

участках неразветвленного русла (излучин самого русла) из-за рассредоточения стока. В то же время по длине меандрирующих рек (верхняя Вычегда, Кеть, средняя Обь) параметры излучин растут вниз по течению (с увеличением стока). Зависимость параметров излучин русла и излучин рукавов пойменно-русловых разветвлений от характерных расходов воды единая, но точки на графиках связи r , $L \sim Q_{cp}$, $Q_{cp, max}$, относящиеся к рукавам разветвлений, занимают крайнее нижнее положение (рис. 2).

На р. Кети имеется два пойменно-русловых разветвления, водность которых находится в соотношении 1:1–1:1,15, т. е. различается на 20–30%. На средней Оби от устья р. Томи до устья р. Вах такие разветвления (их 12) составляют 18% от общей длины участка. Их рукава меандрируют, но при подходе одного из них к коренному берегу русло становится прямолинейным, неразветвленным, занимая до половины длины рукава; иногда встречаются одиночные разветвления. В основном пойменно-русловые разветвления [Чалов и др., 2018] встречаются ниже слияния с р. Кетью: 33% до устья Васюгана, 86% – между устьями Васюгана и Тыма. Выше устья р. Кети имеется одно такое разветвление – Кривошеинское, составляющее 18% длины участка устье Томи – устье Чулыма (между устьями Чулыма и Кети их нет); его рукава образуют излучины – шесть левый и четыре правый. Также одно пойменно-русловое разветвление – Тымское – есть между устьями Васюгана и Тыма, составляя 25% его длины. Это – участки с относительно суженной поймой, что, очевидно, препятствует развитию пойменно-русловых разветвлений.

Ниже устья Тыма, где пойма расширяется, вновь преобладают пойменно-русловые разветвления (их 4), но размеры каждого из них уменьшаются почти в два раза. Если выше по течению их длина

Рис. 1. Пойменно-русловые разветвления:

- А – на реке с меандрирующим руслом (р. Обь, Кривошеинское разветвление); Б – на реке с разветвленным руслом (р. Печора); В – ниже выступов коренных ведущих берегов или изгибов долины (В-1 – нижняя Обь, Алешкинское разветвление; В-2 – нижняя Лена, Белогорское разветвление); Г – в узле слияния рек (Обь – Томь); Д – сложное трехрукавное, с развитыми, крутыми и прорванными излучинами рукавов (средняя Обь, Сытоминско-Салымское разветвление); Е – образовавшееся при размыве перешейка между основным руслом и пойменной протокой (нижняя Обь, Нарыкарское разветвление Малой Оби); Ж – следствие спрямления излучин – порванная излучина (средняя Обь, Нижневартовское разветвление); З – трехрукавное с рукавами разного генезиса (верхняя Обь, ниже Тарадановской излучины); И – в местном расширении врезанного русла (верхняя Лена, ниже устья р. Киренги): 1 – коренные берега; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – проран в пойменном перешейке

Fig. 1. Floodplain-channel braided reaches:

- А – on a river with meandering channel (the Ob' River, Krivosheinskoe braided reach); Б – on a river with braided channel (the Pechora River); В – downstream of the headlands of bedrock banks or river valley bends (В-1 – the Lower Ob' River, Aleshkinskoe braided reach; В-2 – the Lower Lena River, Belogorskoe braided reach); Г – at a river confluence (Ob' – Tom' rivers); Д – a complex three-branch reach with developed, steep and cut-off bends of branches (the Middle Ob' River, Sytominsko-Salymkoe braided reach); Е – formed due to erosion of the neck between the main river channel and the floodplain branch (the Lower Ob' River, Narykarskoe braided reach of the Malaya Ob' River); Ж – a consequence of meander straightening – a cut-off bend (the Middle Ob' River, the Nizhnevartovskoe braided reach); З – a three-arm braided reach with branches of different genesis (the Upper Ob' River, below the Taradanovskaya bend); И – in the local extension of the incised channel (the Upper Lena River, below the mouth of the Kirenga River): 1 – bedrock banks; 2 – floodplain; 3 – side-bars; 4 – washout in the floodplain neck

20–26 км, то здесь – 10–12 км, рукава их образуют две-три излучины. Это следствие растекания потока половодья по расширяющейся пойме.

Среди пойменно-руслых разветвлений Оби выделяется Нарымское. Оно располагается ниже устья Кети Копыловской – правого рукава раздвоенного русла Оби, по которому проходит большая часть стока Кети (остальная уходит в Тогурскую Кеть, сливающуюся с правым рукавом Канеровского пойменно-руслового разветвления Оби у г. Колпашево), или весь ее сток, когда по Тогурской Кети направляются в Кеть воды из Оби. Смещение излучины Оби у с. Нарыма привело к размытию поймы между Кетью Копыловской и Обью, вследствие чего ее сток стал частично направляться в нижнюю часть Кети Копыловской, превратив ее в рукав пойменно-руслового разветвления – Нарымскую луку.

