

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОРВАННЫХ ИЗЛУЧИН И ОБРАЗОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕНИЙ НА МЕАНДРИРУЮЩИХ РЕКАХ<sup>1</sup>

© 2022 г. Р. С. Чалов<sup>a, \*</sup>, А. А. Куракова<sup>a, \*\*</sup>, С. Н. Рулева<sup>a, \*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: rschalov@mail.ru

\*\*E-mail: a.a.kurakova@mail.ru

\*\*\*E-mail: mnks1@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 04.10.2022 г.

Рассмотрены условия и причины формирования прорванных излучин, создающих одиночные разветвления на больших реках с меандрирующим руслом. Они возникают при спрямлении развитых и крутых излучин, достигших в процессе эволюции критических соотношений параметров ( $l/L > 1.4–1.7$ ; здесь  $l$  – длина,  $L$  – шаг излучины), при которых утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла. Прорванные излучины характерны для рек, поймы которых в многоводную фазу режима затапливаются глубоко и на длительное время. При этом чаще всего происходит перераспределение стока во вновь образовавшийся спрямляющий рукав, хотя старое русло продолжает функционировать. Однако во многих случаях в прорванных излучинах сохраняется большая доля стока воды в старом русле. Это происходит, если вновь образовавшийся спрямляющий рукав располагается за плечом коренного берега, который, оказывая на поток направляющее (в сторону старого русла) воздействие, способствует сохранению его многоводности. При этом русло нового рукава меандрирует, наследуя понижение ложбино-гривистого рельефа в шпоре излучины, выполняет наносоотсасывающую роль, вследствие чего остается мелководным. Если руслоформирующий расход воды проходит в пойменных бровках, прорванные излучины образуются в экстремально высокие половодья или паводки. При этом они существуют в течении 10–20 лет, пока старое русло (бывшая излучина) заполняется наносами и со временем отмирает, превращаясь в пойменное старичное озеро. Кратковременное существование разветвлений (в течении ряда лет) до отмирания старого русла возможно при спрямлении петлеобразных излучин вследствие встречного размыва берегов. В любом случае развитию прорванных излучин благоприятствует слив в старое русло осветленных вод с затопленной поймы. Наличие прорванных излучин, т.е. форм разветвления русла – фактор рассредоточения стока по рукавам, оказывающим существенное влияние на переформирования их русел, развитие излучин и условия управления русловыми процессами при водохозяйственном освоении рек.

*Ключевые слова:* излучины русла, спрямление излучин, прорванные излучины, разветвления, рассредоточение стока, старица, руслоформирующий расход, затопление поймы

DOI: 10.31857/S0869607122050020

### ВВЕДЕНИЕ

Процессы меандрирования речных русел относятся к наиболее изученным и широко освещенным в литературе [1, 2, 4, 6, 8, 9, 11, 16–21], особенно с точки зрения динамики потока на излучинах, причин их формирования, продольного и поперечного

<sup>1</sup> Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (исходные материалы, формирование излучин) при финансовой поддержке РФФИ (проект 18.17.00086П – полевые исследования, русловой анализ, прорванные излучины и рассредоточение стока) и РФФИ (проект № 20-35-90003\20 – размывы берегов).

смещения излучин. Вместе с тем вопросы спрямления излучин как завершающего этапа из развития обычно рассматриваются только в общем виде без учета многообразия условий, в которых оно происходит, формирования возникающих разветвлений русла, возникающего рассредоточения стока и дальнейшей эволюции староречья – бывшей излучины и спрямляющего ее рукава. При этом считается, что спрямление излучины осуществляется, если она приобретает петлеобразную конфигурацию и происходит встречный размыв берегов на ее крыльях, поток перемещается в новое русло – проран в шейке излучины, тогда как бывшая излучина отмирает, превращаясь в старичное понижение или озеро на пойме (старицу). Однако в реальной обстановке часто спрямляются излучины, имеющие сегментную форму, создавая разветвленное русло, в котором продолжают функционировать одновременно и старое русло – бывшая излучина, и спрямляющий его рукав (новое русло). Н.И. Маккавеев [6] назвал такие разветвления “отрезанными меандрами”, выделив два случая их дальнейшего развития: 1) перемещение главного течения реки в спрямляющий рукав, который углубляется и расширяется (происходит общий его размыв), тогда как старое русло становится маловодным рукавом или со временем заполняется наносами и отмирает, превращаясь в старичное озеро или широкую изогнутую ложбину на пойме, заканчивающуюся в нижней своей части заливом (курьей); 2) спрямляющий рукав, забирая на себя до 20–30% стока, не получает дальнейшего развития, меандрирует, вследствие чего его длина оказывается соизмеримой с длиной излучины русла (старого русла), которую он спрямляет, что способствует “консервации” сформировавшегося разветвления. Впоследствии такие излучины, превратившиеся в разветвления русла, были названы “прорванными” [7] и в качестве таковых вошли в морфодинамическую классификацию русел МГУ [13, 14]. В “типизации руслового процесса” ГГИ [5] образование прорванных излучин стало называться “незавершенным меандрированием”; при этом принимается, что процесс развития излучин должен завершаться спрямлением петли вследствие встречного размыва берегов на крыльях петлеобразной излучины, что и послужило причиной появления самого термина “незавершенное меандрирование”.

Вне зависимости от причин и условий образования прорванные излучины представляют собой, с одной стороны, определенную стадию развития извилистого русла [16], а, с другой, – русловое разветвление, сопровождающееся рассредоточением стока между образовавшимися рукавами, характеризующимися определенной автономностью их развития, связанной с неодинаковой водностью, различной кривизной их русел, расположением относительно коренных (ведущих) берегов или бортов долины, взаимодействием потоков при их разделении и слиянии рукавов, неодинаковым соотношением с пойменными потоками, возникающими при затоплении поймы. Острова, образующие прорванные излучины, представляют собой отчлененные от поймы части шпоры излучин, в отличие от островов типичных разветвлений, формирующихся при зарастании осередков. Однако причина спрямления сегментных излучин, образование и дальнейшее развитие прорванных излучин не рассматривается.

