

ДИНАМИКА ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.537; 551.435.133

РАЗМЫВЫ ПОЙМЕННЫХ БЕРЕГОВ И ЭВОЛЮЦИЯ ФОРМ РУСЕЛ РЕК КАК ФАКТОРЫ ПЕРЕСТРОЙКИ РУСЛОВОЙ СЕТИ

Р.С. Чалов¹, А.А. Куракова², Н.М. Михайлова³, С.Н. Рулева⁴

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, кафедра гидрологии суши*

^{3,4} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*

¹ *Д-р геогр. наук, проф.; e-mail: rschalov@mail.ru*

² *Аспирант; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

³ *Канд. геогр. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: nmmikhailova@yandex.ru*

⁴ *Канд. геогр. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: mnksl@vandex.ru*

Рассматриваются установленные основные схемы переформирования русел, приводящие к смене их морфодинамического типа и изменениям в структуре русловой сети в днищах речных долин, особенно на реках с разветвленным руслом. Размывы пойменных берегов рек на излучинах русла (в их привершинных частях и на крыльях) и излучинах рукавов разветвлений приводят к образованию проранов между рукавами, в том числе рукавами раздвоенных русел, основным руслом и пойменными протоками или руслами низовьев притоков (малых рек), протекающих в тыловых частях пойм главных рек. В результате происходит расчленение раздвоенных русел, превращение одного из рукавов в пойменную протоку или, наоборот, пойменной протоки в основной рукав (происходит «перехват» стока), формирование пойменно-русловых разветвлений, иногда трех- или четырехрукавных, из-за происходящего при этом перераспределения стока между рукавами. При этом возникают иногда нехарактерные для той или иной реки разновидности разветвлений. В меандрирующих руслах развитие прорванных излучин может явиться первоосновой для формирования раздвоенного русла, а само образование прорванных излучин создает условие для рассредоточения потока по вновь возникшим при спрямлении русла рукавам. Сложные изменения структуры русловой сети характерны для узлов слияния меандрирующих рек. Все эти трансформации – следствие эволюции (саморазвития) форм русел и размывов берегов, несвязанные с изменениями факторов русловых процессов (стока воды и наносов), что нужно учитывать при палеорусловых и палеогидрологических реконструкциях, а также при прогнозировании русловых деформаций и разработке проектов регуляционных мероприятий при водохозяйственном и водотранспортном освоении рек.

Ключевые слова: русловые процессы, излучины, рукава, разветвленное русло, пойменные протоки, раздвоенное русло, острова

ВВЕДЕНИЕ

Русловые деформации всегда приводят к изменению конфигурации, параметров и морфологии речных русел. В зависимости от условий их формирования они или очень замедленны, проявляясь на реках с врезанным руслом, берега которых сложены трудно, или практически не размываемыми горными породами или отложениями в течение геологических отрезков времени (условия ограниченного развития русловых деформаций), или совершавшиеся «на глазах», вызывая миграцию русла в пределах днища долины, сопровождаясь интенсивными размывами берегов, смещением излучин

и ростом извилистости русла, развитием одних и отмиранием других рукавов (широкопойменные русла в условиях свободного развития русловых деформаций). Это происходит обычно в ходе эволюции (саморазвития) форм русла (излучин, разветвлений) на протяжении многих лет и десятилетий и фиксируется за историческое время составленными картами и планами русел, а последнее столетие – космическими снимками. Такие переформирования достаточно хорошо изучены, им посвящена обширная литература [Маккавеев, 1955; Кондратьев и др., 1959; Попов, 1965; Чалов, 1979, 2011; Назаров, Егоркина, 2004; Schumm, 1977; Knighston, 1998;

Robert, 2003 и др.]. Но нередко они осуществляются очень быстро, приводя к перестройкам русла в очень короткие сроки, часто при прохождении экстремально высоких половодий и паводков или в годы повышенной водности. Первые характерны для рек Приморья [Гарцман и др., 2015], отличающихся регулярными катастрофическими наводнениями. Примером вторых являются прорывы серии излучин на Северной Двине у с. Красноторского в многоводный период конца XIX – начала XX в., охвативший участок реки длиной около 30 км [Каргаполова, 2006], и массовое спрямление излучин на верхней Каме в XV–XVI и в XIX – начале XX вв. [Назаров и др., 2014]. То же происходит при достижении излучинами русла или рукавов разветвлений критических значений параметров, вследствие чего они спрямляются с образованием прорванных излучин. Таковы перестройки Саралевского разветвления на нижней Волге, в котором только за XX в. дважды произошло спрямление крутой излучины на заходе в левый рукав – протоку Коршевитую [Попов, Кондигерева, 1974; Чалов, Завадский, 2019]. Известны оценки таких перестроек русловой сети в течение позднего плейстоцена – голоцена на основе палеоруслового анализа рельефа поймы и палеогидрологических реконструкций [Чернов, Гаррисон, 1981; Панин и др., 1992; Сидорчук и др., 2000]. В последнее время появились работы, в которых современная трансформация русла (изменение их морфодинамического типа) связывается с происходящим увеличением стока и другими изменениями природной среды и климата [Чалов и др., 2019].

В то же время практически неосвоенными остаются перестройки речной сети, особенно на больших и крупнейших реках, связанные с размывами пойменных берегов и эволюцией форм русел, приводящих к образованию проранов и перераспределению стока между основным руслом и бывшими второстепенными рукавами и пойменными протоками, изменению их роли в русловом режиме рек. Формы таких перестроек достаточно разнообразны, сопровождаясь перераспределением стока воды и возникновением водохозяйственных и воднотранспортных проблем. Задача настоящей статьи – на конкретных примерах рассмотреть основные типы таких перестроек русловой сети, их связь с морфологией и устойчивостью русел, последствия при освоении речных ресурсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены результаты многолетних исследований русловых процессов на реках Северной Евразии, позволившие выполнить анализ

переформирования русел, установить их основные типы и роль размывов пойменных берегов и эволюции форм русел как непосредственные причины перестройки русловой сети. Натурные (полевые) исследования включали измерения расходов воды в рукавах, протоках и образующихся проранах, в том числе с использованием современной аппаратуры (доплеровский измеритель течений), поперечных уклонов водной поверхности, определение темпов и протяженности фронта размыва и литологии размываемых берегов, съемку и промеры русла, его рукавов и протока. Полученные материалы накладывались на ретроспективный анализ переформирования русла, выполняемый по сопоставлению (совмещению) разновременных лоцманских карт и карт русел судоходных рек, издаваемых регулярно с интервалом 5–15 лет в течение XX в. (последние карты были изданы в начале XXI в.), а также планов перекатных участков, ежегодно получаемых изыскательскими партиями на водных путях. Использовались и сопоставлялись космические снимки за период 1968–2019 гг. серии CORONA KH, Landsat 5 TM, Sentinel-2, что позволило определить скорости размыва (отступления) берегов и их изменение во времени, а по рельефу поймы реконструировать прошлые положения береговых линий там, где временные изменения переформирования выходят за пределы показателей, имеющихся в документальных источниках.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Размывы берегов рек – наиболее яркое проявление русловых деформаций. Сопровождаясь образованием прирусловых отмелей у противоположных берегов (их намывом), они обуславливают изменение параметров русловых форм, их продольное и поперечное смещение, возрастая по мере искривления потока, при увеличении углов подхода его к берегам или уменьшении при спрямлении русла. Эти изменения во времени связаны с трансформацией кинематической структуры потока (по выражению М. А. Великанова [1958]: «Поток управляет руслом, но русло управляет потоком»), но скорости размыва всегда зависят также от литологии слагающих берега отложений, от устойчивости русла, мощности потока [Куракова, Чалов, 2020]. Размывы/намывы берегов рек в пределах излучин или разветвлений сопровождаются изменением их конфигурации. Например, излучина русла со временем превращается из пологой сегментной в крутую и, если на этой стадии не происходит ее спрямление, в петлеобразную; искривление из-за размыва, вогнутого (намыва выпуклого) берега на изгибах русел рукавов приводит к перераспределению расходов воды меж-