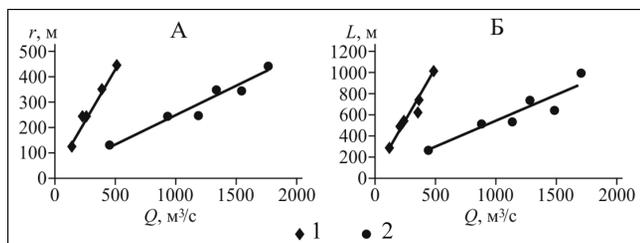


Рис. 2. Зависимость модальных значений радиусов кривизны r (А) и шагов L (Б) излучин р. Кети от среднемаксимального расхода воды: 1 – излучины русла; 2 – излучины рукавов пойменно-руслых разветвлений [Ермакова, 2004]

Fig. 2. Dependence of modal values of curvature radii r (А) and steps L (Б) of the Ket' River meanders from the average maximum water discharge: 1 – channel bends; 2 – bends of branches of floodplain-channel braided reaches [Ermakova, 2004]

За исключением Нарымского пойменно-руслового разветвления, все остальные приурочены к перевалам реки от одного борта долины к другому.

В пойменно-руслых разветвлениях общее количество излучин рукавов практически одинаково (в судоходных, более водных – 28, в несудоходных – 31), причем их больше в два раза в рукавах разветвлений, чем на всем остальном протяжении Оби от устья Томи до устья Ваха. Среди излучин рукавов преобладают сегментные, в большинстве своем крутые, со степенью развитости $l/L > 1,7$ (l – длина, L – шаг излучины), петлеобразных излучин всего две. Вынужденные излучины встречаются при подходе рукав к коренному берегу.

На меандрирующих реках оба рукава пойменно-руслых разветвлений образуют серии излучин (до 5–7) и только тот, который подходит к коренному берегу, имеет в нижней своей части прямолинейное неразветвленное русло. На реках с другими

типами русла возможны различные комбинации: оба рукава – с разветвленным руслом, либо один рукав – разветвленный, второй – меандрирующий.

На средней Вычегде (выше слияния с Сысолой) несколько пойменно-руслых разветвлений приурочены к местным расширениям днища долины и перемещениям реки от одного борта долины к другому. Одно из них – Подъельское, в котором ширина поймы 5–7 км, высота – 2–3 м над межennым уровнем, что ниже, чем на смежных участках. На протяжении XVIII–XX вв. происходило периодическое перераспределение стока воды между правым и левым рукавами и активизация меандрирования их русел. В XVIII в. большая часть расхода воды сосредоточивалась в правом рукаве, приближающемся к коренному берегу, возле которого он создавал серию вынужденных и адаптированных излучин (рис. 3). Левый рукав – полый Бакты – активно развивается, меандрирует, располагаясь в центральной части поймы. Переход в него основного стока реки произошел в середине XX в., после чего правый рукав стал относительно маловодным. Ныне более многоводный левый рукав образует шесть крутых излучин ($r = 500–700$ м, $l/L = 1,5–2$), вогнутые берега которых размываются со скоростью 3–5 м/год.

В нижнем течении Вычегды имеются три пойменно-руслых разветвления. В верхнем до середины XX в. правый – Лука-полой, меандрируя, образовывал шесть излучин на перевале реки к левому коренному берегу. При ширине русла 150–200 м он забирал до 40% расхода воды; левый рукав с большой водностью образует три излучины, после чего располагается у левого коренного берега до слияния с Лука-полоем. Русло правого рукава – Луки-полюя становится со временем более длинным, создавая условия для перераспределения стока в левый, более короткий рукав на перевале к левому коренному берегу. В настоящее время Лука-полой забирает 20–30% расхода воды в реке.

Ниже по течению два пойменно-руслых разветвления, активных в прошлом (до XVIII в. – Иртовский и Ленские полои и до середины XX в. – полый Прось) трансформировались в пойменные протоки – ответвления. Полый Прось еще в конце 1950-х гг. забирал около 30% расхода воды и рассматривался, будучи более коротким, как основной конкурирующий рукав в разветвлении. Переформирования излучин русла выше по течению привели к тому, что его водность сократилась до менее 10% в начале 2000-х гг., и он превратился в пойменную протоку [Русловые процессы..., 2012].

На средней Оби переформирования пойменно-руслых разветвлений связаны с перераспределением стока между рукавами, вызванным периодическим продвижением лево- и правобережных побочней

на их истоки, развитием смежной излучины и изменением направления потока в узле разветвлений, бóльшим удлинением одного из рукавов из-за его меандрирования. При этом такие изменения происходят очень редко, фиксируясь по данным картографических материалов за XX в. не более одного-двух раз. В рукавах разветвлений отмечено продольно-поперечное смещение излучин, периодическое развитие проток в одиночных разветвлениях, спрямление

крутых сегментных излучин при достижении ими степени развитости $l/L > 1,7$. Таково спрямление нижней излучины в правом рукаве Канеровского пойменно-руслового разветвления. В этом же разветвлении, находящимся непосредственно ниже Колпашевской крутой излучины, произошло развитие спрямляющего рукава за плечом правого коренного берега – Колпашевской протоки, так как излучина на заходе в него превышала критическое соотношение l/L .

