

ПРЯМОЛИНЕЙНЫЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫЕ РУСЛА: МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ТИПИЗАЦИЯ

Р.С. Чалов¹, Г.Б. Голубцов², А.А. Куракова³

^{1–3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева*

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

² *Мл. науч. сотр.; канд. геогр. наук; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

³ *Мл. науч. сотр.; канд. геогр. наук; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

Относительно прямолинейные неразветвленные русла, несмотря на наименьшую долю среди русел других морфодинамических типов, что обусловлено неустойчивостью прямолинейного движения потока, в последние десятилетия стали объектами исследования с точки зрения их морфологии, динамики и условий формирования, в том числе на конкретных реках, из-за сложностей, возникающих при решении водохозяйственных и водотранспортных проблем. Несмотря на кажущееся их однообразие и относительно слабую интенсивность русловых переформирований, они характеризуются определенными морфологическими различиями, связанными главным образом с параметрами русел, их водностью и неодинаковыми условиями формирования. Прямолинейные русла могут как образовывать самостоятельный тип и связанные с ними морфологически однородные участки в широкопойменном, адаптированном и врезанном русле, так и встречаться в виде небольших участков («вставок») между смежными излучинами в меандрирующем русле, в пойменно-русловых разветвлениях, в рукавах сопряженных и одиночных разветвлений. Прямолинейные «вставки» являются составной частью сложных сундучных (трапециевидных) излучин, в которых они разделяют верхний вынужденный изгиб русла на подходе к ведущему коренному берегу или уступу высокой, редко затопляемой поймы, и нижерасположенную излучину с верхним крылом возле коренного берега.

С учетом всех факторов составлена полная классификация прямолинейных русел, определены условия их формирования, особенности деформаций и возможности оптимального управления русловыми процессами для обеспечения устойчивости водного пути, гидротехнических сооружений и работы водохозяйственных объектов.

Ключевые слова: русловые процессы, типизация, морфодинамика русел, рукава, излучины, трансформация русел, устойчивость русел

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.1.7

ВВЕДЕНИЕ

Прямолинейные неразветвленные русла – один из трех основных морфодинамических типов русел, но, в отличие от меандрирующих (извилистых) и разветвленных на рукава, не имеющих широкого распространения на реках. В пределах Северной Евразии (в границах бывшего СССР) [Русловой режим..., 1994] доля прямолинейных русел, образующих морфологически однородные участки, составляет среди рек с широкопойменным руслом ($B_n > 2...3b_p$; здесь B_n – ширина поймы, b_p – ширина русла) 7,4%, среди рек с врезанным руслом – 6,8% от общей длины рек протяженностью более 500 км, нашедших отражение на карте «Русловые процессы на реках СССР» [1990]. Причины этого заключаются в неустойчивости прямолинейного движения потока [Замышляев, 1982, 1983; Чалов, 2011; Сидорчук, 2015], воздействии на него неровностей ведущих

берегов, крупных грядовых макроформ руслового рельефа и других по отношению к потоку факторов, обуславливающих образование его изгиба или разделения на ветви течения [Davis, 1913; Маккавеев, 1971; Чалов, 2011]. Поэтому для закрепления изначальной прямолинейности потока в форме русла необходимы дополнительные условия (расположение вдоль ведущего коренного берега, малый сток руслообразующих наносов, высокая подвижность побочной и осередков, повышенные уклоны русла, заложение русел по линиям геологических структур в области распространения скальных пород), достаточно освещенные в литературе [Жуковский, 1948; Schumm, 1977; Callander, 1969; Parker, 1976; Замышляев, 1982; Иванов, 1989; Чалов, 2011], включающей анализ трансформации прямолинейных русел в извилистое или разветвленное и основные особенности их деформаций. В то же время, ссыла-

ясь на относительно малую встречаемость и неустойчивость прямолинейного движения потока, прямолинейные русла как морфодинамический тип были исключены из типизации русловых процессов ГГИ [Кондратьев и др., 1982], вошедшей в нормативные документы по учету русловых процессов и использованию речных ресурсов. В ней они подменены оценкой руслового рельефа и грядового движения наносов (ленточно-грядовые, побочневые, осередковые русла). При этом вне классификационной схемы оказались, например, плесовые, глубокие, на значительном протяжении прямолинейные участки русел, хотя в более ранних работах [Кондратьев и др., 1959; Попов, 1961] были выделены среди четырех типов русел по их переформированиям во времени прямолинейные участки русел, смещающиеся «параллельно самим себе на значительном протяжении» (подробный критический анализ и сопоставление отечественных и зарубежных классификаций русел и типизации русловых процессов дан в работе [Чалов, 2008]).

При кажущемся однообразии прямолинейных неразветвленных русел существуют определенные морфологические различия между ними в зависимости от условий, в которых они формируются на малых, средних и больших реках, при неодинаковом стоке и крупности руслообразующих наносов в широкопойменном и врезанном руслах и их устойчивости, т. е. интенсивности русловых деформаций; образование в них форм русла второго и третьего порядков, выровненности или наличия выступов и мысов ведущих коренных берегов и т. д. Кроме того, наряду с морфологически однородными участками прямолинейности характерна для рукавов различных типов и структурных уровней развития разветвлений русел; небольшим, сравнительно коротким отрезком между смежными излучинами меандрирующих (извилистых рек) и островами разветвленных русел. По существу, прямолинейными являются русла рек с одно- или двусторонними разветвлениями, в которых встречаемость прибрежных протоков и рукавов вдоль одного или обоих берегов составляет в совокупности не более 10–15%, тогда как в основном русле сосредоточен основной расход воды, и его переформирования осуществляются так же, как в прямолинейном неразветвленном русле. Однако такие короткие участки рассматриваются обычно как составные части разветвленного или извилистого меандрирующего русла. Например, на нижней Оби, от устья Иртыша на протяжении 324 км, выделяется морфологически однородный участок, представленный одиночными разветвлениями. Их здесь 15,

занимающих 42,8% длины участка; имеется также параллельно-рукавное разветвление длиной 21 км (6,4%). Остальная часть – прямолинейные участки русла – их 18, каждый длиной в среднем по 9 км.