ду ними, обмелению одного и развитию другого (и активизации в нем размывов берегов). Но в этих случаях перестройка русловой сети не происходит, имеют место лишь изменения положения, параметров и очертаний форм русла. Скорости же размыва берегов в зависимости от сочетания всех факторов и условий изменяются на разных реках в очень широких пределах. Так, на средней и нижней Оби они находятся в пределах (по максимальным значениям) от 1,5–2 до 10–15 м/год, тогда как на нижней Волге в Саралевском разветвлении зафиксированы до 60 м/год [Попов, Кондирева, 1974].

Спрявление излучин можно рассматривать как элементарную форму перестройки русла. В зависимости от условий спрявление осуществляется в двух основных вариантах. Первый – при достижении в процессе эволюции стадии развитой или крутой излучины [Чалов и др., 2004] со степенью развитости $l/L = 1,4 \div 2,0$ (l – длина русла по излучине, L – ее шаг), но при условии прохождения руслоформирующего расхода при глубоко затопленной пойме и образования через пойменную шпору излучины транзитного течения. В этом случае роль размывов берегов, скорость которых воз-

растает при увеличении l/L , сводится к достижению излучиной критических величин l/L , но само спрявление происходит путем образования спрямляющей протоки обычно в тыловой части шпоры. В результате формируется прорванная излучина (по терминологии ГГИ [Попов, 1965; Кондратьев и др., 1982] – незавершенное меандрирование), создающая разветвление русла, в котором функционируют и новое спрямленное русло, и старое. В зависимости от местных условий распределение расходов воды между ними может быть различным. Формирование прорванных излучин на смежных излучинах может привести к образованию трех-, четырехрукавного пойменно-руслового разветвления с меандрирующими рукавами (рис. 1). Возможна трансформация серии прорванных излучин в пойменную многорукавность или даже в раздвоенное русло, когда рукава прорванных излучин сосредотачивают потоки воды, затопившей пойму, объединяются, образуя пойменные протоки (ответвления) или альтернативные основному руслу рукава, равноценные ему по водности. Такого, по-видимому, происхождения раздвоенных русел на широтном участке средней и на нижней Оби.

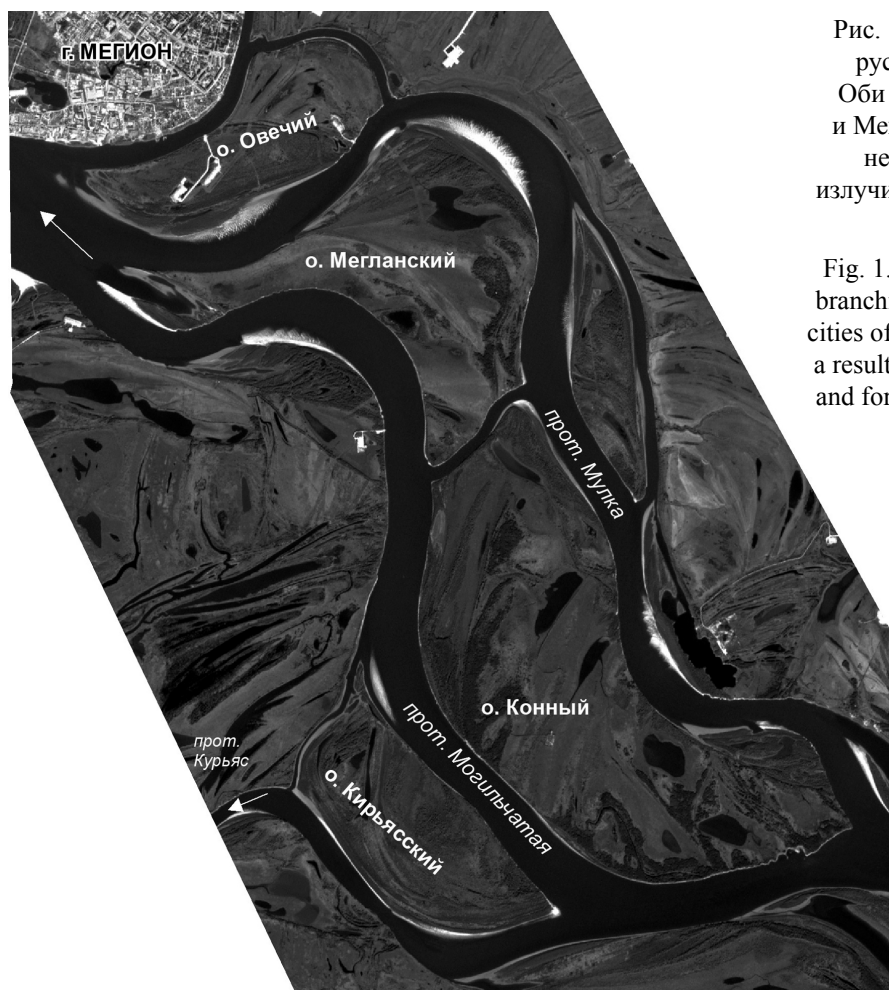


Рис. 1. Сложное трехрукавное пойменно-русловое разветвление русла средней Оби (между городами Нижневартовском и Мегионом), образовавшееся вследствие неоднократного спрямления крутых излучин и образования прорванных излучин (космоснимок)

Fig. 1. Complex three-arm floodplain-channel branching of the Middle Ob River (between the cities of Nizhnevartovsk and Megion), formed as a result of repeated straightening of acute bends and formation of cut-off bends (satellite image)

Второй вариант – если излучина на стадии развитой или крутой не спрямляется, то она со временем приобретает петлеобразную форму, и тогда ее спрямление возможно благодаря встречному размыву берегов в верхнем и нижнем крыльях, т.е. именно размывы берегов на крыльях излучин, трансформация шпоры в шейку петлеобразной излучины и последующее ее уничтожение при сближении раз-

мываемых берегов. Образующиеся при этом староречья, отшнуровываются от русла, превращаясь в старичные озера. Иногда староречье заполняется наносами и зарастает в верхней своей части, тогда как нижняя сохраняется в виде залива – курьи. Таким образом, собственно перестройка русла завершается спрямлением излучины, отмиранием старой и развитием новой (рис. 2).