Задача исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, – рассмотреть условия формирования и особенности дальнейшей эволюции прорванных излучин, причины их относительной стабилизации, превращения в одну из разновидностей разветвленных русел или существование в течение ограниченного отрезка времени и последующее отмирание.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены материалы, полученные в ходе русловых исследований на средней Оби, Иртыше, Вычегде, Оке, других реках с меандрирующим руслом, на которых распространены прорванные излучины или они не формируются, а процесс

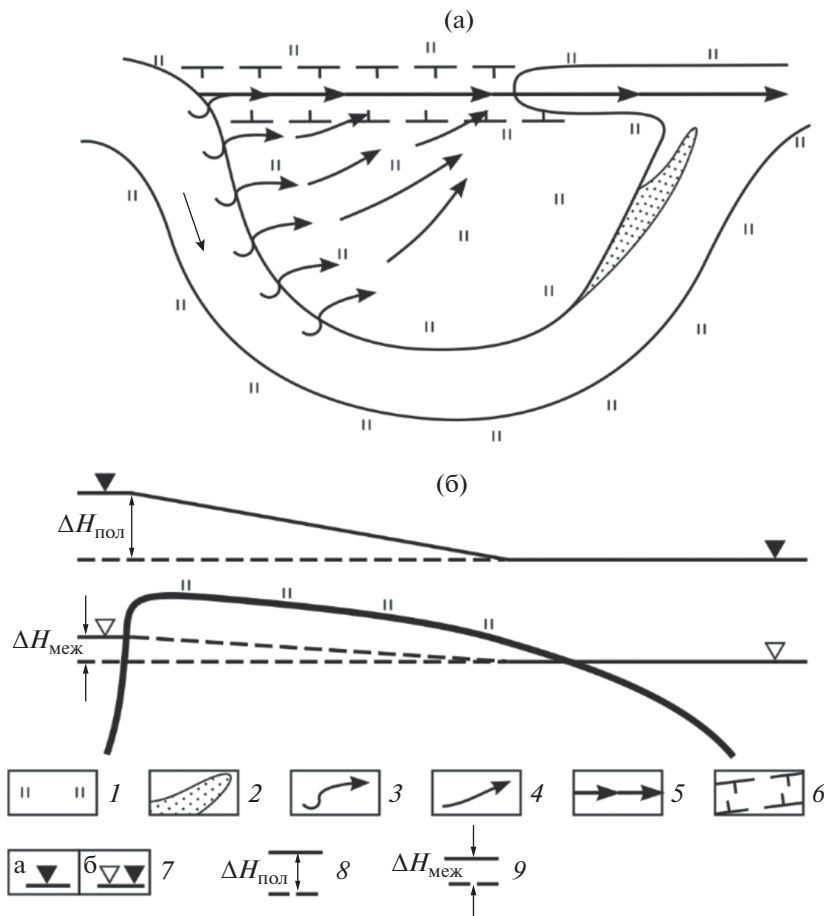
меандрировании завершается возникновением петлеобразных форм и их спрямлением благодаря встречному размыву берегов. При этом проводились съемки и промеры русла, четкая фиксация размываемых берегов и зон аккумуляции наносов, определялась структура потока, в том числе с использованием современной аппаратуры (доплеровских измерителей течения). Одновременно выполнялся ретроспективный анализ переформирований русел по сопоставлению разновременных карт рек (ранее они назывались лоцманскими), которые зафиксировали состояние русел на определенные временные срезы, топографических карт, планов русел, составленных изыскательскими партиями на водных путях, а также аэро- и космических снимков. Последние позволяют также по рельефу поймы и пойменных островов, возникших при спрямлении излучин, восстанавливать последовательный ход эволюции излучин и определять их параметры, при которых произошло спрямление. По топографическим картам и данным стереофотограмметрической обработки аэро- и космических снимков давались оценки пространственных изменений высотных отметок поверхности поймы, позволившие определить пути стока вод, затапливающих пойму. С этой же целью выполнялись анализ данных о водном режиме рек и расчеты руслоформирующих расходов воды. Это дало возможность соотнести половодные или паводковые разливы с формированием спрямляющих рукавов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Условием формирования прорванных излучин считается достижение излучинами в процессе развития критических значений параметров, при которых утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла, т.е. потери энергии потока вследствие увеличения длины русла и развития циркуляционных течений превышают рост живой силы (мощности) потока на изгибе русла, происходящего вследствие дифференциации скоростного поля [6, 15, 16]. Это соответствует, с одной стороны, приобретению излучиной развитой и тем более крутой сегментной формы (степень развитости  $l/L > 1.4-1.7$ , где  $l$  – длина,  $L$  – шаг излучины), с другой, глубокому затоплению в многоводную фазу водного режима пойменного сегмента (обычно в таких случаях при затопленной пойме наблюдается руслоформирующий расход воды верхнего интервала) [13], когда в пониженной тыловой его части сосредотачивается поток со скоростями, превышающими неразмываемые для слагающих пойму грунтов (рис. 1). Этому способствуют повышенные до 1.5 раз и более уклоны пойменного потока (по сравнению с русловым по излучине) и наличие залива в низовой части сегмента, в направлении которого происходит слив вод, затапливающих в половодье пойму.