Наличие таких участков на реках с другими типами русла и в рукавах разветвленных русел существенно увеличивают долю прямолинейных русел, хотя их учет в общей статистике не может сопровождаться снижением доли разветвлений и извилистых русел. Следствием такого отношения к прямолинейным неразветвленным руслам является отражение в классификациях [Линь Чэнькуань, 1963; Проектирование..., 1964; Гришанин, 1972; Ржаницын, 1985; Шэнь Юйчан, Гун Гоюань, 1986] только самого их существования (в отличие от других типов, которые подразделяются на несколько разновидностей или подтипов). Даже в наиболее полной классификации русел МГУ [Чалов, 2008] они показаны лишь отдельно для врезанных, адаптированных и широкопойменных русел, а в последних выделено две их разновидности – с двусторонней поймой или вдоль коренных берегов. Это отражает общую слабую изученность прямолинейных русел. Если о меандрирующих или разветвленных руслах имеется обширная литература, рассматривающая их с позиций морфологии, динамики и гидравлики потока, условий формирования и т. д., то собственно прямолинейным, кроме упомянутой выше статьи В.С. Замышляева [1982], связавшего этот тип русла с неустойчивостью прямолинейного движения потока было посвящено только специальное исследование В.В. Иванова (1989), результаты которого дали импульс к тому, что в последние годы на них стали обращать внимание и выявлять особенности деформаций при изучении русловых процессов на конкретных реках, результаты которых нашли отражение в многочисленных публикациях сотрудников МГУ по Лене, Оби, Иртышу, Волге, Северной Двине, Печоре и др.

Задача настоящей статьи – обосновать полную классификацию прямолинейных неразветвленных русел, как создающих на реках их морфодинамические типы и морфологически однородные участки, так и встречающихся в виде сравнительно коротких отрезков между излучинами и разветвлениями, определяющих тип русла в рукавах разветвлений, показать условия и основные схемы их деформаций с учетом различий геолого-геоморфологической обстановки, гидрологического режима и стока наносов. Последние уже были учтены при выявлении географических закономерностей распространения прямолинейных русел и составлении соответствующей мелкомасштабной карты.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы для анализа условий формирования, морфологии и динамики прямолинейных неразветвленных русел получены при выполнении многолетних исследований русловых процессов на реках Северной Евразии (в пределах бывшего СССР), начиная с 1957 г., ряда зарубежных стран (Китай, Польша, Монголия) и из литературных источников. За последние годы в исследованиях на Лене, Оби, Иртыше, Северной Двине акценты были сделаны на изучение морфодинамики и гидравлики потока прямолинейных русел. Состав и методика русловых исследований подробно описаны во многих публикациях, как региональных по конкретным рекам, так и обобщающих их результаты. При этом широко использовались для ретроспективного анализа речных переформирований карты русел рек (бывшие лоцманские), регулярно составляемых на судоходные реки, на некоторых из них начиная с конца XIX в., и зафиксировавших состояние русел на разные временные срезы, космические снимки, топографические карты, аэрофотоснимки. Все это позволило разработать общую морфодинамическую классификацию речных русел и русловых деформаций [Чалов, 2008], которая была существенно уточнена и детализирована применительно к каждому типу русла [Чалов, 2021; Чалов и др., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена полная классификация относительно прямолинейных неразветвленных русел, включающая (в верхней части рисунка) создающие морфодинамические его типы и морфологически однородные участки на реках (в нижней части рисунка), образующие короткие участки («вставки») между отдельными разветвлениями или смежными излучинами, конфигурацию рукавов разветвлений и пойменных протоков, составляющих пойменную многорукавность. В зависимости от свободных или ограниченных условий развития русловых деформаций прямолинейные русла могут быть, как и другие морфодинамические типы русла, широкопойменными, адаптированными и врезанными. При этом врезанные прямолинейные русла, формирующиеся в условиях распространения скальных грунтов (рис. 2) и дефицита руслообразующих наносов, как правило, являются плесовыми (скопления наносов в виде гряд-макроформ, образующих мелководья – перекаты отсутствуют), в которых изменения отметок дна обуславливаются неровностями коренного ложа вплоть до образования порогов и шивер (подводных скальных выступов, перегораживающих реку до половины и более ширины ее русла).

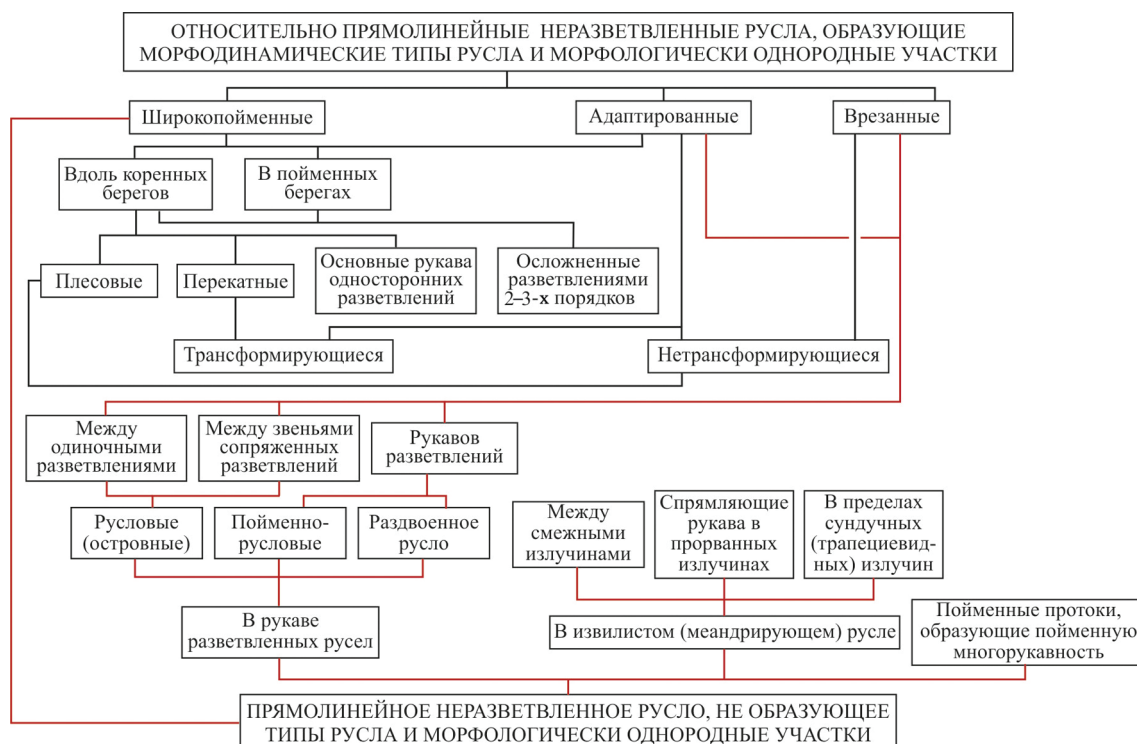


Рис. 1. Классификация относительно прямолинейных неразветвленных русел, образующих морфологически однородные участки и прямолинейных «вставок» в меандрирующих и разветвленных руслах