Более масштабны перестройки русловой сети из-за размыва берегов на реках с разветвленным или раздвоенным руслом с развитой пойменной многорукавностью. Рукава раздвоенных русел характеризуются развитием русловых (островных) разветвлений, меандрируют или, при расположении вдоль коренных берегов, имеют относительно прямолинейное русло, но с извилинами динамической оси потока, огибающем побочни, либо с осередковыми или островными разветвлениями второго порядка. Во всех случаях стрежень потока изгибается, прижимаясь к вогнутым берегам (излучин или противоположным островам, осередкам и побочням), вызывая их размыв, скорость которого зависит от степени развитости изгиба (излучин, извилины динамической оси потока) и водности рукавов (проток). Размывы берегов приводят к расчленению больших островов, размывам пойменных перешейков между основным руслом и пойменными протоками или рукавами раздвоенного русла. Образующиеся прораны вызывают перераспределение стока, вследствие чего происходит развитие бывших ранее маловодными рукавов или пойменных проток при одновременном обмелении и утрате значимости бывшего основного рукава и т.д. Среди всего многообразия таких перестроек русловой сети разветвленных русел выделяется несколько их наиболее характерных схем развития.

1. Эволюция форм русел рукавов раздвоенного русла и размывы поймы между ними (пойменные межукавья, по [Смирнова, 2002]) приводят к расчленению раздвоенных русел на части с превращением на участке разрыва одного из рукавов в пойменную протоку. На средней Оби (широтный участок) таким образом произошло разделение левого рукава раздвоенного русла на три составляющие (Юганскую Обь, Большую Салымскую протоку и протоку Неулеву). В верхней части Юганской Оби ее протяженный отрезок трансформировался в пой-

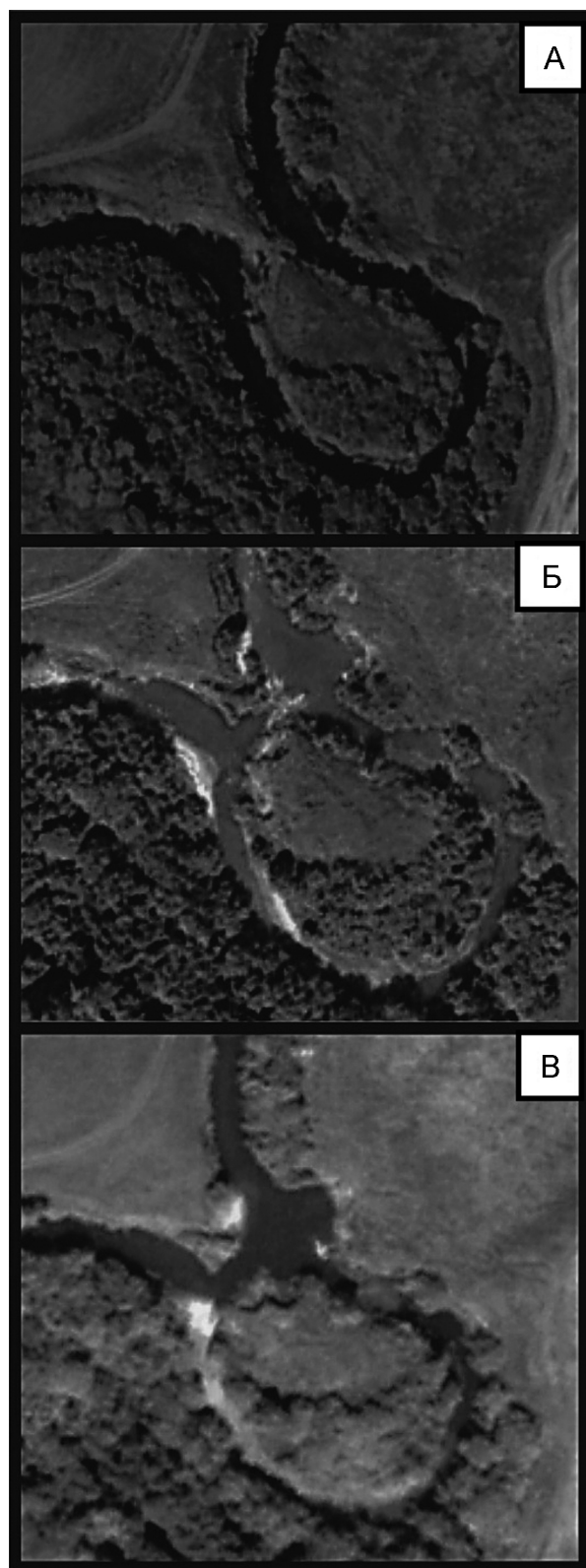


Рис. 2. Спрявление петлеобразной излучины р. Озерки (Приволжская возвышенность) вследствие встречного размыва берегов и отмирание старого русла: А – 2007 г.; Б – 2010 г.; В – 2012 г.

Fig. 2. Straightening of the loop-shaped bend of the Ozerki River (Volga Upland) due riverbank erosion and the dying off of the old channel: А – 2007; Б – 2010; В – 2012

менную протоку Покомас и в левый рукав – протоку Пеньковскую самостоятельного трехрукавного пойменно-руслового разветвления вследствие размывов вогнутых берегов излучин. В последнем случае (рис. 3А) сток Юганской Оби ниже образовавшегося прорана, который, размываясь, сейчас расширился на 2,5 км, был перехвачен основным правым рукавом реки, а часть самого русла превратилась в пойменную протоку Покомас (ее водность в половодье не превышает 5% от стока Оби), впадающую ниже по течению в Юганскую Обь. Остальная верхняя часть Юганской Оби (сейчас это протока Пеньковская) вошла в состав пойменно-руслового разветвления; излучина, размывы вогнутого берега которой привели к перестройке русла, достигнув степени развитости, превышающей критическое значение ($l/L = 1,8$, где l – длина русла по излучине, L – ее шаг), спрямилась (это произошло в 1980-е гг.),

образовав протоку Быструю. В результате возникло сложное пойменно-русловое разветвление с тремя меандрирующими рукавами, водность которых составляет от стока реки 19% (Пеньковская протока), 27% (спрямленная излучина – центральный рукав разветвления) и 67% (протока Быстрая – сейчас судоходный рукав).

Аналогичная перестройка рукавов, приведшая к разделению единого левого рукава раздвоенного русла, произошла между современной Юганской Обью и Большой Салымской протокой, где в результате размывов пойменных перешейков, спрямления и образования прорванных излучин также образовалось сложное трехрукавное пойменно-русловое разветвление с меандрирующими рукавами (рис. 3Б), водность которых составляют левый, бывший в прошлом частью рукава раздвоенного русла (23%), центральный судоходный (Омулька, 48%) и правый (Сытоминка, 30%) протоки.

Участок русла между слиянием правого рукава с Большой Салымской протокой и ответвлением от нее протоки Неулева образовался из-за встречного размыва берегов в обоих рукавах и «перехвата» стока бывшего правого рукава Оби, который теперь превратился в пойменную, но достаточно многоводную Чебыковскую протоку (рис. 3В), доля стока в которой в половодье составляет 16%.