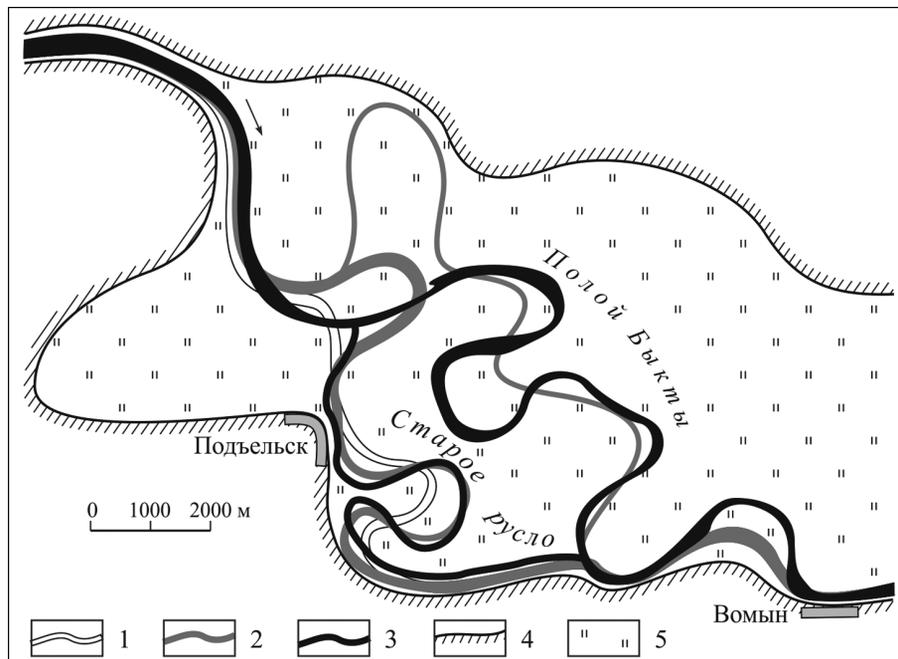


Рис. 3. Эволюция пойменно-руслового разветвления р. Выгегды в районе с. Подбельска с конца XVIII до начала XXI в. Положение русла: 1 – в 1780-е гг.; 2 – в 1909 г.; 3 – в 2001 г.; 4 – коренные берега; 5 – пойма

Fig. 3. Evolution of the floodplain-channel braided reach of the Vycheгда River in the area of Podielsk settlement from the end of the 18th to the beginning of the 21st century. Channel position: 1 – in the 1780s; 2 – in 1909; 3 – in 2001; 4 – bedrock banks; 5 – floodplain

На верхней Оби (выше г. Барнаула), русло которой слабо устойчивое, пойменно-русловое разветвление за XX в. претерпело существенные изменения в связи со спрямлением излучин и перераспределением стока между рукавами, развитием поперечных проток между ними.

Изменения параметров излучин рукавов пойменно-русловых разветвлений определяются перераспределением водности между рукавами. В Кривошенском разветвлении на средней Оби заметно возросло соотношение l/L излучин левого рукава, вследствие чего его водность за 1986–2011 гг. сократилась с 53 до 30%, и он перестал быть судоходным. Увеличение водности правого рукава сопровождалось увеличением l/L при возрастании радиусов кривизны излучин. Перераспределение расходов воды между рукавами произошло в Басмановском

и Лукашкинском разветвлениях, сопровождаясь изменением параметров излучин.

На реках с широкопойменным разветвленным руслом пойменно-русловые разветвления также формируются на перевалах реки от одного борта долины к другому. Подход одного рукава к коренному берегу сопровождается выклиниванием поймы и расширением ее у другого. В результате один из рукавов оказывается под влиянием осветленного потока, стекающего с поймы, тогда как другой располагался в зоне перелива вод половодья из русла в пойму. Для этих разветвлений характерно образование либо разветвлений русла обоих рукавов, либо меандрирование одного из них, по которому осуществляется короткий перевал потока (см. рис. 1, Б). Примером первой разновидности (оба рукава разветвляются) является Щучье развет-

вление на р. Киренге (рис. 4), сформировавшееся на перевале реки от левого к правому коренному берегу; разветвления рукавов приурочены к их верхней и средней частям; в нижних частях рукавов русло прямолинейное у правого коренного берега (протока Быстрая) или образующее пологие излучины в пойменных берегах (протока Щучья). Разветвления левого рукава в верхней его половине наиболее сложные, правого рукава – более простые, сопряженные, состоящие из двух звеньев. Водность Щучьей и Быстрой проток составляет соответственно 53 и 47% в межень и 40 и 60% в половодье [Белый и др., 1979].