Fig. 1. Classification of relatively straight, unbranched channels that form morphologically homogeneous sections, and straight “insertions” in meandering and branched channels



Рис. 2. Врезанное прямолинейное русло верхнего Алдана, формирующееся в скальных грунтах (гранитах, гнейсах). Фото Р.С. Чалова

Fig. 2. The incised rectilinear channel of the Upper Aldan River, formed in massive rocks (granites, gneisses). Photo by R.S. Chalov

В областях, сложенных пластичными трудноразмываемыми грунтами, врезанные прямолинейные русла встречаются значительно реже. В обоих случаях они относятся к категории нетрансформирующихся, сохраняющих свою форму и конфигурацию на протяжении геологических отрезков времени, и, с точки зрения русловых процессов, являются практически недеформируемыми. Изменения их береговых линий происходят за счет склоновых процессов, провоцируемых воздействием на берега потока в многоводные фазы водного режима. Вертикальные деформации (врезание) осуществляются благодаря корродирующему эффекту перемещаемых наносов на коренное скальное ложе, а также его биохимическому разрушению [Добровольская, 1980; Чалов, 2008].

Адаптированные прямолинейные русла формируются в узких речных долинах ($b_p > B_n < 3b_p$ на больших, $b_p > B_n < 5-7b_p$ на малых и средних реках [Чалов, 2008]), являются как нетрансформируемыми, если располагаются вдоль ведущего коренного берега при односторонней пойме, или трансформируемыми, преобразующимися, хотя и в течение продолжительного времени, в процессе русловых деформаций в пологие излучины, вершины которых касаются бортов долины (незавершенное меандрирование, по ГТИ [Кондратьев и др., 1982]) или при относительно большой ширине русла (по И.Ф. Карасеву [1975] при

$$\theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda} > 9,5, \lambda = 2g/C^2, C = \frac{1}{n} h^{1/6},$$

где h – глубина русла, λ – коэффициент гидравлических сопротивлений, n – коэффициент шероховатости русла), которая характерна для рек с плотными пластичными грунтами дна, по которым «скольз-

ит» (выражение Н.И. Маккавеева [Маккавеев и др., 1971]) поток, не в состоянии их размывать и углубляться в них.

Основные разновидности широкопойменных прямолинейных неразветвленных русел также определяются их положением относительно ведущего коренного берега, возле него или в пойменных берегах. Наличие коренного берега у реки предполагает возникновение в многоводную фазу режима при затоплении поймы из-за одностороннего перекоса водной поверхности такой структуры потока, при которой донные струи, наиболее насыщенные наносами и перемещающие их во влекомом состоянии, отклоняются в направлении понижения ее отметок, т. е. в сторону затопленной поймы. Это обуславливает аккумуляцию наносов и образование отмелей возле пойменного берега и размыв русла, его углубление и формирование глубоких плесов возле коренного берега [Проектирование судовых ходов..., 1964], но при условии его относительной выровненности (рис. 3Б).

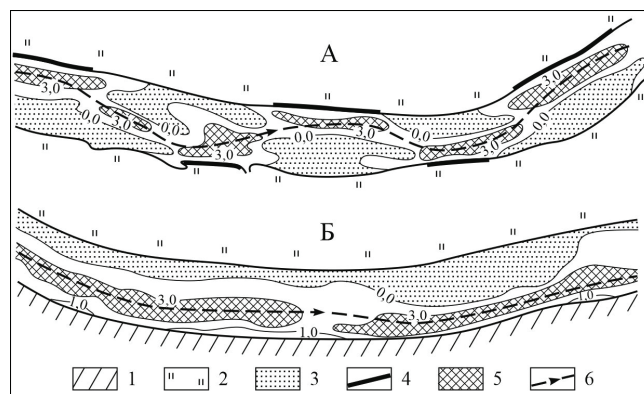


Рис. 3. Разновидности прямолинейного широкопойменного русла: А – перекаточного в условиях двусторонней поймы – р. Вычегда; Б – имеющего плесовый характер возле ведущего коренного берега – р. Северная Двина (1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – размываемые берега; 5 – плесовые ложины; 6 – стрежень потока)

Fig. 3. Types of rectilinear wide-floodplain channel: А – riffle within a two-sided floodplain – the Vychegda River; Б – of a reach character near the leading bedrock bank – the Northern Dvina River (1 – bedrock bank; 2 – floodplain; 3 – channel shallows; 4 – eroded banks; 5 – reach hollows; 6 – mainstream)

Изгиб ведущего берега, наличие в нем выступов и мысов (возникающих также при сходе крупных оползней или обвалов) сопровождаются образованием ниже их побочня (отмели), что является потенциальной возможностью формирования излучины или разветвления, если побочень оказывается отделенным от берега побочневой протокой. В результате прямолинейное русло трансформируется

в извилистое или разветвленное. На это впервые обратил внимание еще в начале XX в. Н.Н. Жуковский [1948]. На больших и особенно на крупнейших реках, у которых изгибы коренного ведущего берега (стрела прогиба его вогнутости) относительно ширины русла невелики (не более $\frac{1}{4}$), развитие излучины или формирование разветвления не происходит. Но в этом случае при большом стоке наносов русло приобретает перекаточный характер. Рост побочня ниже изгиба коренного берега происходит до тех пор, пока кривизна меженного потока возле него не достигнет критических значений ($l/L \approx 1,6$), причем стрежень потока достигает нередко противоположного пойменного берега, вызывая его размыв. В этом случае побочень отторгается от коренного берега, и поток вновь перемещается к нему, после чего процесс развития извилины повторяется (рис. 4).

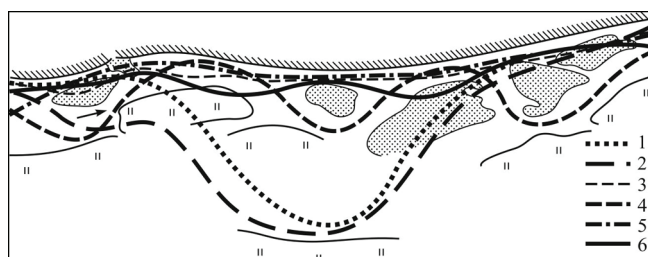


Рис. 4. Переформирования прямолинейного русла левого рукава одностороннего разветвления верхней Оби на участке ниже устья Чарыша на протяжении XX в.: 1 – 1936 г.; 2 – 1960 г.; 3 – 1970 г.; 4 – 1977 г.; 5 – 1991 г.; 6 – 1994 г.