2. Противоположные последствия перестройки русловой сети происходят при размыве пойменных берегов между основным руслом и пойменными протоками, которые в этом случае, принимая часть

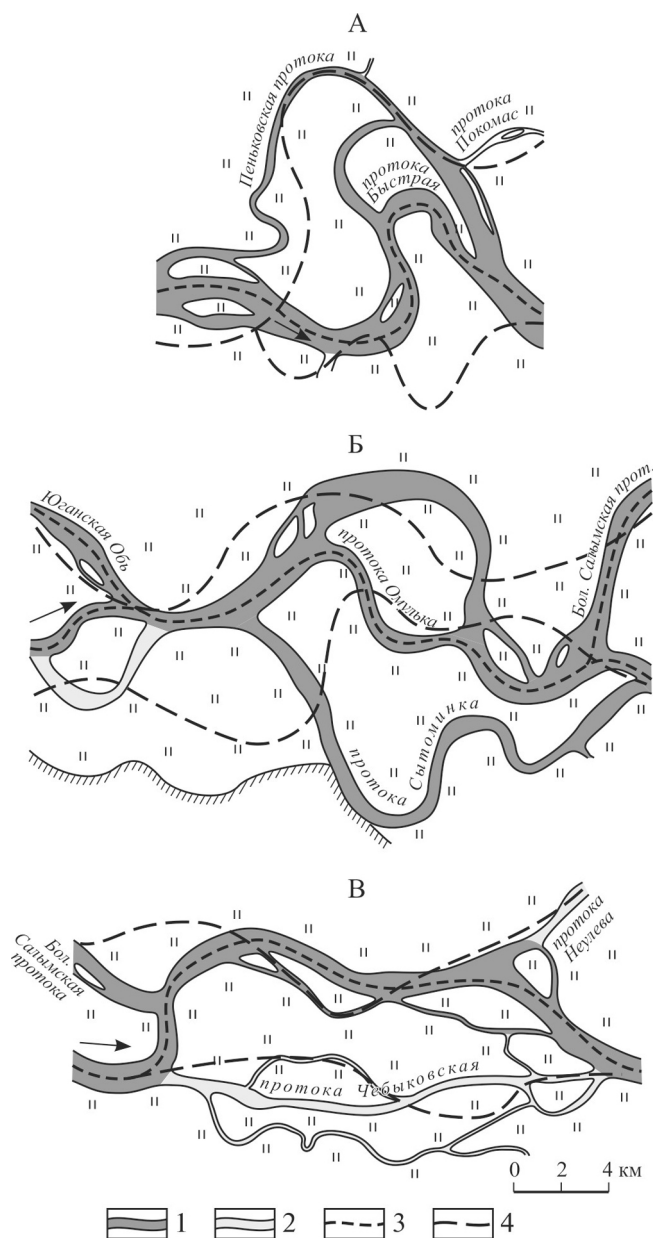


Рис. 3. Трансформация раздвоенного русла средней Оби вследствие размыва берегов на излучинах основных рукавов (реставрация по рельефу поймы): А – превращение верхней части Юганской Оби в современный рукав в сложном пойменно-русловом разветвлении – протоку Пеньковскую и пойменную протоку Покомас; Б – расчленение левого рукава раздвоенного русла на Юганскую Обь и Большую Салымскую протоку и образование сложного трехрукавного пойменно-руслового разветвления между ними; В – расчленение Большой Салымской протоки и образование пойменной протоки Чебыкинской: 1 – русла рукавов; 2 – пойменные протоки; 3 – трасса судоходного пути в рукавах; 4 – положение рукавов (их осей)

Fig. 3. Transformation of the bifurcated channel of the Middle Ob River due to riverbank erosion at the bends of the main branches (reconstruction according to floodplain relief): A – transformation of the upper part of the Yuganskaya Ob River into a modern branch of a complex floodplain-channel branching – the Penkovskaya channel and the Pokomas floodplain branch; Б – dissection of the left branch of the bifurcated channel into the Yuganskaya Ob River and the Bolshaya Salym channel and the formation of a complex three-arm floodplain-channel branching between them; В – dissection of the Bolshaya Salym channel and the formation of the Chebykinskaya floodplain branch; 1 – channels; 2 – floodplain branches; 3 – route of the fairway in the channels; 4 – position of the channels (their axes)

стока из него, превращаются во второй основной рукав, создавая пойменно-руслевое разветвление. Таково происхождение нескольких таких разветвлений на Малой Оби – левого рукава раздвоенного русла в нижнем течении р. Оби: Межьюрско-Нарыкарского длиной 21 км и Лапорско-Новинского – 9 км. Их образование (в условиях, нехарактерных для формирования такого типа разветвлений) связано с развитием крутых излучин и размывов в их привершинных частях пойменных перемычек, отделявших русло Малой Оби от текущих субпараллельно ей пойменных протоков (рис. 4). Во вновь образовавшемся Межьюрско-Нарыкарском разветвлении водность нижней части бывшей поймен-

ной Нарыкарской протоки увеличилась до 31%, и, как следствие, она превратилась в рукав пойменно-руслевое разветвления. Шпора излучины Малой Оби, в вершине которой находится узел ее разветвления с Нарыкарской протокой, состоит из двух островов – Межьюр и Безымянный, представляющих собой остатки пойменных перемычек в виде островов, отделяющих Малую Обь от пойменной протоки. Это обуславливает сложную систему расщепления стока, в результате чего в основном рукаве Малой Оби (в нижнем крыле излучины) остается 29% расхода воды в ней, создавая вместе с переформированиями самого русла серьезные затруднения для судоходства.