Если спрямление сегментной излучины не происходит, излучина становится все более крутой и приобретает в процессе своего развития петлеобразную форму. Это может быть, как при незначительном и кратковременном ее затоплении, так и вследствие высокой противоэрозионной устойчивости грунта, плотности дернового покрова на пойме, залесенности или закустаренности ее поверхности. Именно поэтому формирование прорванных излучин не представляет собой массового явления, а спрямление русла происходит при значительном превышении излучинами критических значений параметров (степени развитости), когда их сегментная форма трансформируется в близкую к омеговидной, вытянутую поперек пояса меандрирования, обеспечивая существенное повышение уклона пойменного потока, пересекающего по прямой шпору между крыльями излучины.

На больших реках, на которых условия, необходимые для спрямления развитых и крутых сегментных излучин не соблюдаются, но степень развитости излучин существенно превышает критические значения  $l/L \geq 1.7$  и излучины еще не приобрели петлеобразную форму, их спрямление иногда происходит не из-за встречного размыва берегов на крыльях, а вследствие размыва нового русла вдоль пониженной тыловой



**Рис. 1.** Принципиальная схема условий спрямления крутой сегментной излучины и образование прорванной излучины: (а) план русла и пойменного сегмента, (б) продольный профиль поймы в тыловой части сегмента и водной поверхности в половодье и межень. 1 – Пойма; 2 – прирусловые отмели; 3 – перелив воды из русла в пойму; 4 – течения по затопленной пойме; 5 – течения в тыловой части поймы; 6 – понижения в тыловой части поймы; 7 – уровни воды: а – в половодье, б – в межень; превышение уровней водной поверхности в верхнем крыле излучины над нижним: 8 – в половодье, 9 – в межень.

**Fig. 1.** Schematic diagram of the conditions for straightening a steep segmental bend and the formation of a cut-off meander: (a) plan of the channel and floodplain segment, (b) longitudinal profile of the floodplain in the rear part of the segment and the water surface during high- and low-water. 1—Floodplain; 2—near-channel shallows; 3—overflow of water from the channel to the floodplain; 4—currents along the flooded floodplain; 5— currents in the rear part of the floodplain; 6—depressions in the rear part of the floodplain; 7—water levels: a—in high water, b—in low water; the excess of water surface levels in the upper wing of the bend over the lower one: 8—in high water, 9—in low water.

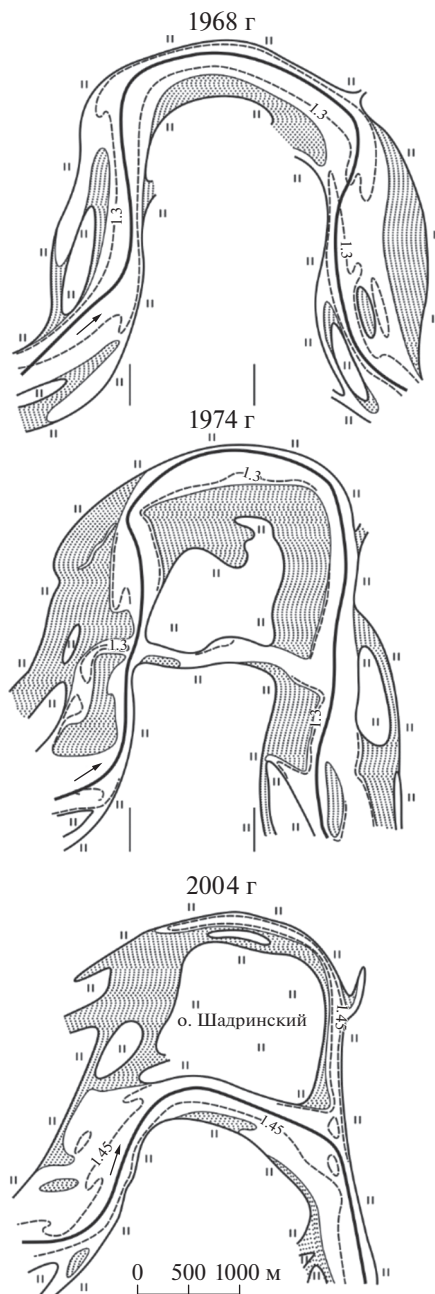
части пойменного сегмента (шпоры излучины), где в половодье устанавливается уклон между крыльями излучины, в 2–3 раза превышающий уклон в русле реки (при этом  $l/L = 3-4$  и более). Однако существование таких разветвлений недолговечно, т.к. старое русло по бывшей крутой излучине довольно быстро заполняется наносами и отмирает. Так, на верхней Оби ниже устья р. Алея, где река отходит от левого корен-

ного берега и, перемещаясь в правобережную часть долины, формирует серию свободных излучин, активно смещающихся как в продольном, так и в поперечном направлениях (скорости размыва берегов свыше 10 м/год), степень развитости одной из них (Шадринской) в конце 1960-х годов составила  $l/L > 3.0$ . Поэтому в середине 1970-х гг. после экстремального высокого половодья начал формироваться спрямляющий рукав через ее шпору. В 1974 г., когда он образовался, его водность в межень составляла (по данным измерений) 39%, но уже в 80-е гг. в него перешло все течение реки (и судовой ход), т.к. старое русло было перекрыто массивным побочнем. Уже к 2000-м годам старое русло, просуществовав как рукав реки 15–20 лет, перестало существовать, будучи сверху занесенным наносами, заросло, а снизу превратилось в длинную и глубокую курью (залив), по которой сохранился водный подход к расположенному в вершине бывшей излучины населенному пункту (рис. 2). Такие же переформирования произошли при спрямлении Жениховской излучины верхней Оби непосредственно выше г. Барнаула и в нижнем течении р. Катунь (Инкинская излучина). Спрямляющий рукав на последней образовался также в 1974 г. во время экстремально высокого половодья, забрав из старого русла 31% расхода воды. Через 10 лет в старом русле (бывшей излучине) доля стока составляла 34%, а к 1993 г. оно полностью обмелело и сейчас заросло, превратившись в понижение на пойме с небольшим заливом в его нижней части.