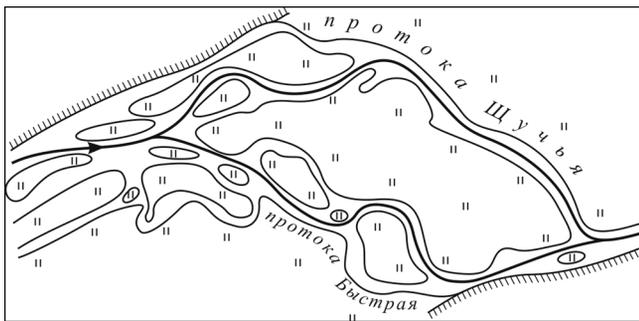


Рис. 4. Переформирования рукавов Щучьего пойменно-руслового разветвления р. Киренги

Fig. 4. Reorganization of channels of the Schuchyey floodplain-channel braided reach of the Kirenga River

Генетически разветвления на перевалах реки между бортами долины связаны с образованием элементарных островов, их эволюцией, меандрированием или разветвлением рукавов, что приводит к нарушению оптимального соотношения их длины L_0 и ширины B_0 в отношении гидравлических сопротивлений ($L_0/B_0 = 3-4$) [Baker, 1977; Komar, 1983] и превращению в островные массивы сложной формы, у которых $L_0/B_0 < 2$.

Другая разновидность пойменно-русловых разветвлений широкопойменных русел связана с крупными островными массивами или группами (архипелагами) островов, разделенными межостровными протоками, по которым осуществляется гидравлическая связь между обоими основными рукавами. Их шаг превышает ширину неразветвленного русла в 8–10 раз, ширину островов русловых разветвлений – в 3–4 раза, соответствуя их оптимальной форме. Находятся они ниже выступов и мысов коренных берегов, оказывающих на поток направляющее воздействие; рукав, проходящий вдоль него, относительно прямолинейный или осложненный разветвлениями. Второй рукав, огибая островной массив или «архипелаг» островов, имеет вид большой излучины сундучной (трапецевидной) формы, размеры

которой (шаг, радиус) превышают размеры излучин, свойственные данной реке; на крыльях или в вершинной части таких излучин могут быть одиночные разветвления, по размерам соответствующие водности рукавов. Такие разветвления, образованные большими островами (островными массивами), встречаются на Оби выше устья Томи (Умревинское, Барковское) и в среднем течении (Санинское), «архипелаги» островов образуют такое разветвление на нижней Лене (Белогорское) (см. рис. 1, В-1). При незначительности отклоняющего воздействия выступов коренного берега, отходящий от него рукав относительно маловоден, меандрирует (как на рис. 1, В-2); в других случаях основным по водности является рукав в пойменных берегах, тогда как рукав вдоль коренного берега характеризуется сложной разветвленностью и меньшей водностью.

Рассмотренные разновидности пойменно-русловых разветвлений – прерогатива в основном крупнейших рек с очень широкой поймой. Они распространены на средней Оби (ниже устья р. Томи), где при длине русла 950 км 12 участков с такими разветвлениями занимают 18% длины. Их нет на средней и нижней Лене, где ширина поймы $B_n \approx 3-4b_p$ (на Оби это соотношение >10), но встречается в виде отдельных, очень морфологически сложных участков (Белогорское разветвление). В то же время пойменно-русловые разветвления с меандрирующими рукавами встречаются на средних реках с очень широкой поймой (Ока, Вычегда).

Пойменно-русловые разветвления, формирующиеся при слиянии рек, отличаются рядом специфических особенностей, связанных с взаимодействием потоков главной реки и притока (слияние Оби и Томи, Амура и Буреи) и представляющих собой разновидности «дельтовых» разветвлений.

На широтном участке средней Оби (между устьями Ваха и Иртыша) находится три сходных по морфологии и переформированиям сложных трехрукавных пойменно-русловых разветвления с меандрирующими рукавами (см. рис. 1, Д). Они приурочены к истокам или устьям крупных пойменных проток и рукавов раздвоенного русла. В их пределах берут начало пойменные протоки: Кирьяс (доля расхода 18%), которая в прошлом была левым рукавом бывшего здесь пойменно-руслового разветвления, Покомас, являющаяся по существу верхним истоком Юганской Оби – левого рукава раздвоенного русла, и Большого Салымская протока – левый рукав второго участка средней Оби с раздвоенным руслом (доля расхода – 30%).

Причина образования этих пойменно-русловых разветвлений – размыв ее меандрирующими рукавами пойменных перешейков между основным руслом и пойменными протоками или вторым рукавом

раздвоенного русла. Размывы берегов на реках с пойменной многорукавностью и раздвоенным руслом вызывают наиболее масштабные перестройки русловой сети, особенно при активном меандрировании рукавов, приводят к образованию сложных трехрукавных пойменно-русловых разветвлений с извилистыми рукавами и прорванными излучинами. Образующиеся прораны вызывают перераспределение стока, происходит развитие ранее маловодных рукавов или пойменных протоков при одновременном обмелении и снижении водности бывшего основного рукава, активизации меандрирования и размывов берегов во вновь повышающих свою водность рукавах.

Эволюция форм русел рукавов раздвоенного русла и размывы поймы между ними (пойменные межрукавья), расчленение раздвоенных русел на части с превращением одного из рукавов в пойменную протоку на примере средней Оби (широтный участок) подробно рассмотрены в статье [Чалов и др., 2022]. Аналогичные последствия перестройки русловой сети происходят при размыве поймы между основным руслом и пойменными протоками, которые, принимая часть стока из него, превращаются во второй основной рукав, создавая пойменно-русловое разветвление. Таково происхождение разветвлений на Малой Оби – левого рукава раздвоенного русла в нижнем течении р. Оби: Межьюрского – Нарыкарского (см. рис. 1, Е) и Лапорского – Новинского.