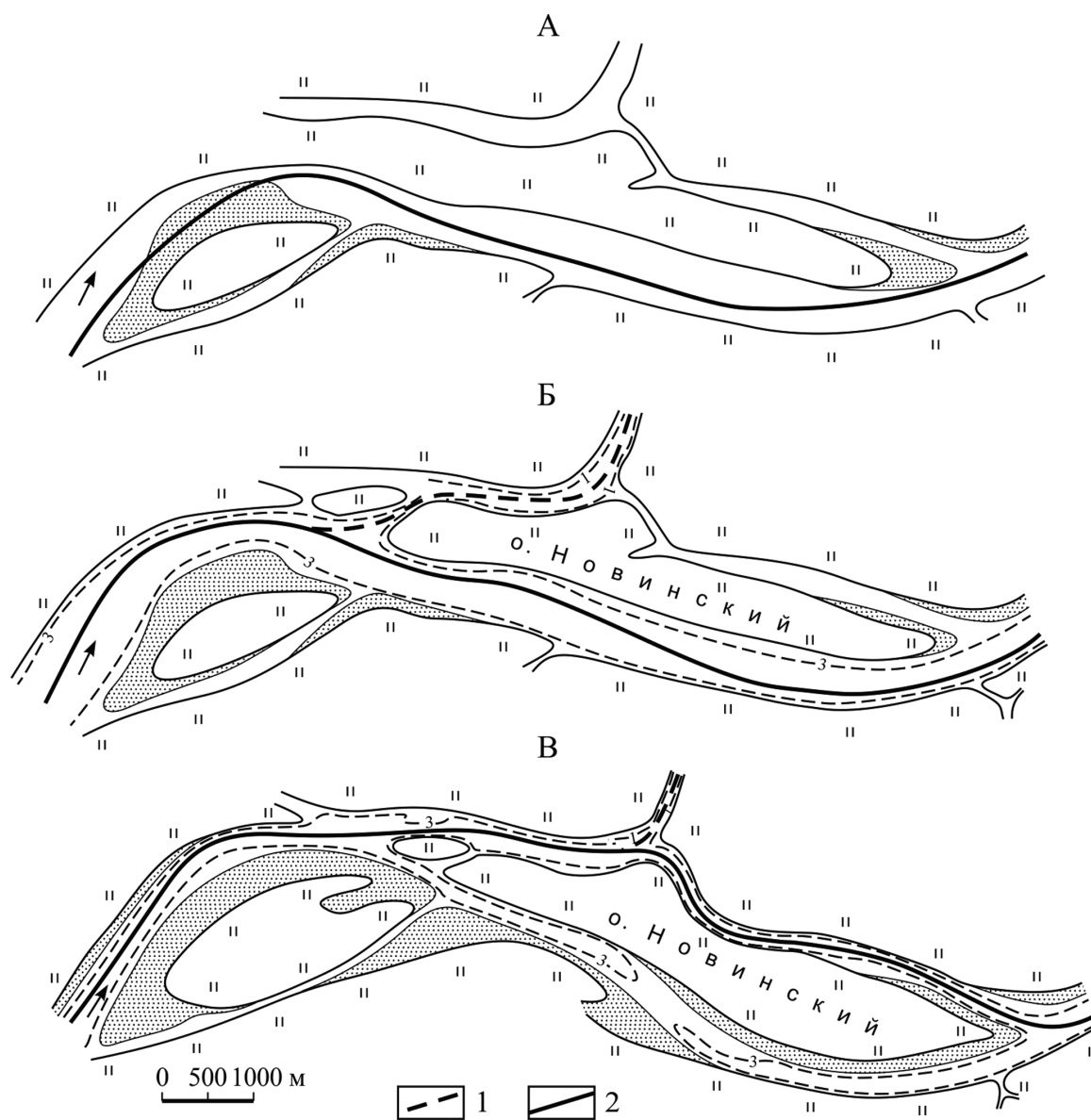


Рис. 4. Формирование Лапорско-Новинского пойменно-руслевое разветвления Малой Оби: А – реконструкция на конец XIX – начало XX в.; Б – 1976 г.; В – 2014 г.; 1 – основной судовой ход; 2 – дополнительный судовой ход

Fig. 4. Formation of the Laporsko-Novinsky floodplain-channel branching of the Malaya Ob River: A – reconstruction at the end of the 19th – beginning of the 20th centuries; Б – 1976; В – 2014; 1 – main fairway; 2 – additional fairway

В Лапорско-Новинском разветвлении еще большее развитие получил левый рукав – бывшая пойменная протока, ставшая судоходной и забирающая из Малой Оби 46% ее расхода.

Ниже по течению при слиянии Малой Оби с Малой Горной Обью размыв пойменного перешейка привел к смещению узла слияния основных рукавов раздвоенного русла вверх по течению на 10 км, образованию о. Шурышкарского и пойменно-руслового разветвления, в котором левый рукав почти полностью питается водами Малой Горной Оби и лишь частично Малой Оби.

3. На реках с разветвленным руслом довольно часто перестройка рукавов связана с размывами берегов островов и расчленением их на два, реже три острова. Обычно это происходит в связи с развитием излучин одного или обоих рукавов. Вследствие этого сначала сужается остров в его средней части, а затем образуется проран, по которому начинается перераспределение стока между рукавами, приводящее к обмелению одного из них ниже прорана и активизация второго. На Северной Двине в конце XX в. выше ее слияния с Выгедой (рис. 5) был разделен пополам о. Котласский, и в левый несудоходный рукав – полый Межниковский перешло главное течение реки, в него была перенесена трасса судового хода, причем в обмелевшем бывшем судоходном рукаве (точнее его нижней части) остались акватория речного вокзала и ряд причалов речного порта. Аналогично расчленился большой о. Кенели на р. Лене в сложном трехрукавном разветвлении, что привело к окончательному обмелению нижней части левого рукава – Хайтыалахской протоки, бывшей 10–15 лет назад судоходным рукавом, перераспределению стока в центральный рукав – протоку Прямую. Выше по течению (в 10–20 км) ожидается такое же расчленение о. Баакыч, размывы которого со стороны правого рукава достигают 15–20 м/год, формируется четко выраженная вогнутость в его конфигурации. Ширина острова в этом месте в настоящее время составляет около 300 м (в 1970–1980-е гг. более 0,5 км). Таким образом, через 15–20 лет на этом участке лишь благодаря размыву берегов и расчленению островов произойдет кардинальное изменение структуры разветвлений.

4. Размывы берегов поймы, в тыловой части которой располагаются русла ее притоков, также являются нередко причиной перехвата стока главной реки или притока и возникновения сложных разветвлений. Наглядным примером этому служит средняя Обь. В районе границы Новосибирской и Томской областей у с. Батурино от нее ответвляется протока Симан длиной 42,5 км относительной водностью 30% при ширине разделяющего их пойменного массива 9 км [Русловые процессы..., 2001].

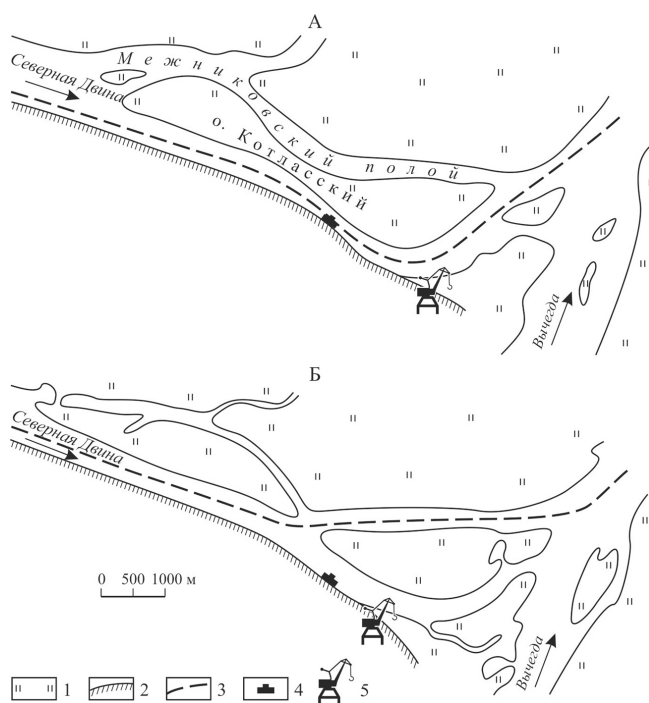


Рис. 5. Расчленение о. Котласского на р. Северной Двине из-за встречного размыва берегов в правом судоходном рукаве и левом рукаве – Межниковский полый: 1 – пойма; 2 – коренной берег; 3 – судовый ход; 4 – речной вокзал; 5 – грузовые причалы

Fig. 5. Partition of the Kotlassky Island on the Northern Dvina River due to riverbank erosion in the right navigable branch and the left branch – the Mezhnikovskaya channel: 1 – floodplain; 2 – valley side; 3 – fairway; 4 – river station; 5 – cargo berths

Образование этого рукава связано с размывами ее левого пойменного вогнутого берега, приведшее к тому, что была уничтожена пойменная перемычка между главной рекой и ее притоком – малой рекой Уень, текущей в тыловой части поймы. Размыв перемычки привел к «прорыву» обских вод в нижнюю часть Уени, русло которой углубилось, расширилось и превратилось в рукав Оби – протоку Симан. В свою очередь, в нижней части этого вновь возникшего раздвоенного участка реки размывы вогнутого берега излучины левого рукава пойменно-руслового разветвления Оби привели к отчленению нижней части пойменного массива (рис. 6), и по образовавшемуся прорану 15% расхода воды в протоке Симан возвращается в Обь.