Таким образом, образующиеся прорванные излучины при прохождении руслоформирующего расхода воды в пойменных бровках и возникающие при этом разветвления функционируют непродолжительное время и по мере обмеления и снижения водности старого русла (бывшей излучины) перестают существовать как формы разветвленного русла. Само же спрямление крутых излучин через шпору обычно происходит в экстремальные или близкие к ним высокие половодья, если при этом пойменный поток концентрируется в естественных понижениях (ложбинах) в тыловой части шпоры, вызывая их размыв. Так выше описанные спрямления крутых излучин на верхней Оби и нижней Катунь начались с образования первичных промоин между крыльями в очень высокое половодье 1974 г. Подтверждением роли выдающихся паводков в образовании прорванных излучин (спрямление крутых излучин через шпору) являются результаты детальных исследований русловых деформации меандрирующего русла р. Белой, показавшие, что “постепенное развитие излучин прерывается их внезапным спрямлением. В выдающийся паводок 2002 г. на участке из 11 излучин Белой три спрямились по размытой протоке через шпору излучины” [3, с. 60]. Именно такие спрямления излучин произошли на Оби и Катунь, но здесь они, к сожалению, не были зафиксированы и документально были отмечены лишь по происшествии нескольких лет после события.

Прорванные излучины как формы русловых разветвлений, определяющие русловой режим средних и больших реках, представлены чаще всего единичными образованиями среди свободных излучин, не составляя морфологически однородные участки. Тем не менее, они обуславливают рассредоточение стока, создавая местные осложнения для эксплуатации водных путей, способствуя формированию перекатов, “уходу” реки от населенных пунктов, обмелению водозаборов и т.д. Лишь в отдельных случаях, где две–три крутые сегментные излучины следуют одна за другой, спрямление одной из них может повлечь за собой аналогичное спрямление смежной, и тогда возникает короткий морфологически однородный участок прорванных излучин (не более 2–3-х), составляющий сопряженные разветвления (рис. 3). От таковых на реках с разветвленным руслом, они отличаются относительной прямолинейностью одних и большой кривизной других рукавов, сопрягающихся по правилу “восьмерки” [6, 10, 13, 15].

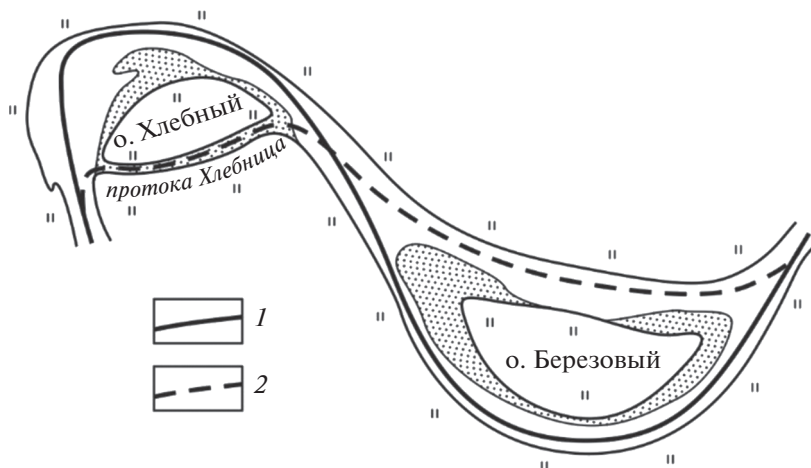
На реках, на которых руслоформирующий расход наблюдается до затопления поймы и спрямление сегментных излучин связано с экстремальными половодьями или па-



**Рис. 2.** Спряменение Шадринской излучины на верхней Оби и отмирание старого русла.

**Fig. 2.** Straightening of the Shadrinskaya bend on the upper Ob and dying off of the old channel.

водками, образующиеся при этом прорванные излучины не только отличаются кратковременностью своего существования, но и, будучи единичными формами, встречаются на меандрирующих реках сравнительно редко. При прохождении руслоформирующих



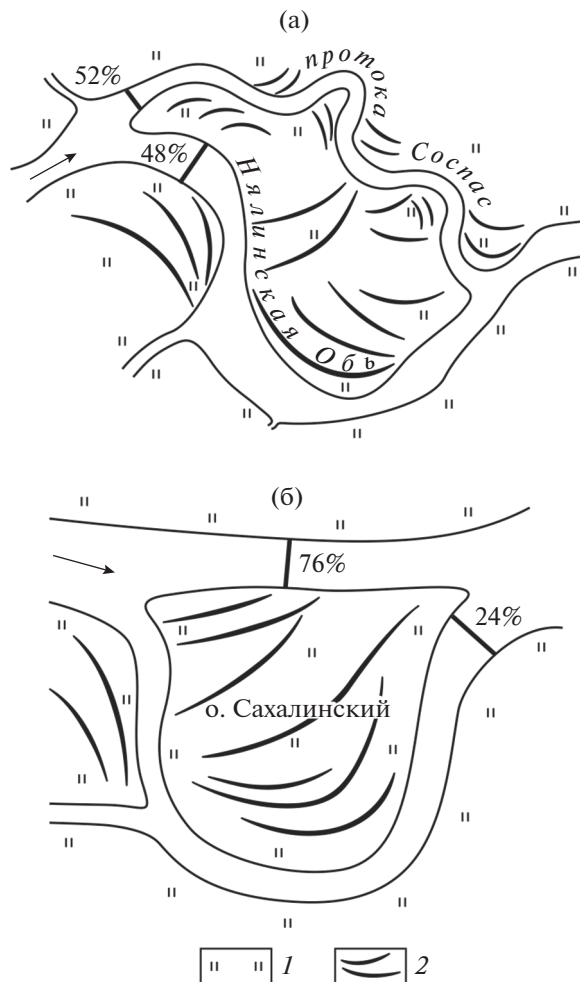
**Рис. 3.** Образование сопряженных разветвлений при спрямлении смежных крутых излучин. Положения стрежня потока: 1 – до спрямления излучин; 2 – после спрямления излучин.