Разновидность пойменно-русловых разветвлений – *прорванные излучины* на больших реках. Они образуются при достижении излучинами русла критических значений степени развитости $I/L > 1,7$, но их образование происходит, если руслоформирующий расход проходит при затопленной пойме (см. рис. 1, Ж). В зависимости от местных условий большая часть стока перемещается в спрямляющий излучину рукав, но спрямленный (старое русло) сохраняет большую водность; в этом случае спрямляющий рукав меандрирует, образуя две-три излучины, либо в нем формируются разветвления, параметры которых соответствуют его водности. Иногда спрямляющий излучину рукав забирает не более 20–30% расхода воды, консервируется в своем развитии, образует несколько излучин, слабо изменяющихся во времени (нижний Иртыш, Горная Обь – правый рукав раздвоенного русла нижней Оби). Такие рукава обычно располагаются ниже крупных изгибов коренных берегов, направляющих поток в старое русло.

Развитие прорванных излучин рукавов разветвленных русел иногда приводит к образованию морфологически сложных пойменно-русловых разветвлений и их регулярным перестройкам. В Саралевском разветвлении нижней Волги (рис. 5) за последние 100 лет такая излучина (она образовалась в конце XIX в.) из-за экстремально высоких ско-

ростей размыва вогнутых берегов (до 40–60 м/год [Попов, 1974]) дважды спрямлялась. Это привело к смещению захода в рукав на 6 км вверх по течению, и «назревает» очередное спрямление; если оно произойдет, заход в воложку Коршевитую сместится еще на 4 км вверх по течению.

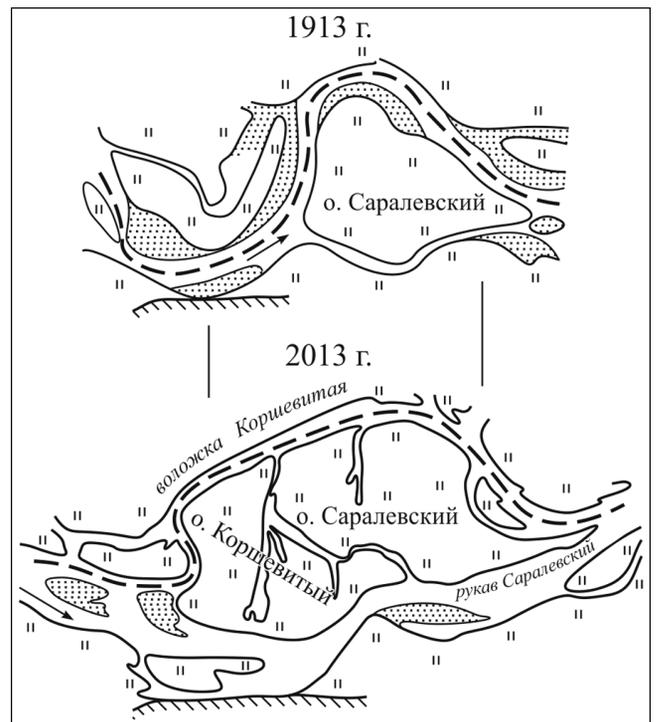


Рис. 5. Переформирования Саралевского узла разветвления с 1913 по 2013 г. (по [Попов, 1974; Атлас..., 2009])

Fig. 5. Reorganization of the Saralevskiy braided reach form 1913 to 2013 (according to [Popov, 1974; Atlas..., 2009])

В ряде случаев пойменно-русловые разветвления имеют *полигенетическое происхождение*. Таково описанное Нарымское разветвление на средней Оби, где разделение реки на три близких по водности рукава связано как с поперечным к оси днища долины расположением реки, так и с размывом пойменного перешейка между основным руслом и правым рукавом раздвоенного русла (Кетью Копыльвской). На верхней Оби (см. рис. 1, 3) ниже крутой Тарадановской излучины существовало двурукавное пойменно-русловое разветвление, в котором один рукав отходит от русла реки под прямым углом, располагаясь вдоль правого коренного берега, а второй, огибая островной массив, образовал сегментную развитую и несколько пологих излучин. Интенсивный размыв вогнутого берега излучины привел к размыву пойменного перешейка между руслом и пойменной протокой Старая Обь, нижняя часть которой превратилась, из-за отвлечения в нее значительной доли расхода воды, в третий основной рукав разветвления.

Подобные комбинированные пойменно-русловые разветвления встречаются на верхнем Енисее, нижней Лене, нижнем Иртыше. Во многих случаях они, как сложные трехрукавные образования, существуют в течение некоторого времени (десятки лет), после чего упрощаются из-за обмеления одного из рукавов, превращения его в пойменную протоку или причленения острова к пойме.