Аналогичная ситуация сложилась в устье р. Кети, которая на протяжении нескольких десятков километров протекает в тыловой части правобережной поймы Оби. Встречные размывы берегов со стороны главной реки и притока привели к отчленению нижней части разделяющего реки пойменного массива в районе п. Нарыма и образованию на Оби пойменно-руслового разветвления, в правый рукав которого – бывшие самые низовья

р. Кети – направляется часть стока Оби. В совокупности с существующими на Оби разветвлениями русла здесь теперь находится сложный трехрукавный узел с равноценными по водности рукавами.

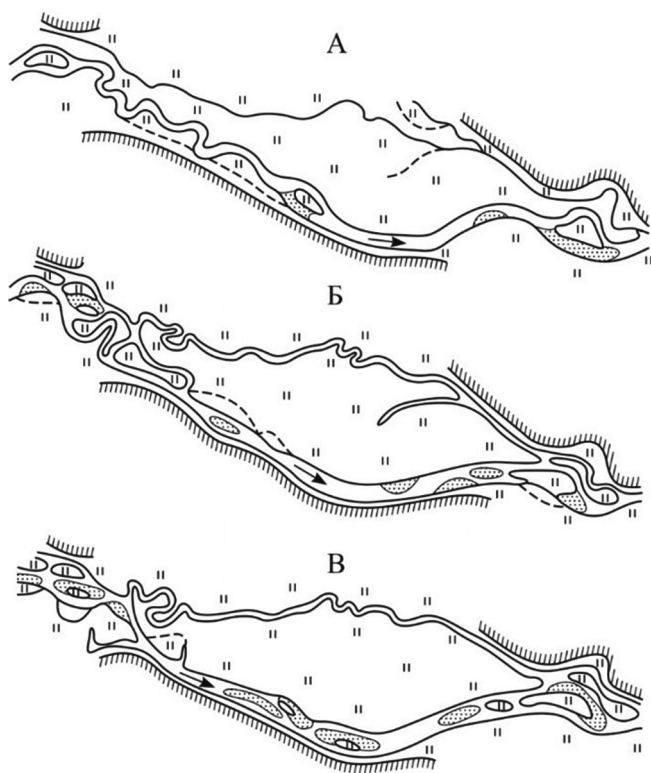


Рис. 6. Образование разветвленного русла на верхней Оби вследствие размыва поймы и переброски части стока в р. Уень – современную протоку Симан

Fig. 6. Formation of a branched channel in the Upper Ob River due to floodplain erosion and partial transfer of water runoff to the Uen River – the modern Siman channel

5. Размывы берегов в узле слияния главной реки и притока в тех случаях, когда последний, как р. Кеть, не течет в тыловой части поймы, а пересекает ее, приводит к сложной перестройке русла на устьевых участках обеих рек. При этом либо главная река через образовавшийся проран перемещается в низовья притока, либо устье последнего смещается вверх по течению, а бывший приустьевой участок притока отмирает [Чалов, Рулева, 2014]. Значительно чаще встречаются «подрезки» из-за размыва берегов устьевых участков малых рек – притоков больших рек. Остатки брошенных русел из-за происшедшего «перехвата» стока можно видеть вдоль прирусловой поймы как выше, так и ниже современного устья малой реки в виде небольших островков, отделенных серповидными в плане протоками и представляющих собой шпоры бывших излучин малой реки.

6. Меандрирования рукавов больших рек, сопровождающиеся интенсивными размывами вогнутых берегов, приводят в ряде случаев к регулярным, местами очень существенным перестройкам русла в узлах разветвлений. Так, в Саралевском разветвлении на нижней Волге за последние 100 лет развитие излучины на заходе в левый рукав – воложку Коршевитую происходило с экстремально высокими скоростями – 40–60 м/год (зафиксированы в отдельные годы 160–170 м/год [Попов, 1974]), в результате чего быстро менялась ее конфигурация, она становилась очень крутой и дважды (около 1960 и в начале 1980-х гг.) спрямлялась. Это привело к смещению захода в рукав на 6 км вверх по течению, и в последнее время «назревает» очередное спрямление из-за интенсивных размывов вогнутого берега [Чалов и др., 2019]. Если это произойдет, заход в воложку сместится еще на 4 км вверх по течению (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Размывы пойменных берегов, являющиеся прямым следствием эволюции форм русла – излучин, разветвлений, в то же время приводят к уничтожению перемычек между крыльями крутых излучин, параллельно расположенными рукавами или руслом реки и пойменными протоками, перераспределению стока и, в конечном итоге, перестройкам русловой сети. Особенно существенные изменения при этом происходят на реках с разветвленным руслом и развитой пойменной многоорукавностью. При всем многообразии подобных перестроек, вызванных размывами берегов и эволюцией форм русла, выделяются следующие их наиболее типичные схемы:

1. Меандрирование русел, их продольно-поперечное смещение и размывы вогнутых берегов излучин приводят к их искривлению, и при достижении критических значений степени развитости $l/L = 1,4-1,7$ возможно спрямление во время половодья через шпору с образованием прорванных излучин и рассредоточение стока по новому руслу и староречью.

2. Если спрямление через шпору излучины не происходит, она трансформируется в петлеобразную, в пределах которой происходит встречный размыв берегов на ее крыльях, вызывающий образование прорана между ними. В этих случаях старое русло быстро отмирает, образуя старичное озеро, а в новом формируется излучина, направление развития которой обычно иное, чем было раньше, сопровождается изменением ее положения в днище долины и интенсивными размывами берегов, особенно на первых этапах, пока форма излучин не придет в соответствие с характеристиками потока.