**Fig. 3.** Formation of conjugate ramifications when straightening adjacent steep bends. Positions of the core of the flow: 1—before the straightening of the bends; 2—after straightening the bends.

расходов верхнего интервала (т.е. при глубоком и длительном затоплении поймы) прорванные излучины, особенно на больших реках, встречаются достаточно часто, хотя также в виде единичных форм. Так, на меандрирующей средней Оби между устьями рек Томи и Ваха имеется 15 прорванных излучин (11% длины участка). Большинство из них сформировалось ниже устья р. Кети, где руслоформирующий расход проходит при затопленной пойме [12]. При этом на всех излучинах развитие спрямляющего рукава сопровождается перераспределением в них расходов воды (обычно этот рукав становится судоходным). Однако, старое русло, остается достаточно многоводным (до 30–40% общего расхода воды), но, выполняя, как правило, наносотсасывающую роль, мелеет, в нем формируется перекаты с шахматным расположением побочной и извилистостью динамической оси потока. В свою очередь, русло спрямляющего рукава, не сосредотачивая в себе весь сток реки, меандрирует, образуя излучины, параметры которых соответствует его водности. Таково, например, развитие Нялинской прорванной излучины на р. Оби (рис. 4), в которой спрямляющий рукав (протока Соспас) забирает лишь немного больше половины общего расхода воды – 58%, и скорости размыва в нем могут превышать 10 м/год. Его формирование произошло при  $l/L \approx 1.8$ ; излучины этого рукава (их шесть) наследуют ложбины на поверхности сегментно-гребневой поймы, вследствие чего его длина такая же, как и старого русла – Нялинской Оби, представленного двумя большими излучинами (его водность – 42%), вогнутые берега которых отступают со скоростью не более 3 м/год.

Влияние условий прохождения руслоформирующих расходов воды на развитие прорванных излучин наглядно прослеживается на нижнем Иртыше. Они часто встречаются ниже устья р. Тобола и вплоть до слияния с Обью, но отсутствуют выше по течению, где преобладают крутые сегментные и много петлеобразных излучин. В первом случае руслоформирующий расход соответствует затоплению поймы, во втором проходит в пойменных бровках [12, 13].

В большинстве же прорванных излучин, формирующихся при достаточно большей степени развития ( $l/L > 1.7$ ), спрямляющий рукав характеризуется относительной прямолинейностью или образует одну пологую ( $l/L \sim 1.1$ ) излучину. Это обеспечивает



**Рис. 4.** Прорванные излучины средней Оби и рассредоточение их стока по рукавам (в %): (а) – Нялинская с меандрирующим спрямляющим рукавом, (б) – Сахалинская с прямолинейным спрямляющим рукавом. 1 – пойма, 2 – основные гривы на пойме.

**Fig. 4.** Cut-off meanders of the middle Ob, dispersal of their runoff along the branches (in %): (а)–Nyalinskaya with a meandering straightening arm, (б)–Sakhalinskaya with a straight straightening arm. 1–floodplain, 2–main manes on the floodplain.

быстрое перераспределение в него основного стока реки (до 75–80%), и в таком состоянии разветвление обычно консервируется на очень продолжительное время (многие десятки и даже сотни лет). В приведенном на рис. 4Б примере (Сахалинская прорванная излучина на средней Оби) левый прямой (судоходный) рукава забирает в половодье 76% расхода воды, его берега активно размываются (со скоростью 2–3.5 м/год, максимальной – до 6 м/год). Сохранению старого русла способствует слив в него осветленных вод с затопленной поймы, в т.ч. из крупной пойменной протоки. Если этого не происходит и образовавшееся старое русло оказывается вне основных пойменных потоков, прорванная излучина как форма разветвления существует относи-