Fig. 4. Reformation of a straight channel of the left arm of one-way branching of the Upper Ob River below the mouth of the Charysh River during the 20th century: 1 – 1936; 2 – 1960; 3 – 1970; 4 – 1977; 5 – 1991; 6 – 1994

Однако само регулярное возвращение потока к коренному берегу приводит к временной стабилизации русла и общему его углублению, вследствие чего это явление получило название «правило ведущего берега», которое широко используется при выправлении русел этого типа на судоходных реках [Проектирование судовых ходов..., 1964]. На реках с относительно устойчивым руслом и выровненными очертаниями коренных берегов это приводит к стабилизации русла в целом и улучшению условий судоходства (так было осуществлено выправление русла нижней Вычегды на ряде участков в 1960-е гг., сказывающееся до настоящего времени). На верхней Оби (ниже устья р. Чарыша), где аналогом прямолинейного русла является левый основной рукав (80–90% стока реки) односторонних разветвлений, проходящий вдоль 100-метрового уступа Предалтайского степного плато, неровного в плане и с регулярно сходящими оползнями. Периодиче-

ское развитие побочней у левого коренного берега обуславливает необходимость своевременного искусственного их отторжения посредством разработки дноуглубительных прорезей в сравнительно небольших объемах. В последние 30–35 лет этого не делалось, и участок реки стал перекастным, превратившись в один из самых затруднительных для содержания водного пути.

Расположение русла возле коренного берега, даже при периодическом развитии побочней, отклонение стрежня потока к пойме и последующее их отторжение обеспечивает направленное в течение исторических и даже геологических отрезков времени смещение русла, хотя и медленно, в сторону коренного берега (параллельно самому себе) и развитие односторонней поймы с параллельно-грядистым рельефом [Чернов, 1983; Чалов, 2011], а на реке с односторонними разветвлениями – ложбинно-островной с ориентировкой гряд (бывших островов) параллельно руслу.

На реках с другими типами русла подход его в процессе переформирования к коренному берегу также приводит к стабилизации русла в этом положении и трансформации меандрирующего или разветвленного (рукава в припойменной части реки мелеют и отмирают) русла в относительно прямолинейное неразветвленное. Так произошло, например, на верхней Оби. Рельеф правобережной поймы выше и ниже г. Барнаула свидетельствует о меандрировании реки в период ее активного формирования. В настоящее время русло здесь или прямолинейное неразветвленное, или с односторонними разветвлениями, в котором маловодные второстепенные протоки проходят вдоль поймы. Для данного участка характерны размывы пойменных берегов и островов со скоростью в среднем 1,5 м/год (при максимуме – 9,2 м/год). На Северной Двине в районе п. Красноборска (ниже слияния с Вычегдой) в конце XIX в. произошло спрямление серии излучин посередине днища долины и в правобережной его части, и с этого времени русло устойчиво располагается вдоль левого коренного берега [Каргаполова, 2006]. Переформирования русла реки здесь заключаются в основном в размыве оголовков и берегов островов со средней скоростью 2,5 м/год, максимальной – 6,1 м/год. На Оби в районе с. Уртама перераспределение стока в верхнем звене сопряженных разветвлений в рукав возле коренного берега, выровненного в плане, привело к превращению этого участка реки в прямолинейное неразветвленное русло [Русловые процессы..., 2001], берега которого размываются относительно слабо: средняя скорость – около 1 м/год, максимальная – не больше 2,9 м/год.

Широкопойменные прямолинейные русла больших рек с двусторонней поймой при достаточном

стоке руслообразующих наносов характеризуются развитием перекатов с побочными в шахматном порядке, но, в отличие от расположенных возле коренных берегов, смещающихся вдоль реки, вследствие чего рисунок меженного русла меняется после каждого половодья (рис. 3А). При повышенной подвижности побочной они не успевают закрепиться растительностью и превратиться в пойму, и русло сохраняет прямолинейность.

На реках с недостаточным стоком наносов, обычно малых, на которых поступление твердого материала из-за размыва берегов и с территории бассейна еще не обеспечивает необходимое его количество для образования грядовых макроформ руслового рельефа, русло является также прямолинейным неразветвленным (рис. 5), а широкая пойма реки нередко является унаследованной, сформировавшейся в иных природных условиях.



Рис. 5. Прямолинейное русло р. Юг в верхнем течении.
Фото Р.С. Чалова

Fig. 5. The straight channel of the Yug River in its upper reaches. Photo by R.S. Chalov

Таким образом, основные рукава односторонних разветвлений при расположении этого типа русла возле коренных берегов (это характерно для больших рек со слабо- и неустойчивым руслом, которые отличаются большой шириной и относительно малыми глубинами) по существу являются разновидностью относительно прямолинейных русел, которые можно квалифицировать как осложненные формированием прибрежных островов, образующих разветвления второго и третьего порядков. Связанные с ними односторонние разветвления отличаются постоянно малой водностью протоков и рукавов, расположенных в области преимущественной аккумуляции наносов и создающих периферическую зону русла. Со временем, по мере направленного смещения реки в сторону ведущего берега, они отмирают, острова причленяются к пойме, а разделяющие их рукава превращаются в параллельные руслу ложбины или маловодные пойменные протоки.

Осложнения в морфологию прямолинейных русел (вне зависимости от одно- или двусторонней поймы) вносят также разветвления второго и третьего порядков, существование которых не проявляется в структуре всего потока, сказываясь лишь в прилегающих к создающим их островам. По В.В. Иванову [1989], это соответствует соотношению ширины острова и русла перед разветвлением $B_o < 0,3-0,4b_p$ для островов второго порядка и $B_o < 0,08b_p$ для островов третьего порядка [Чалов, 2011]. Формирование таких разветвлений, не изменяющих прямолинейности русла и не отражающихся в конфигурации противоположных островов берегов (они сохраняют прямолинейные очертания), свидетельствует о превышении критического значения критерия квазиоднородности потока И.Ф. Карасева $\theta = \sqrt{\lambda} b_p / h > 9,5$. Поэтому многие участки прямолинейного широкопойменного русла больших и особенно крупнейших рек (средняя и нижняя Лена, Обь, Иртыш, нижний Амур) нередко характеризуются наличием небольших (элементарных и малых [Голубцов, 2023]) деформаций, не определяющих их режим.

Наряду с прямолинейными руслами, создающими на реках морфологически однородные участки, на реках и в рукавах разветвленных русел существуют относительно короткие прямолинейные «вставки» между смежными излучинами на меандрирующих реках, между звеньями сопряженных разветвлений и одиночными разветвлениями, расположение которых по длине реки составляет вместе с ними морфологически однородные участки. В извилистом русле (рис. 6А) вследствие неравномерного распределения скоростей и возникновения центробежных сил при криволинейности движения потока возникают циркуляционные течения, которые активизируются по мере увеличения кривизны излучин в процессе их развития. Они затухают ниже створа перегиба между соседними излучинами, в результате чего плесовые ложбины возле вогнутых берегов удлиняются, смещаясь на верхнее крыло следующей излучины. Это явление впервые было отмечено еще Л. Фаргом [Fargue, 1908], теоретически обосновано Н.И. Маккавеевым [1955] и М.М. Розовским [1957] и объясняет образование прямолинейных «вставок» между смежными развитыми и большими излучинами.