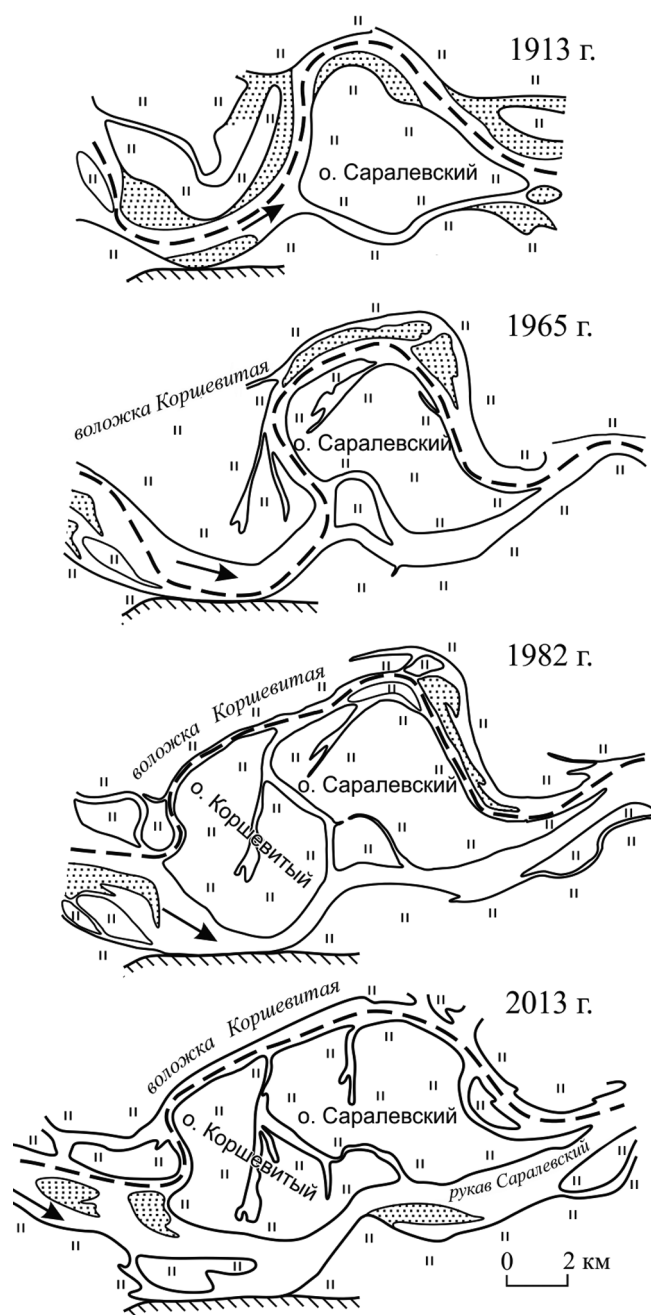


Рис. 7. Переформирование Саралевского узла разветвления русла на нижней Волге

Fig. 7. Reformation of the Saralian channel branching on the Lower Volga River

Благодарности. Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и НИ Лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РНФ (проекты 18-17-00086 и 18-17-00086 П – переформирование русел рек, разветвление на рукава) и РФФИ (проект № 20-35-90003/20 – размывы берегов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Великанов М.А. Русловой процесс (основы теории). М.: Госфизматгиз, 1958. 395 с.
- Гарцман Б.И., Шамов В.В., Губарева Т.С. Речные системы Дальнего Востока России: четверть века исследований. Владивосток: Дальнаука, 2015. 492 с.
- Каргаполова И.Н. Реакция русел рек на изменения водности и антропогенное воздействие за последние столетия: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2006. 27 с.

Во всех случаях эволюции излучин, размывов их вогнутых берегов и спрямления из-за образования проранов через их шпору, кардинальной перестройки русла не происходит. Более разнообразны последствия размыва берегов на реках с разветвленным руслом, приводящие к существенным изменениям структуры разветвлений, ее усложнению, а иногда и к смене морфодинамического типа.

1. Размыв пойменных массивов, разделяющих рукава разветвленных русел, приводит к их расчленению, перехвату стока одних рукавов, превращению других в пойменные протоки или образованию сложных трехрукавных пойменно-русловых разветвлений.

2. Размывы вогнутых берегов излучин между основным руслом реки (или рукавом раздвоенного русла) и пойменной протокой приводит к перехвату части стока реки, превращению протоки во второй основной рукав и образованию пойменно-руслового разветвлений.

3. При размыве поймы между руслом главной реки и протекающим в тыловой части притоком – малой реки ниже образующегося прорана – русло малой реки становится многоводным, превращаясь в рукав вновь сформировавшегося раздвоенного русла. Если такой приток – достаточно крупная река, то ниже прорана формируется пойменно-русловое разветвление, а устье притока смещается вверх по течению.

4. В узлах слияния рек одного (или близкого) порядка встречные размывы берегов на каждой из них приводят к сложной перестройке устьевых участков, перехвату притоком главной реки или, наоборот, меняется вся конфигурация узла слияния вплоть до формирования сложных разветвлений русел.

5. Если рукава разветвленного русла меандрируют, то размывы берегов и образование прорванных излучин приводят к образованию трех- и четырехрукавных разветвлений с меандрирующими рукавами, образованию прорванных излучин в рукавах и регулярному перераспределению стока.

- Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В., Пиньковский С.И., Фёдоров Н.Н., Якунин И.И. Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 372 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
- Куракова А.А., Чалов Р.С. Морфология русла и размыты берегов нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2020. № 6. С. 41–50.
- Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Назаров Н.Н., Копытов С.В., Фролова И.В., Черепанова Е.С. Русловые изменения верхней Камы в исторических документах и фольклоре // Двадцать девятое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Ульяновск: УлГПУ им. И.Н. Ульянова, 2014. С. 112–114.
- Назаров Н.Н., Егоркина С.С. Реки Пермского Прикамья: горизонтальные русловые деформации. Пермь: Звезда, 2004. 155 с.
- Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Чернов А.В. Макроизлучины рек ЕТС и проблемы палеогидрологических реконструкций // Водные ресурсы. 1992. Т. 19. № 4. С. 93–96.
- Попов И.В., Кондигерева Э.А. Прогноз русловых деформаций Волги на участке Саралевского водного узла в связи с проектированием улучшения его судоходных условий // Тр. ГГИ. 1974. № 216. С. 65–93.
- Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
- Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Чернов А.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.Н. Сток воды и морфология русел рек Русской равнины в поздневалдайское время и в голоцене (по данным палеоруслового анализа) // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 12. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. С. 196–230.
- Смирнова В.Г. Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Алтайского региона: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: ИГ СО РАН, 2002. 20 с.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2: Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлев П.П., Морозова Е.А., Сурков В.В. Покровско-Якутский водный узел на р. Лене: современные деформации и управление русловыми процессами // Изв. РАН. Сер. географ. 2019. № 6. С. 83–96.
- Чалов Р.С., Завадский А.С. Саралевский воднотранспортный узел и проблемы улучшения условий судоходства на нижней Волге // Речной транспорт (XXI век). 2019. № 4. С. 20–23.
- Чалов Р.С., Рулева С.Н. Влияние переформирования русел на развитие узлов слияния рек // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 161–168.
- Чернов А.В., Гаррисон Л.М. Палеогеографический анализ развития русловых деформаций широкопойменных рек в голоцене (на примере верхней и средней Оби) // Бюлл. МОИП. Отдел геологии. 1981. Т. 5. Вып. 4. С. 97–108.
- Knighton A.D. Fluvial Forms and Processes: A New Perspective, London, Arnold, 1998, 383 p.
- Robert A. River processes: an introduction to fluvial dynamics, London, Arnold, 2003, 214 p.
- Schumm S.A. The fluvial system, New York, Wiley, 1977, 338 p.

Поступила в редакцию 18.05.2021

После доработки 22.10.2021

Принята к публикации 09.03.2022

RIVERBANK EROSION AND EVOLUTION OF CHANNEL FORMS AS FACTORS OF RIVER CHANNEL NETWORK TRANSFORMATION

R.S. Chalov¹, A.A. Kurakova², N.M. Mihajlova³, S.N. Ruleva⁴

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

^{3,4} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes

¹ D.Sc. in Geography, Professor; e-mail: rschalov@mail.ru

² Postgraduate student; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru

³ Ph.D. in Geography, Senior Researcher; e-mail: nmmikhailova@yandex.ru

⁴ Ph.D. in Geography, Senior Researcher; e-mail: mnksl@yandex.ru

In the article we discuss basic schemes of river channel reshaping. It changes their morphodynamic type, as well as the structure of river channel network, especially on branched rivers. Riverbank erosion within channel and branch meanders leads to the formation of a passage between river channels, including branches of

bifurcated channels, and between the main channel and floodplain channels or channels of the lower reaches of tributaries (small rivers) in the rear parts of a main river floodplain. The result is the splitting of bifurcated channels, transformation of a channel into a branch or, conversely, a branch into the main channel by water interception, as well as formation of floodplain-channel branches, sometimes with three or four channels, through redistribution of water flow. Herewith unusual types of branching occur in some cases. The development of cut-off bends in meandering channels could become a key factor for the formation of a bifurcated channel and the distribution of water flow along newly formed branches. Complex changes in the structure of river channel network are characteristic of the junction points of meandering rivers. All these transformations result from the (self)-evolution of channel forms and the riverbank erosion, and do not involve changing factors of channel processes, e. g. water flow and sediment transport. This should be taken into account in paleochannel and paleohydrological reconstructions, predicting river channel deformations and designing regulation measures for water economy and water transportation projects.