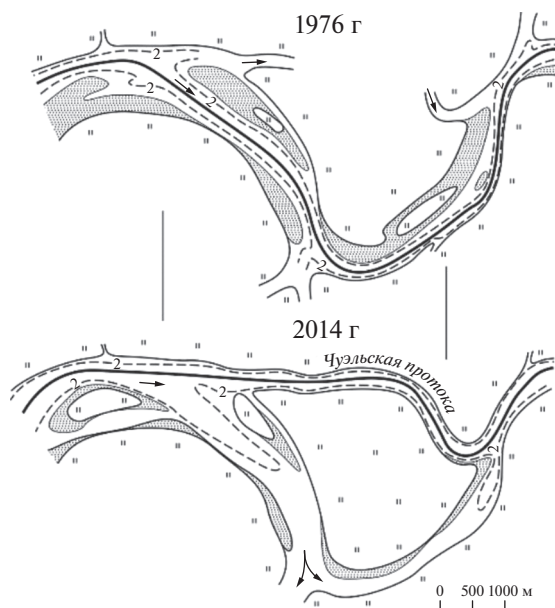


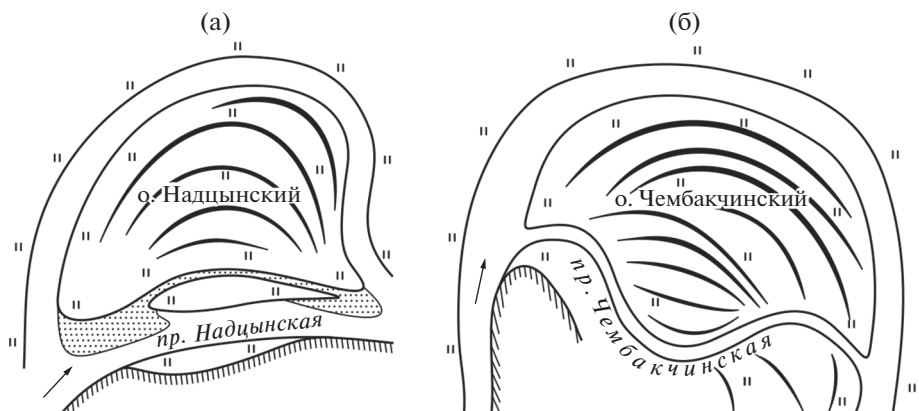
Рис. 5. Сопоставленные планы Чуэльской прорванной излучины Горной Оби.

Fig. 5. Compared plans of the Chuelskaya cut-off meander of the Gornaya Ob.

тельно непродолжительное время. На нижнем Иртыше, несмотря на прохождение руслоформирующего расхода воды при затопленной пойме, произошло отмирание старых русел на двух прорванных излучинах в течение 30–40 лет.

Прорванные излучины формируются также в рукавах раздвоенного русла крупнейших рек. На Горной Оби (правый рукав раздвоенного русла нижней Оби) прорванная излучина начала формироваться в середине XX столетия, и спрямляющий рукав (протока Чуэльская) уже существовал в 1976 г. (рис. 5), но был маловодным; главное течение Горной Оби (и судовой ход) располагались в правом, образующим кругую излучину рукаве ( $l/L = 1.7$ ). В 20-е годы XXI века судовой ход был уже проложен по левому спрямляющему рукаву – протоке Чуэльской, водность которой составляет 43%, а берега в ней размываются со скоростью 1.1–1.2 м/год, обеспечивая увеличение пропускной способности рукава и последующий рост его водности. В правый, бывший судовой рукав уходит 57% расхода воды, но уже в его верхней части 42% стока отвлекается в правый рукав раздвоенного русла Горной Оби – протоку Сомутнельскую, и, таким образом, в нижней части его водность составляет всего 26%. Очевидно, что со временем Чуэльская протока превратится в основной по водности рукав Горной Оби.

В ряде случаев сохранение главного течения реки в старом русле и меньшая водность спрямляющего рукава связана с тем, что прорванная излучина формируется ниже выступа (плеча) коренного берега или изгиба долины реки, которые направляют поток в старое русло. Это характерно, например, для нижнего Иртыша, где таким образом образовалось шесть прорванных излучин, в которых истоки спрямляющих рукавов расположены за мысами коренного берега. Если спрямляющий рукав ниже мыса проходит вдоль коренного берега, русло его в целом относительно прямолинейное, с возможным формированием непосредственно ниже мыса вторичного разветвления, достаточно многоводное, но мелкое. В Надцынской прорванной излучине относительно водность такого рукава около 35%, в нем сформировались крупные побочни,



**Рис. 6.** Прорванные излучины нижнего Иртыша ниже мысов коренного берега. (а) – Надцынская вдоль коренного берега, (б) – Чембакчинская в пойменных берегах ниже мыса коренного берега.

**Fig. 6.** Cut-off meanders of the lower Irtysh below the capes of the bedrock coast. (a)—Nadtsynskaya along the bedrock coast, (b)—Chembakchinskaya in the floodplain banks below the cape of the bedrock coast.

размывы берегов локальны; в то же время старое русло – левый рукав, забирает 65% стока воды, глубокий на всем протяжении, берега в нем размываются со скоростью в среднем 2.6 м/год (рис. 6а). Если ниже мыса, направляющего поток в старое русло, пойма со стороны спрямляющего рукава расширяется, сам рукав остается маловодным и мелким, меандрирует, образуя несколько излучин. Такова прорванная излучина на р. Иртыша, образующая Чембакчинские разветвление (рис. 6б), в котором по левому рукаву (излучине основного русла) проходит 87.5% расхода воды, скорости размыва составляют в среднем 2.5 м/год (максимальная – до 8.2 м/год), тогда как в спрямляющем – Чембакчинской протоке – 12.5%, темпы отступления берегов не превышают 2.8 м/год.

Относительно кратковременное существование разветвлений при спрямлении излучин возможно при встречном размыве берегов на крыльях петлеобразных излучин, следствием чего является образование прорана в пойменной перемычке между ними. Старое крутоизогнутое русло, имеющее форму петли, обычно быстро заполняется наносами, и его следы прослеживаются в рельефе поймы в виде старичных озер и заболоченных понижений, повторяющих форму бывших излучин русла. Такие временные разветвления периодически формируются в нижнем течении р. Иртыша, где они существуют как разветвления русла в течении 18–20 лет, постепенно заполняются наносами и в конце концов отмирают, а также на верхней Вычегде, Оке, Чулыме и других меандрирующих реках. В тех же случаях, когда вершина петлеобразной излучины подходит к коренному берегу и в нее во время половодья происходит слив осветленных вод с затопленной поймы, староречье сохраняется более продолжительное время в виде рукава, но существенно уступающего по водности основному руслу. Таковы спрямления петлеобразной излучины на р. Иртыше у п. Такмык и у г. Тевриза (бывш. Кускунский поворот). Можно также ожидать долговременное существование разветвления, образовавшегося при спрямлении в 2019 г. вследствие встречного размыва берегов на крыльях Укинской излучины; ее вершина подходит к правому борту долины, и сюда, в нижнее крыло происходит слив полых вод с выклинивающейся правобережной поймы. Сейчас в проран уходит 67% расхода воды, скорости отступления берегов в нем достигают 20 м/год; соответственно 33% стока проходит в правом петлеобразном рукаве.