Во врезанном русле пойменно-русловые разветвления встречаются редко, будучи приуроченными к местным крупным расширениям, обычно, структурно-геологического происхождения. В Киренском расширении верхней Лены (см. рис. 1, И) ширина русла между коренными берегами увеличивается почти в 9 раз, причем длина заполняющего островного массива всего в 1,2 раза превышает ширину, а оба основных рукава образуют большие излучины. Образование таких разветвлений – следствие резкого растекания потока и его стеснение ниже по течению. Это происходит на фоне врезания реки рукавами, благодаря которому островные массивы имеют коренной цоколь, образующий иногда незатопляемые в половодье ядра таких островов.

ВЫВОДЫ

Пойменно-русловые разветвления – структурный уровень русловых процессов между русловыми (островными) разветвлениями и раздвоенными руслами. Они формируются в виде единичных образований, не создающих морфологически однородных участков, характеризующиеся в несколько раз большими размерами (по длине и ширине) русловых (островных) разветвлений и пойменных массивов (или архипелагов островов) между основными рукавами, имеющими сложную конфигурацию и отличающимися в каждом из них своим набором морфодинамических типов русла (до 3–5 излучин, разветвлений, прямолинейных участков). Соотношение длины L_0 и ширины B_0 островных массивов ($L_0/B_0 < 2$) меньше оптимального ($L_0/B_0 = 3-4$), типичного для островов, образующих русловые (островные) разветвления, и отвечающего минимуму гидравлических сопро-

тивлений. Характеризуясь квазиравноценным расщеплением стока по рукавам, параметры форм русел рукавов (излучин, разветвлений) зависят от их водности и различаются, соответственно, в обоих рукавах и от типа русла вне разветвлений.

На реках с меандрирующим руслом пойменно-русловые разветвления встречаются на средних и больших реках, в рукавах раздвоенных русел крупнейших рек при условии прохождения руслоформирующих расходов воды при затопленной пойме, там, где река перемещается от одного борта долины к другому. Это связано с несовпадением направлений руслового и пойменного потоков, неодинаковым при различной глубине разливов воды по пойме. При этом оба рукава сохраняют морфодинамический тип самого русла – они меандрируют. Такой же генезис имеют пойменно-русловые разветвления на реках с разветвленным руслом, но встречаются только на больших и крупнейших реках.

Пойменно-русловые разветвления формируются также ниже крупных мысов коренных берегов и изгибов долин вследствие их направляющего воздействия на поток в сторону затопленной поймы, расчлененной пойменными протоками, которые в этом случае трансформируются в многоводные рукава. Причиной их образования являются: внутрипойменные перехваты стока из-за размыва участков поймы и образования проранов между рукавами раздвоенного русла, руслом и пойменными протоками; развитие островов в узлах слияния рек; формирование прорванных излучин. Иногда сложные трех-четырёхрукавные разветвления имеют полигенетическое происхождение. На реках с врезанным руслом они встречаются редко, в больших местных расширениях русла (при соизмеримости ширины и шага островных массивов).

Наличие на реках пойменно-русловых разветвлений является важным фактором рассредоточения стока и русловых деформаций, который необходимо учитывать при транспортном освоении рек, прокладке коммуникаций через реки и других видах освоения речных ресурсов.

Благодарности. Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (исходные данные) при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-17-00086 П – натурные исследования, русловой анализ, типизация).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев О.В., Ярославцев И.А. Русловые процессы на участках рек с мостовыми переходами // Русловые процессы. М.: Изд-во АН СССР. 1958. С. 352–372.
Атлас русловой морфодинамики нижней Волги (Волгоград – Астрахань). М.: Изд-во Моск. ун-та. 2009. 232 с.
Белый Б.В., Беркович К.М., Борсук О.А., Зайцев А.А., Лодина Р.В., Чалов Р.С., Чернов А.В. Морфология, ди-

намика 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. 119–175.

Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт. 1972. 216 с.