Keywords: channel processes, meanders, branches, branched channel, floodplain channels, bifurcated channel, islands

Acknowledgements. The paper is prepared according to the plan of scientific research of the Department of Land Hydrology and the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes and financially supported by the Russian Science Foundation (projects no. 18-17-00086 and 18-17-00086 II – transformation of river channels, channel branching) and the Russian Foundation of Basic Research (project no. 20-35-90003/20 – riverbank erosion).

REFERENCES

- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovyh processov* [Geographic studies of channel processes], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1979, 232 p. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, vyp. 2, Morfodinamika rechnyh rusel* [Riverbed science: theory, geography, practice, vol. 2, Morphodynamics of river channels], Moscow, KRASAND Publ., 2011, 960 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Rulyova S.N. Vliyanie pereformirovaniy rusel na razvitiye uzlov sliyaniya rek [Influence of channel reshaping on the development of river confluence nodes], *Geografiya i prirodnye resursy*, 2014, no. 1, p. 161–168.
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. *Rechnye izluchiny* [River meanders], Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2004, 371 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Zavadskij A.S. Saralevskij vodnotransportnyj uzel i problemy uluchsheniya uslovij sudohodstva na nizhnej Volge [Saralevsky water transport hub and problems of improving of shipping conditions on Lower Volga], *Rechnoj transport (XXI vek)*, 2019, no. 4, p. 20–23. (In Russian)
- Chalov R.S., Zavadskij A.S., Botavin D.V., Golovlyov P.P., Morozova E.A., Surkov V.V. Pokrovsko-Yakutskij vodnyj uzel na r. Lene: sovremennye deformacii i upravlenie ruslovymi processami [Pokrovsko-Yakutsk reach of the Lena River: transformation of complex conjugated channel, recent deformations and management of channel changes], *Izv. RAN, Ser. geograf.*, 2019, no. 6, p. 83–96. (In Russian)
- Chernov A.V., Garrison L.M. Paleogeograficheskiy analiz razvitiya ruslovyh deformacij shirokopoljennykh rek v golo-cene (na primere verhnjej i srednej Obi) [Paleogeographic analysis of the development of channel deformations on wide-floodplain rivers during the Holocene (case study of the Upper and Middle Ob River)], *Byull. MOIP, Otdel geologii*, vol. 5, no. 4, 1981, p. 97–108. (In Russian)
- Garcman B.I., Shamov V.V., Gubareva T.S. *Rechnye sistemy Dal'nego Vostoka Rossii: chetvert' veka issledovanij* [River systems of the Russian Far East: quarter of a century of research], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2015, 492 p. (In Russian)
- Kargapolova I.N. *Reakciya rusel rek na izmeneniya vodnosti i antropogennoe vozdejstvie za poslednie stoletiya* [Response of river channels to changes in water discharge and anthropogenic impact over the past centuries], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2006, 27 p. (In Russian)
- Knighton A.D. *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, London, Arnold, 1998, 383 p.
- Kondrat'ev N.E., Lyapin A.N., Popov I.V., Pin'kovskij S.I., Fyodorov N.N., Yakunin I.I. *Ruslovoj process* [Channel process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1959, 372 p. (In Russian)
- Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo processa* [Fundamentals of the hydromorphological theory of the channel process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 272 p. (In Russian)
- Kurakova A.A. Morfologiya rusla i razmyvy beregov Nizhnej Obi (v predelakh HMAO-Yugry) [Channel morphology and bank erosion in the lower reaches of the Ob River (within the KhMAO-Yugra autonomous district)], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2020, no. 6, p. 41–50. (In Russian)
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee bassejne* [River bed and erosion in its basin], Moscow, AN SSSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Nazarov N.N., Egorkina S.S. *Reki Permskogo Prikam'ya: gorizonta'nye ruslovyje deformacii* [Rivers of the Perm Kama region: horizontal channel deformations], Perm', Zvezda Publ., 2004, 155 p. (In Russian)
- Nazarov N.N., Kopytov S.V., Frolova I.V., Cherepanova E.S. [Channel changes of the upper Kama in historical documents and folklore], *Dvadcat' devyatoe plenarnoe mezhevuz. koordinac. soveshchanie po probleme erozionnyh, ruslovyh i ust'evyh processov*, Ul'yanovsk, UIGPU im. I.N. Ul'yanova Publ., 2014, p. 112–114. (In Russian)
- Panin A.V., Sidorchuk A.Yu., Chernov A.V. Makroizluchiny rek ETS i problemy paleogidrologicheskikh rekonstrukcij [Macrobends of the ETS rivers and problems of paleohydrological reconstructions], *Vodnye resursy*, 1992, vol. 19, no. 4, p. 93–96. (In Russian)

- Popov I.V. *Deformacii rechnyh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [River channel deformations and hydraulic engineering], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1965, 328 p. (In Russian)
- Popov I.V., Konditereva E.A. Prognoz ruslovyh deformacij Volgi na uchastke Saral'ovskogo vodnogo uzla v svyazi s proektirovaniem uluchsheniya ego sudohodnyh uslovij [Forecast of channel deformations of the Volga River in the section of the Saral'evskoye water hub in connection with the design of improving its navigable conditions], *Tr. GGI*, 1974, vol. 216, p. 65–93. (In Russian)
- Robert A. *River processes: an introduction to fluvial dynamics*, London, Arnold, 2003, 214 p.
- Ruslovye processy i vodnye puti na rekah Obskogo bassejna [Channel processes and waterways on the rivers of the Ob River basin], Novosibirsk, RIPEL plus Publ., 2001, 300 p. (In Russian)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, New York, Wiley, 1977, 338 p.
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Chernov A.V., Borisova O.K., Kovalyuh N.N. Stok vody i morfologiya rusel rek Russkoj ravniny v pozdnevaldajskoe vremya i v golocene (po dannym paleoruslovogo analiza) [Water Runoff and Channel Morphology of Rivers in the Russian Plain during the Late Glacial and the Holocene (by Data of Paleochannel Analysis)], *Eroziya pochv i ruslovye processy*, MSU Faculty of Geography Publ., Moscow, 2000, vol. 12, p. 196–230. (In Russian)
- Smirnova V.G. *Gidrologo-morfologicheskij analiz razvetlennyh rusel rek Altajskogo regiona* [Hydrological and morphological analysis of the branched channels of the rivers of the Altai region], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Irkutsk, IG SO RAN Publ., 2002, 20 p. (In Russian)
- Velikanov M.A. *Ruslovoj process (osnovy teorii)* [Channel process (fundamentals of theory)], Moscow, Gosfizmatgiz Publ., 1958, 395 p. (In Russian)

Received 18.05.2021

Revised 22.10.2021

Accepted 09.03.2022