Аналогичные условия, способствующие длительному сосуществованию старого русла и спрямляющего более многоводного рукава, возникают у прорванных излучин, в том числе сформировавшихся на реках с прохождением руслоформирующего расхода воды в пойменных бровках: старое русло продолжает сохраняться достаточно многоводным вследствие слива в него потока с выклинивающейся поймы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Прорванные излучины на широкопойменных реках с меандрирующим руслом представляют собой специфические русловые разветвления, обуславливающие местное рассредоточение стока и, как следствие, вызывающие определенные осложнения при использовании речных ресурсов и транспортном освоении рек. При этом они не образуют морфологически однородные участки, встречаясь, как правило, в виде единичных форм среди извилистого в целом русла (пологих, развитых и крутых излучин). Развитие спрямляющих крутые излучины рукава происходит, если в процессе эволюции соотношение их параметров (длины  $l$  и  $L$ ) превышает критические значения, соответствующие утрате гидравлической выгоды извилистой формы русла ( $l/L > 1.4-1.7$ ). Условием этого являются глубокие и длительные затопления поймы в многоводную фазу водного режима, когда через сегмент, оконтуренный излучиной, проходит достаточно мощный поток, сосредотачивающийся в пониженной тыловой его части по линии наибольшего уклона водной поверхности (соответственно, более чем в 1.5 раза, превышающий уклон по руслу) в половодье.

2. В большинстве своем в прорванных излучинах большая часть стока воды перераспределяется в спрямляющий рукав. Старое русло (рукав — бывшая крутая излучина) при этом продолжает функционировать благодаря сливу в него осветленных вод с затопленной поймы. Соотношение водности обоих рукавов находится обычно в пределах 1 : 2—1 : 3 при относительной прямолинейности спрямляющего рукава. Однако нередко он формируется в условиях сложного ложбинно-гривистого рельефа поймы, наследуя ложбины различной ориентировки. В итоге спрямляющий рукав образует несколько излучин, его длина оказывается не меньшей, чем длина старого русла, а водность сопоставима со старым руслом.

3. Прорванные излучины, формирующиеся ниже крупных выступов коренных берегов или изгибов долины, отличаются сохранением большей части стока в старом русле. Спрямляющий рукав сравнительно маловоден, меандрирует, образуя несколько излучин, параметры которых соответствуют его водности; при прямолинейности и расположении вдоль коренного берега он забирает до 1/3 расхода воды, но, отходя от русла под углом, близким к прямому, отвлекает в себя основной сток наносов и является поэтому мелким. В обоих случаях излучина старого русла продолжает активного размываться, т.к. находится под направляющим воздействием на поток коренных берегов.

4. Если прорванная излучина формируется в условиях, когда руслоформирующий расход проходит в пойменных бровках (например, во время экстремально высокого половодья), старое русло функционирует в течение 15–20 лет и со временем превращается в старичное озеро или понижение в рельефе поймы с заливом (курьей) в нижней его части.

5. При спрямлении крутых петлеобразных излучин вследствие встречного размыва берегов на их крыльях и развитии через их шейку прорана, в который перемещается основной расход воды, старое русло и, соответственно, разветвление существует относительно недолго, пока не произойдет его заполнение наносами и отмирание. Лишь в случае расположения вершины такой излучины возле коренного берега возникающее разветвление может существовать долго благодаря сливу в старое русло вод с выклинивающейся поймы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Великанов М.А.* Образование речных излучин // Изв. АН СССР. Сер. геологич. 1950. № 3. С. 89–93.
2. *Завадский А.С.* Гидролого-морфологический анализ свободного меандрирования русел равнинных рек. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2001. 27 с.
3. *Каргаполова И.Н., Крыленко И.В.* Русловые процессы на полугорной реке (р. Белая, Западный Кавказ) (ст. 1. Горизонтальные деформации русла и сток воды как основной фактор) // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 1. С. 49–64.
4. *Кондратьев Н.Е.* Русловые процессы в меандрирующих руслах // Тр. ГГИ. 1954. Вып. 44 (98). С. 5–13.
5. *Кондратьев А.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 272 с.
6. *Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозии в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 347 с.
7. *Маккавеев Н.И.* Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ. 1971. 116 с.
8. *Попов И.В.* О формах перемещения речных излучин // Тр. ГГИ. 1956. Вып. 56 (110). С. 36–57.
9. *Потапов М.В.* Винтовое движение жидкости в прямом открытом канале прямоугольного сечения // Поперечная циркуляция в открытом потоке и ее гидротехническое применение. М.: Сельхозиздат. 1936. С. 102–154.
10. Проектирование судовых ходов на свободных реках / Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. 262 с.
11. *Розовский И.Л.* Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН СССР. 1957. 188 с.
12. Русловой режим рек Северной Евразии. М.: Изд-во МГУ. 1994. 336 с.
13. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ. 1979. 232 с.
14. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ. 2004. 608 с.
15. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД. 2011. 960 с.
16. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В.* Речные излучины. М.: Изд-во МГУ. 2004. 371 с.
17. *Callander R.A.* River meandering // Ann. Rev. Fluid. Mech. 1978. V. 10. P. 129–159.
18. *Davis W.M.* Meandering valleys and underfit rivers // Ann. Assoc. Am. Geogr. 1913. V. 3. P. 3–28.
19. *Fargue L.* La forme du lit des rivières a fond mobile. Paris: Gauthier – Villars. 1908. 187 p.
20. *Knighton A.D.* The meander problem // Geography. 1967. Pt. 2. № 275. P. 106–111.
21. *Yaag C.N.* On river meanders // J. Hydrology. 1971. V. 19. № 3. P. 231–233.