В разветвлениях русла острова вызывают изгибы потока, вследствие чего русла рукавов обычно представляют собой излучины. Если острова располагаются цепочками вдоль реки, создавая сопряженные разветвления, между их звеньями поток собирается в едином неразветвленном русле, образуя очень короткие прямолинейные «вставки», в которых нередко у противоположных берегов, ниже во-

гнутости каждого рукава, формируются небольшие прибрежные острова, обычно элементарные, реже малые, протоки за которыми маловодны, в межень часто обсыхают (см. рис. 6Б).

Одиночные разветвления как тип русла, образующие морфологически однородные участки, представляют собой чередование по длине реки островов и прямолинейных отрезков, протяженность которых значительно больше, чем у «вставок» между звеньями сопряженных разветвлений (см. рис. 6В). Поэтому переформирования каждого разветвления происходят независимо друг от друга, во многом определяясь теми деформациями, которые происходят в пределах прямолинейных «вставок». Примером такого морфологически однородного

участка является р. Обь от слияния с р. Иртышом до п. Перегребного, где начинается раздвоенное русло нижней Оби. При протяженности участка 325 км в его пределах находится 14 одиночных разветвлений и 15 прямолинейных отрезков общей протяженностью 163 км (средняя их длина – около 10 км; такая же длина у одиночных разветвлений). Расположение их вдоль правого коренного берега (Белогорского материка) обуславливает плесовый характер и устойчивость прямолинейного русла. Если для разветвлений русла характерны активные русловые деформации (скорости размыва пойменных берегов и островов в среднем достигают 3 м/год при максимуме более 16 м/год), то прямолинейные участки остаются практически неизменными в плане.

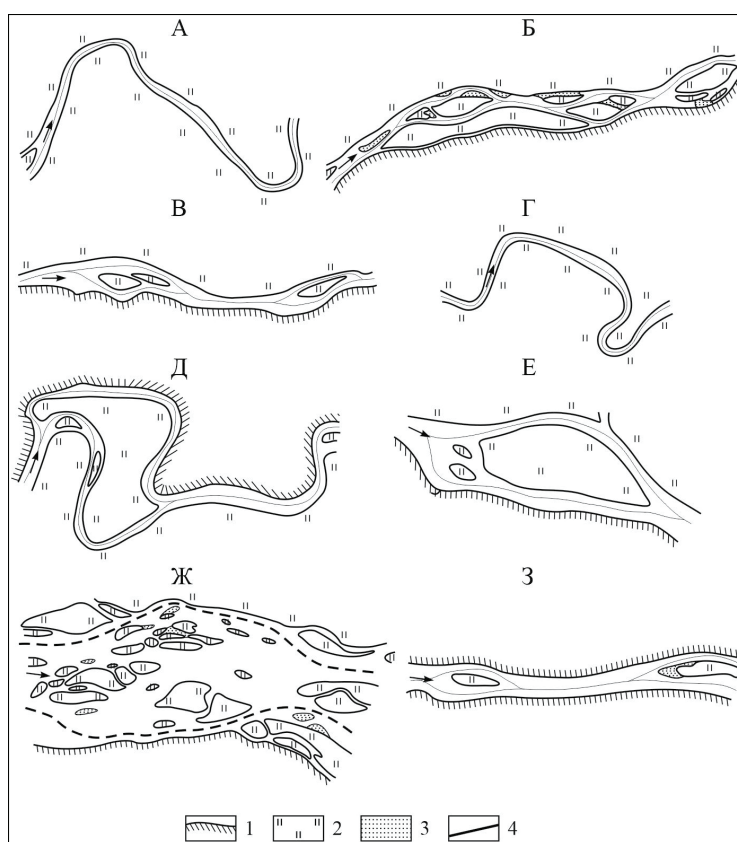


Рис. 6. Основные разновидности прямолинейных русел, не создающих морфологически однородные участки, и рукавов разветвлений: А – между смежными излучинами (нижний Иртыш, ниже г. Тобольска); Б – между звеньями сопряженных разветвлений (р. Обь, Орско-Борское – Гусиное разветвления); В – между островами одиночных разветвлений (р. Обь, ниже слияния с р. Иртышом); Г – на сундучных излучинах (средний Иртыш); Д – пойменно-русловое разветвление с рукавами, расположенными в верхней и нижней частях вдоль коренного берега (средняя Обь); Е – одиночные разветвления у коренного берега, нижняя Обь, ниже слияния с р. Иртышом; Ж – рукав параллельно-рукавного разветвления (нижняя Лена, Сахамское разветвление); 3 – рукава параллельно-рукавных разветвлений врезанного русла (средняя Лена в районе Ленских Столбов): 1 – коренной берег; 2 – пойма; 3 – прирусловые отмели; 4 – положение стрежневой зоны потока

Fig. 6. Main types of rectilinear channels that do not create morphologically homogeneous sections, and branching channels: А – between adjacent bends (lower Irtysh River, below Tobolsk); Б – between links of conjugate branchings (the Ob River, Orsko-Borskoe and Gusinoe branchings); В – between islands of single branchings (the Ob River, below the confluence with the Irtysh River); Г – on chest bends (the Middle Irtysh River); Д – floodplain-channel branching with branches located in the upper and lower parts along the native bank (the Middle Ob River); Е – a single branching near the native bank of the Lower Ob River, below the confluence with the Irtysh River; Ж – a branch of a parallel-branch braiding (the Lower Lena River, Sakhamsk branching); 3 – branches of parallel-branch braidings of the incised channel (the Middle Lena River in the area of the Lena Pillars): 1 – bedrock bank; 2 – floodplain; 3 – channel shallows; 4 – mainstream location

Прямолинейные «вставки» являются составной частью сложных сундучных (трапециевидных) излучин, в которых они разделяют верхний вынужденный изгиб русла на подходе его к ведущему берегу, коренному или уступу высокой, редко затопляемой поймы и нижний, у которого верхнее крыло проходит на продолжении последнего (см. рис. 6Г). Образование этих «вставок» и самих сундучных излучин – следствие слива воды с затопленной поймы к верхнему изгибу русла [Чалов, 2011].