- Ермакова А.С. Гидролого-морфологические характеристики и многолетние перестроения меандрирующего русла р. Кети // Эрозионные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. С. 77–82.
- Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат. 1975. 288 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 347 с.
- Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1971. 116 с.
- Попов И.В. Методические основы исследований руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1961. 208 с.
- Попов И.В. Прогноз русловых деформаций Волги на участке Саралевского водного узла в связи с проектированием улучшения условий судоходства // Тр. ГГИ. Вып. 216. 1974. С. 65–93.
- 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.
- Росинский К.И., Кузьмин И.А. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел // Проблемы регулирования речного стока. М.; Л.: Изд-во АН СССР. 1947. С. 88–129.
- Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: Журнал «РТ», 2012. 492 с.
- Смирнова В.Г. Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Алтайского региона: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: ИГ СО РАН, 2002. 20 с.
- Цянь Нин, Чжан Жень, Чжоу Цзыдэ. Русловой процесс. 1987. 584 с. (на китайском языке)
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Пойменно-русловые разветвления и особенности их формирования // Четырнадцатое пленарное межвуз. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Уфа: БашГУ, 1999. С. 215–217.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД. 2011. 960 с.
- Чалов Р.С., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Размыты пойменных берегов и эволюция форм русел рек как факторы перестройки русловой сети // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2022. № 5. С. 29–40.
- Чалов Р.С., Рулева С.Н., Камышев А.А., Беркович К.М., Завадский А.С., Михайлова Н.М. Верхняя и средняя Обь: русловые процессы и оценка условий управления ими // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 20. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2018. С. 140–195.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 259–271.
- Чалов Р.С., Чалова А.С., Голубцов Г.Б. О терминологии и классификации разветвлений русел равнинных рек // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 3. С. 48–63.
- Шэнь Юйчан, Гун Гоюань. Речная геоморфология. Пекин: Наука. 1986. 207 с. (на китайском языке)
- Baker V.R. Stream-channel response to floods, with examples from Central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1974.
- Chalov R.S., Aladyan A.M. Channel processes and tier role in river ecosystems. Study of erosion, river bed deformation and sediment transport in river basis as related to natural and man-made changes, *IHP. Technical Documents in Hydrology*, 1997, no. 10, UNESCO, Paris, p. 216–226.
- Komar P.D. Shaper of streamlined Island on the Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River channel patterns – braided, meandering and straight, *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 282-B, 1957, p. 1–85.
- Richards K.S. The formation of ripples and dunes in an erodible bed, *J. Fluid Mech.*, 1980, vol. 99, no. 3, p. 597–618.
- Rust B.R. Sedimentation in arid zone anastomosing fluvial system: Cooper creek. Central Australia, *J. Petrol*, 1981, vol. 51, no. 3, p. 745–755.
- Schumm S.A. The fluvial system, 1977, 338 p.

Поступила в редакцию 18.03.2022

После доработки 15.08.2022

Принята к публикации 22.09.2022

FLOODPLAIN-CHANNEL BRAIDED REACHES: FORMING CONDITIONS AND HYDROLOGICAL-MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS

R.S. Chalov

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology,
Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes
Professor, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: rschalov@mail.ru*

For the first time, the conditions for floodplain-channel braided reaches formation are analyzed, the criteria for their identification as a structural level of channel processes are justified, and their connection with river water content, channel regime, flooding of floodplains during high water periods and morphology of valleys is discussed. This type of braided reaches is characteristic of wide-floodplain channels, being a specific form of meandering processes of medium and large rivers, such as the Upper and Middle Ob', Vychehga, and Oka rivers. They are less common for rivers with braided channel and could be found only on large and largest ones

(the Severnaya Dvina, the Lower Lena rivers) and in meandering channel branches of split channels (Yuganskaya, Malaya, and Gornaya Ob' rivers). Such floodplain-channel braided reaches are the result of evolution of meanders or island-braided channels; they are formed as the river passes from one side of the valley to another due to the mismatch between channel and floodplain water flows during seasonal and flash flood periods. They could be formed if the effective water discharge occurs when the floodplain is inundated. They also arise: downstream large headlands of bedrock banks or bends of the valley, which have a directing effect on the flow, deflecting it towards the floodplain and contributing to higher water content in the floodplain channel branches and turning them into river channel branches; as a result of intra-floodplain interceptions of channel branches of split channel and floodplain channel branches; during the formation and evolution of cut-off bends; at confluences of large rivers due to the development of "delta" branches (Ob' and Tom' rivers, Amur and Bureya rivers). In floodplain-channel braided reaches with three or four branches they have a polygenetic character. They are rare in incised channels, being associated with large local expansions of channels (the Yenisey River, the Upper Lena River) as a result of water stream spreading and its rising because of the downstream narrowing by bedrock banks.

Between channel branches of the floodplain-channel braided reaches there are large island massifs of complicated shape, with much less ratio of their length (branching step) and width than the optimal one, i.e. 3–4, characteristic of island-braided channels of a drop-shaped or spindle-shaped form. The branches of floodplain-channel braided reaches have their own series of morphodynamic channel types (up to 3–5 bends or island-braided reaches), the parameters of which depend on the water content of channel branches.

Keywords: channel processes, floodplain-channel braided reaches, structural levels, meandering, islands, channel branches, runoff dispersal

Acknowledgements. The study was completed according to the plans of research work (GZ) of the Department of Land Hydrology and the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Lomonosov Moscow State University (initial data) and financially supported by the Russian Science Foundation (project 18-17-00086 P – field studies, channel analysis, typification)