## Cut-Off Meanders Formation and Braided Reaches Development on Meandering Rivers

R. S. Chalov<sup>1</sup>, \*, A. A. Kurakova<sup>1</sup>, \*\*, and S. N. Ruleva<sup>1</sup>, \*\*\*

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

\*E-mail: rschalov@mail.ru

\*\*E-mail: a.a.kurakova@mail.ru

\*\*\*E-mail: mnks1@yandex.ru

The conditions and reasons for the cut-off meanders formation, that create single braided reaches on large rivers with meandering channel, are considered. They appear when developed and steep bends, which have reached critical ratios of parameters in the process of their evolution ( $l/L > 1.4–1.7$ ;  $l$  is the length,  $L$  is the step of the bend), are straightened. Cut-off bends are characteristic of rivers, where floodplains are flooded deeply and for a long time during high-water period. In this case, most often, the runoff is redistributed into the new straightening channel branch, although the old channel continues functioning. However, in many cases, in cut-off bends a larger part of water runoff remains in the old channel. This happens if the new straightening channel branch is located behind the reach of the bedrock bank, which exerts a directing (toward the old channel) effect on the flow; the new channel meanders and remains shallow. If the effective water discharge passes within floodplain edges, cut-off bends are formed during extremely high floods. At the same time, they exist for 10–20 years, while the old channel (the old bend) is filled with sediments and dies off, turning into a floodplain oxbow lake. The short-term existence of braided reaches (for a number of years) before the death of the old channel is possible when the loop-shaped bends are straightened due to the oncoming erosion of the banks. In any case, the development of cut-

off bends is favored by the discharge of clarified waters from the floodplain into the old channel. The presence of cut-off bends, i.e., forms of braided channel, is a factor in the dispersal of runoff along channel branches, which has a significant impact on their channel changes, development of bends and conditions for channel processes management while water management of rivers as a whole.

*Keywords:* channel meanders, cut-off meanders, braided channel reaches, runoff dispersal, abandoned channel (oxbow lake), effective water discharge, floodplain flooding

**Acknowledgement.** Completed under the plans of research work (GZ) of the Hydrology Department and the Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes of the Lomonosov Moscow State University (original data, formation of meanders) with the financial support of the Russian Science Foundation (project 18.17.00086P – field works, channel analysis, cut-off meanders and runoff dispersal) and Russian Foundation of Basic Research (project No. 20-35-90003\20).

#### REFERENCE

1. Velikanov M.A. Obrazovaniye rechnykh izluchinykh // *Izv. AN SSSR. Ser. geologich.* 1950. № 3. S. 89–93.
2. Zavadskiy A.S. *Gidrologo-morfologicheskii analiz svobodnogo meandrirovaniya rusel ravninnykh rek.* Avtoref, dis. ... kand. geogr. nauk. M.: MGU. 2001. 27 s.
3. Kargapolova I.N., Krylenko I.V. Ruslovye protsessy na polugornoi reke (r. Belay, Zapadnyi Kavkaz) (st. 1. Gorizontallye deformatsii rusla i stok vody kak osnovnoi faktor) // *Geomorfologiya.* 2022. T. 53. № 1. S. 49–64.
4. Kondrat'ev N.E. Ruslovye protsessy v meandrirovannykh rekakh // *Tr. GGI.* 1954. Vyp. 44 (98). S. 5–13.
6. Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snizhenko B.F. *Osnove gidromorfologicheskoi teorii ruslovoogo protsesssa.* L.: Gidrometeoizdat. 1982. 272 s.
7. Makkaveev N.I. Ruslo reki i erzia v ee basstine. M.: Izd-vo AN SSSR. 1955. 347 s.
8. Makkaveev N.I. Stok i ruslovye protsessy. M.: Izd-vo MGU. 1971. 116 s.
9. Potapov M.V. Vintovoe dvizheniye zhidkosti v pryamom otkrytom rusle i ee gidrotehnicheskoe primeneniye / M.: Selhozizdat. 1936. S. 102–154.
10. Proektirovaniye sudovykh hodov na svobodnykh rekakh / *Tr. CNIIEVT.* 1964. Vyp. 36. 262 s.
11. Rozovskii I.L. Dvizheniye vody na povorote onkrytogo rusla. Kiev: Izd-vo AN USSR. 1957. 188 s.
12. Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii. M.: Izd-vo MGU. 1994. 336 s.
13. Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov.* M.: Izd-vo MGU. 1979. 232 s.
14. Chalov R.S. *Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika.* T. 1. Ruslovye protsessy: teoriya, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel. M.: Izd-vo LKI. 2004. 608 s.
15. Chalov R.S. *Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika.* T. 2. Morfodinamika rechnykh rusel. M.: KRASAND. 2011. 960 s.
16. Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Panin A.V. *Rechnye izluchiny.* M.: Izd-vo MGU. 2004. 371 s.
17. Callander R.A. River meandering // *Ann. Rev. Fluid. Mech.* 1978. V. 10. P. 129–159.
18. Davis W.M. Meandering valleys and underfit rivers // *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 1913. Vol 3. P. 3–28.
19. Fargue L. *La forme du lit des rivières a fond mobile.* Paris: Gauthier – Villars. 1908. 187 p.
20. Knighton A.D. The meander problem // *Geography.* 1967. Pt. 2. № 275. P. 106–111.
21. Yaugh C.N. On river meanders // *J. Hydrology.* 1971. Vol. 19. № 3. P. 231–233.