Прямолинейность рукавов раздвоенных русел по условиям их формирования подобна прямолинейным неразветвленным широкопойменным руслам. Таковы очень протяженный (десятки километров) прямолинейный участок Большой Оби и менее длинные на Малой и Горной Оби, на которых горизонтальные русловые деформации либо практически отсутствуют, либо наблюдаются локально со скоростями размыва берегов в среднем не более 2 м/год, максимум – не более 4 м/год (в зависимости от размера реки). В рукавах пойменно-русловых разветвлений она проявляется в тех случаях, когда разветвления находятся на перевалах реки от одного коренного борта долины к другому: она характерна для верхней части рукава, расположенной вдоль коренного берега до его отклонения от реки, и нижней части второго рукава, подходящего к противоположному коренному берегу до узла слияния рукавов, т. е. так или иначе связаны с влиянием ведущих коренных берегов (см. рис. 6Д). В одиночных и звеньях сопряженных разветвлений широкопойменных русел прямолинейные рукава, как правило, также проходят вдоль коренных берегов (или уступов надпойменных террас) (см. рис. 6Е). При их отсутствии поток, огибая острова, формирует пологие излучины, т. к. возможная первоначальная прямолинейность рукава быстро трансформируется вследствие возникновения гидравлических явлений, свойственных изгибу потока, возникающему у оголовка острова. Относительно прямолинейные рукава, в том числе осложненные разветвлениями второго порядка, при расположении реки вдоль коренного берега характерны для такой крупнейшей реки, как нижняя Лена (см. рис. 6Ж).

Более распространены прямолинейные рукава в разветвлениях врезанных и адаптированных русел больших и крупнейших рек. В соответствии с очень высокой водностью рек и большой шириной их русел при относительно небольшой глубине [Ржаницын, 1982], в том числе вследствие устойчивости к воздействию потока сложенного скальным или плотным пластичным грунтом дна, в потоке возникает две-три стрекневые зоны (критерий И.Ф. Карасева $\theta > 9,5$). Рукава в таких разветвлениях сохраняют относительную прямолинейность из-за

неразрываемости или сложения трудноразрываемыми отложениями берегов. Подобные разветвления с прямолинейными рукавами характерны для врезанных параллельно-рукавных русел средней Лены (см. рис. 6З), Енисея, Иртыша выше г. Омска, Ангара (до создания каскада водохранилищ). На 160-километровом участке средней Лены длина многих островов $L_o \gg 10B_o$, что во много раз превышает оптимальное соотношение параметров в отношении гидравлических сопротивлений $L_o \approx 3-4B_o$ [Baker, 1977; Komar, 1983]. При этом на Лене многие острова имеют коренной скальный цоколь, а на Ангаре они были незатопляемыми, поднимаясь над меженным уровнем до 60 м и более [Чалов, Чалов, 2009] (некоторые из них образуют сейчас острова на водохранилищах).

Относительно прямолинейные русла характерны для проток и рукавов, составляющих пойменную многорукавность, особенно на реках с разветвленным руслом, на которых они являются реликтовыми образованиями, связанными с отмиранием рукавов русловых разветвлений и причленением островов к пойме, но продолжающих функционировать при глубоком затоплении поймы и прохождении в эту фазу водного режима руслоформирующего расхода. Пологая извилистость бывших рукавов при сокращении их водности превращается в относительную прямолинейность пойменных ответвлений также из-за малого стока наносов в них, формирующегося только благодаря размыву в них берегов.

ВЫВОДЫ

Относительно прямолинейные, неразветвленные русла, являясь одним из трех основных морфодинамических типов речных русел, имеют незначительное распространение. Образованные ими морфологически однородные участки составляют в среднем всего 7% среди рек Северной Евразии длиной более 500 км. Главным образом это связано с неустойчивостью прямолинейного движения потока. Поэтому в свободных условиях развития русловых деформаций они формируются, если широкопойменное русло располагается вдоль ведущего коренного берега (пойма односторонняя), имеющего выровненные в плане очертания. Наличие такового обеспечивает специфическую структуру потока в многоводную фазу водного режима при затоплении поймы, аккумуляцию наносов в припойменной части русла, плесовый характер русла и направленное смещение его в сторону ведущего берега. При неровностях коренного берега русло становится перекатным благодаря образованию побочней (или осередков) ниже каждого его выступа. Широкопойменное прямолинейное русло (при отсутствии коренных берегов) является обычно слабо- или неустойчивым,

перекатным, с побочными и осередками, смещение и переформирования которых не позволяют им закрепиться растительностью (т. е. превратиться в пойму) и привести к трансформации русла в извилистое или разветвленное. Наличие коренного ведущего берега, плесовый характер русла, смещение и деформируемость побочной и осередков обеспечивают нетрансформируемость прямолинейных русел. В противном случае существование их ограничивается определенным временным интервалом, русло является трансформирующимся, превращаясь в извилистое или разветвленное.

Во врезанных руслах, особенно в скальных грунтах, их прямолинейность определяется геологической структурой и является стабильной, не изменяющейся на протяжении геологических отрезков времени. Этому способствует дефицит руслообразующих наносов для таких условий формирования русел.

Аналогом прямолинейных неразветвленных русел являются основные рукава одно- и реже двусторонних разветвлений, в которых второстепенные прибрежные протоки являются маловодными и вместе с отделяющими их от основного русла

островами образуют периферическую зону, в которой преобладает аккумуляция наносов, даже при их дефиците.

Прямолинейные русла могут иметь рукава разветвлений разного типа – одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных, пойменно-руслowych, раздвоенного русла и пойменных протоков. Не образуя морфологически однородные участки, они встречаются в виде «вставок» между смежными излучинами, как составная часть сундучных (трапециевидных) излучин, между звеньями сопряженных разветвлений и островами одиночных разветвлений. Во всех подобных случаях русловые деформации происходят взаимосвязанно между формами русла других типов и прямолинейных «вставок».

Закономерности переформирования всех возможных проявлений прямолинейности – от морфологически однородных участков широкопойменных и врезанных рукавов разветвлений разного типа до прямолинейных «вставок» между излучинами и разветвлениями – должны учитываться при разработке схем и проектов регулирования русел при водохозяйственном освоении и водотранспортном использовании рек.