REFERENCES

- Andreev O.V., Yaroslavcev I.A. [Channel processes on river reaches with bridge crossings], *Ruslovye processy* [Channel processes], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1958, p. 352–372. (In Russian)
- Atlas ruslovoi morfodinamiki nizhnei Volgi (Volgograd – Astrahan)* [Atlas of channel morphodynamics of the Lower Volga River (Volgograd – Astrahan)], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2009, 232 p. (In Russian)
- Baker V.R. Stream-channel response to floods, with examples from Central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1974.
- Belyj 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 in connection with the transport development of the BAM railway zone], *Eroziya pochv i ruslovye processy* [Soil erosion and channel processes], vyp. 7, Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1979, p. 119–175. (In Russian)
- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovyh processov* [Geographical studies of channel processes], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1979, 232 p. (In Russian)
- Chalov R.S. Poimennno-ruslovye razvetvleniya i osobennosti ih formirovaniya [Floodplain-channel braided reaches and features of their formation], *Chetyrnadcatoe plenarnoe mezhdunarodnoye soveshch. po probleme erozionnyh, ruslovyh i usnevnyh processov*, Ufa, BaschGU, 1999, p. 215–217. (In Russian)
- 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., Aladyan A.M. Channel processes and their role in river ecosystems, *Study of erosion, river bed deformation and sediment transport in river basin as related to natural and man-made changes*, *IHP. Technical Documents in Hydrology*, 1997, no. 10, UNESCO, Paris, p. 216–226.
- 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., Chalova A.S., Golubcov G.B. O terminologii i klassifikatsii razvetvlenii rusel ravninnykh rek [To the classification of braided channels of plain rivers], *Geomorfologiya*, 2021, vol. 52, no. 3, p. 48–63. (In Russian)
- Chalov R.S., Kurakova A.A., Mihailova N.M., Ruleva S.N. Razmyvy poimennykh beregov i evoluciya form rusel rek kak faktor perestroiki ruslovoi seti [Riverbank erosion and evolution of channel forms as factors of river channel network transformation], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2022, no. 5, p. 29–40 (In Russian)
- Chalov R.S., Ruleva S.N., Kamyshev A.A., Berkovich K.M., Zavadskij A.S., Mihajlova N.M. [The upper and middle Ob' River: channel processes and assessment of the conditions for their management], *Eroziya pochv i ruslovye processy* [Soil erosion and channel processes], vyp. 20, Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2018, p. 140–195. (In Russian)
- Cuan Nin, Chzhan Zhen, Chzhou Czyde, *Ruslovoi process* [Channel process], 1987, 584 p. (In Chinese)
- Ermakova A.S. [Hydrological and morphological characteristics and long-term dynamics of the Ket' River meandering channel], *Eroziionnye, ruslovye processy i problemy gidroekologii* [Erosion and channel processes and the problems of hydroecology], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2004, p. 77–82. (In Russian)
- Grishanin K.V. *Teoriya ruslovogo processa* [The theory of channel processes], Moscow, Transport Publ., 1972, 216 p. (In Russian)

- Karasev I.F. Ruslovyje processy pri perebroske stoka [Channel processes during runoff diversion], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
- Komar P.D. Shaper of streamlined Island on the Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Kondratyev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo processa* [Fundamentals of the hydromorphological theory of channel process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 272 p. (In Russian)
- Leopold L.B., Wolman M.G. River channel patterns – braided, meandering and straight, *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 282-B, 1057, p. 1–85.
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v yeye basseine* [River channel and erosion in its basin], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1955, 347 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I. *Stok i ruslovyje processy* [Water flow and channel processes], Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1971, 116 p. (In Russian)
- Popov I.V. *Deformacii rechnyh rusel i gidrotehnicheskoe stroitelstvo* [River channel changes and hydraulic engineering], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 328 p. (In Russian)
- Popov I.V. *Metodicheskie osnovy issledovaniy ruslovogo processa* [Methodological basis of research in channel processes], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 208 p. (In Russian)
- Popov I.V. Prognoz ruslovyh deformatsii Volgi na uchastke Saralevskogo vodnogo uzla v svyazi s proektirovaniem uluchsheniya uslovij sudohodstva [The forecast of channel changes of the Volga River at the Saralevsky water section in connection with the design of improving navigation conditions], *Trudy GGI*, vyp. 216, 1974, p. 65–93. (In Russian)
- Richards K.S. The formation of ripples and dunes in an erodible bed, *J. Fluid Mech.*, 1980, vol. 99, no. 3, p. 597–618.
- Rossinskij K.I., Kuzmin I.A. [Some questions of the applied theory of river channels formation], *Problemy regulirovaniya rechnogo stoka* [Problems of river flow regulation], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1947, p. 88–129. (In Russian)
- Ruslovyje processy i vodnye puti na rekah basseina Severnoi Dviny* [Channel processes and waterways on the rivers of the Severnaya Dvina River basin], Moscow, Zhurnal “RT” Publ., 2012, 492 p. (In Russian)
- Rust B.R. Sedimentation in arid zone anastomosing fluvial system: Cooper creek. Central Australia, *J. Petrol*, 1981, vol. 51, no. 3, p. 745–755.
- Rzhanicyan N.A. *Rusloformiruyushchie processy rek* [River channel forming processes], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 264 p. (In Russian)
- Schen Yuichan, Gun Goyuan. *Rechnaya geomorfologiya* [River geomorphology], Pekin, Nauka Publ., 1986, 207 p. (In Chinese)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, 1977, 338 p.
- Smirnova V.G. *Gidrologo-morfologicheskij analiz razvetvlenykh rusel rek Altaiskogo regiona* [Hydrologic-morphologic analysis of braided channels of the Altay region rivers], avtoref. dis. ... kan. geogaf. nauk, Irkutsk, IG SO RAN Publ., 2002, 20 p. (In Russian)

Received 18.03.2022

Revised 15.08.2022

Accepted 22.09.2022