Благодарности. Работа выполнена 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 материалы и русловой анализ), при финансовой поддержке РНФ – проект № 23-17-00065 (разработка классификации, морфология и динамика прямолинейных русел) и № 23-77-01006 (размывы берегов в прямолинейных руслах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голубцов Г.Б. Формирование, морфология и динамика островов широкопойменных русел больших рек (на примере Оби и Лены): автореф. дис. ... кан. геогр. наук. М.: ИГ РАН 2023. 29 с.
- Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
- Добровольская Н.Г. Особенности субаквального выветривания на равнинных и горных реках (на примере Лены и Кара-Бау, Западный Тянь-Шань) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1980. № 2. С. 71–76.
- Жуковский Н.Н. Обзор основных явлений естественно-го формирования речного русла (выдержки из труда «Об организации и системе землечерпания на транзите рек с подвижным ложем»). В сб. науч. трудов / Волжское землечерпание и его достижения. Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 329–363.
- Замышляев В.И. О плановой устойчивости прямого русла. В сб. науч. трудов / Тр. ГГИ. 1982. Вып. 278. С. 48–55.
- Замышляев В.И. Математическая модель плановых переформирований речных русел // Труды ГГИ. 1983. Вып. 288. С. 53–72.
- Иванов В.В. Условия формирования, гидролого-морфологические зависимости и деформации относительно прямолинейных неразветвленных русел: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1989. 23 с.
- Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
- Каргаполова И.Н. Реакция русел рек на изменения водности и антропогенное воздействие за последние столетия: автореф. дис. ... кан. геогр. наук. М.: МГУ. 2006. 27 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.Ф., Сущенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 282 с.
- Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Пинковский С.И. и др. Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 372 с.
- Линь Чэнькуань. Классификация типов русел // Вест. Нанкин. ун-та. 1963. № 1. (на кит. языке).
- 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 МГУ, 1971. 116 с.
- Попов И.В. Методические основы исследования руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 208 с.
- Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. М.: Транспорт, 1964. 262 с.
- Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.

- Розовский М.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 188 с.
- Русловой режим рек Северной Евразии / под ред. Р.С. Чалова. М.: Изд-во МГУ, 1994. 316 с.
- Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна / под ред. Р.С. Чалова, Е.М. Плескевича, В.А. Баулы. Новосибирск: Изд-во РИПЭЛ-плюс, 2001. 300 с.
- Русловые процессы на реках СССР. Карта. Масштаб 1:4 000 000 / под ред. Р.С. Чалова. М.: ГУГК СССР, 1990. 4 л.
- Сидорчук А.Ю. Главные формы речных русел: меандры и разветвления. В сб. науч. труд. / Вопросы географии. Сб. 140. Современная геоморфология. М.: Кодекс, 2015. С. 319–340.
- Чалов Р.С. Извилистость или разветвленность потока и формирование меандрирующих и разветвленных на рукава речных русел // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 3. С. 3–12.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
- Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: Изд-во КРА-САНД, 2011. 960 с.
- Чалов Р.С. Голубцов Г.Б. Куракова А.А. Разветвления речных русел, их морфологические проявления и типизация. // Известия РГО. 2023. Т. 155. №3-4. С. 145–162.
- Чалов Р.С. Чалов С.Р. Морфология скального русла реки Ангара на участках Богучанского и Мотыгинского водохранилищ // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 103–110.
- Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во МГУ, 1983. 198 с.
- Шэнь Юйчан, Гун Гоюань. Речная геоморфология. Пекин: Наука, 1986. (на кит. языке).
- Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1071.
- Callander R.A. Instability in river channels, *Field mech.*, 1969, vol. 36, p. 465–480.
- Davis W.M. Meandering valleys and underfit rivers, *Assoc. Am. Geogr.*, 1913, vol. 3, p. 3–28.
- Fargue L. *La forme du lit des rivières à fond meuble*, Paris, 1908, 187 p.
- Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Parker G. On the cause and characteristic scales meandering and braiding rivers, *Field mech.*, 1976, vol. 76, p. 457–480.
- Schumm S.A. *The fluvial system*, John Wiley and Sons, New York, 1977, 338 p.

Поступила в редакцию 10.05.2024

После доработки 16.09.2024

Принята к публикации 26.11.2024

STRAIGHT-LINE NON-BRANCHING CHANNELS: MORPHOLOGICAL DIVERSITY AND TYPIFICATION

R.S. Chalov¹, G.B. Golubtsov², A.A. Kurakova³

¹⁻³ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

¹ *Department of Land Hydrology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rschalov@mail.ru*

² *N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru*

³ *N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: a.a.kurakova@mail.ru*

Relatively straight non-branching channels account for the smallest share among all morphodynamic types of channels, which is due to the instability of the rectilinear flow movement. Recently they have become objects of study from the point of view of their morphology, dynamics and conditions of formation, including on particular rivers, due to the difficulties arising in solving water management and water transportation problems. Despite their apparent uniformity and relatively weak intensity of channel reformations, they are characterized by certain morphological variability associated mainly with the parameters of the channels, their water content, and specific conditions of formation. Rectilinear channels could form an independent type and associated morphologically homogeneous sections in a wide-floodplain, adapted and incised channel. They could also occur in the form of small sections (“insertions”) between adjacent bends in a meandering channel, in floodplain-channel branches, in the branches of conjugated and single branchings. Rectilinear “insertions” are an integral part of complex chest (trapezoidal) bends, in which they separate the upper forced bend of the channel on the approach to the leading bedrock bank or the ledge of a high, rarely flooded floodplain, and the lower bend with an upper wing near the bedrock bank.

Taking into account all factors, a complete classification of rectilinear channels has been elaborated. The conditions of their formation and specific features of their deformations have been defined, as well as possibilities of the optimal management of channel processes to ensure the stability of waterways and hydraulic structures, and the operation of water management facilities.

Keywords: channel processes, typification, morphodynamics of channels, branches, bends, transformation of channels, stability of channels

Acknowledgements. The paper was prepared according to the plan of scientific research of the Department of Land Hydrology and the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes (source materials and channel analysis) with financial support of the Russian Science Foundation – project no. 23-17-00065 (development of classification, morphology and dynamics of rectilinear channels), no. 23-77-01006 (riverbank erosion in straight channels).

REFERENCES

- Baker V.R. Stream-channel response to floods with examples from central Texas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, p. 1057–1071.
- Callander R.A. Instability in river channels, *Field mech.*, 1969, vol. 36, p. 465–480.
- Chalov R.S., Chalov S.R. The morphology of the rocky channel of the Angara River in its stretches within the Boguchanskoye and Motyginskoye reservoirs, *Geography and Natural Resources*, 2009, no. 1, p. 47–53.
- Chalov R.S., Golubtsov G.B., Kurakova A.A. Razvetvleniya rechnykh rusel, ikh morfologicheskie proyavleniya i tipizatsiya [Formation of river channel branches, their morphology and typing], *Izvestiya RGO*, 2023, vol. 155, no. 3–4, p. 145–162. (In Russian)
- Chalov R.S. Izvilistost' ili razvetvlennost' potoka i formirovaniye meandriruyushchikh i razvetvlennykh na rukava rechnykh rusel [Sinuous or braiding water flows and formation of meandering and braided river channels], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 3, p. 3–12. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, vol. 1, Ruslovyie protsessy: faktory, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Riverbed studies: theory, geography, practice, vol. 1, Riverbed processes: factors, forms of manifestation and conditions of formation of riverbeds], Moscow, LKI Publ., 2008, 608 p. (In Russian)
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika, vol. 2, Morfodinamika rechnykh rusel* [Riverbed studies: theory, geography, practice, vol. 2, Morphodynamics of riverbeds], Moscow, KRASAND Publ., 2011, 960 p. (In Russian)
- Chernov A.V. *Geomorfologiya poim ravninnykh rek* [Geomorphology of floodplains of lowland rivers], Moscow, MSU Publ., 1983, 198 p. (In Russian)
- Davis W.M. Meandering valleys and underfit rivers, *Assoc. Am. Geogr.*, 1913, vol. 3, p. 3–28.
- Dobrovol'skaya N.G. Osobennosti subakval'nogo vyvetrivaniya na ravninnykh i gornyykh rekakh (na primere Leny i Kara-Bau, zapadnyi Tyan'-Shan') [Specific features of subaqueous weathering on plain and mountain rivers (case studies of Lena and Kara-Bau rivers, western Tien Shan)], *Vest. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1980, no. 2, p. 71–76. (In Russian)
- Fargue L. *La forme du lit des rivières a fond milife*, Paris, 1908, 187 p.
- Golubtsov G.B. *Formirovaniye, morfologiya i dinamika ostrovoov shirokopoimennykh rusel bol'shikh rek (na primere Obi i Leny)* [Formation, morphology and dynamics of islands in wide floodplain channels of large rivers (case studies of the Ob and Lena rivers)], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, IG RAS Publ., 2023, 29 p. (In Russian)
- Grishanin K.V. *Teoriya ruslovogo protsesssa* [Riverbed process theory], Moscow, Transport Publ., 1972, 216 p. (In Russian)
- Ivanov V.V. *Usloviya formirovaniya, gidrologo-morfologicheskie zavisimosti i deformatsii odnositel'no pryamolinykh nerazvetvlennykh rusel* [Conditions of formation, hydrological and morphological dependencies and deformations of relatively straight unbranched channels], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, MSU Publ., 1989, 23 p. (In Russian)
- Karasev I.F. *Ruslovyie protsessy pri perebroske stoka* [Channel processes during runoff transfer], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975, 288 p. (In Russian)
- Kargapolova I.N. *Reaktsiya rusel rek na izmeneniya vodnosti i antropogennoe vozdeistvie za poslednie stoletiya* [Response of river beds to changes in water content and anthropogenic impact over the past centuries], Extended Abstract of Ph.D. Thesis in Geography, Moscow, MSU Publ., 2006, 27 p. (In Russian)
- Komar P.D. Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, *Geology*, 1983, no. 11, p. 651–654.
- Kondrat'ev N.E., Lyapin A.N., Pin'kovskii S.I. i dr. *Ruslovoi protsess* [Riverbed process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1959, 372 p. (In Russian)
- Kondrat'ev N.E., Popov I.F., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesssa* [Fundamentals of the hydromorphological theory of the channel process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1982, 282 p. (In Russian)
- Lin' Chen'kuan'. Klassifikatsiya tipov rusel, *Vest. Nankin. un-ta*, 1963, № 1. (In Chinese)
- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [Riverbed and erosion in its basin], Moscow, AN USSR Publ., 1955, 347 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I. *Stok i ruslovyie protsessy* [Runoff and riverbed processes], Moscow, MSU Publ., 1971, 116 p. (In Russian)
- Parker G. On the cause and characteristic scales meandering and braiding rivers, *Field mech.*, 1976, vol. 76, p. 457–480.
- Popov I.V. *Metodicheskie osnovy issledovaniya ruslovogo protsesssa* [Methodological principles of studying the riverbed process], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961, 208 p. (In Russian)
- Proektirovaniye sudovykh khodov na svobodnykh rekakh [Design of shipping lanes on free rivers], tr. TsNIIIEVT, iss. 36. Moscow, Transport Publ., 1964, 262 p. (In Russian)
- Rozovskii M.L. *Dvizhenie vody na povorote otkrytogo rusla* [Movement of water at a turn in an open channel], Kiev, AN USSR Publ., 1957, 188 p. (In Russian)

- Ruslovoi rezhim rek Severnoi Evrazii* [Channel regime of the rivers of Northern Eurasia], R.S. Chalov (ed.), Moscow, MSU Publ., 1994, 316 p. (In Russian)
- Ruslovyie protsessy i vodnye puti na rekakh Obского бассейна* [Channel processes and waterways on the rivers of the Ob River basin], R.S. Chalov, E.M. Pleskevich, V.A. Baula (eds.), Novosibirsk, RIPEL-plyus Publ., 2001, 300 p.
- Ruslovyie protsessy na rekakh SSSR, Karta* [Channel processes on the rivers of the USSR, Map], M1: 4 000 000, R.S. Chalov (ed.), Moscow, GUGK USSR Publ., 1990, 4 p.
- Rzhanitsyn N.A. *Rusloformiruyushchie protsessy rek* [Channel-forming processes of rivers], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 264 p. (In Russian)
- Schumm S.A. *The fluvial system*, John Wiley and Sons, New York, 1977, 338 p.
- Shen' Yuichan, Gun Goyuan'. *Rechnaya geomorfologiya*. Pekin, Nauka Publ., 1986. (In Chinese)
- Sidorchuk A.Yu. [The main forms of river channels: meanders and branches], *Voprosy geografii, pt. 140, Sovremennaya geomorfologiya* [Modern Geomorphology], Moscow, Kodeks Publ., 2015, p. 319–340. (In Russian)
- Zamyshlyayev V.I. [Mathematical model of planned reformation of river channels], *Tr. GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1983, iss. 288, p. 53–72. (In Russian)
- Zamyshlyayev V.I. [On the lateral stability of a straight riverbed], *tr. GGI* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1982, iss. 278, p. 48–55. (In Russian)
- Zhukovskii N.N. [Review of the main phenomena of natural formation of a river bed (excerpts from the work “On the organization and system of dredging in the transit of rivers with a moving bed”)], *Volzhskoe zemlecherpanie i ego dostizheniya. Voprosy gidrotekhniki svobodnykh rek* [Volga River dredging and its achievements. Issues of hydraulic engineering of free rivers], Moscow, Rechizdat Publ., 1948, p. 329–363. (In Russian)

Received 10.05.2024

Revised 16.09.2024

Accepted 26.11.2024