

---

---

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

---

---

УДК 551.482.212;556.5

## СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ МЕАНДРИРОВАНИЯ РЕЧНЫХ РУСЕЛ И МОРФОДИНАМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗЛУЧИН

© 2025 г. Р. С. Чалов<sup>1,\*</sup>, С. Р. Чалов<sup>1,2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский университет транспорта, Москва, Россия

\*e-mail: rschalov@mail.ru

\*\*e-mail: srchalov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 30.05.2025 г.

После доработки 13.06.2025 г.

Принята к публикации 15.06.2025 г.

Меандрирующие русла — основной по распространению тип речных русел, характеризующийся исключительным разнообразием. Различные формы извилистых русел и структурные уровни меандрирования должны учитываться при обосновании водохозяйственных, путевых (на судоходных реках) и гидротехнических мероприятий, разработке прогнозов русловых переформирований, а также при палеорусловом и палеогидрологическом анализе. В статье обосновывается единая морфодинамическая классификация речных излучин. Выделены пять структурных уровней меандрирования широкопойменных русел: извилины динамической оси потока, не проявляющиеся в форме русла; побочные русла, в которых извилистость потока, огибающего побочни, проявляется в межень; нормальные излучины русла, определяющие морфодинамический тип русла; большие излучины, формирующиеся на реках с большой шириной поймы; изгибы пояса меандрирования. Для выделенных типов определены гидролого-морфологические условия их развития и соответствующие им значения параметров излучин. Для врезанных излучин в условиях ограниченного развития русловых деформаций выявлено ключевое влияние двух факторов — наибольшей водности реки за всю историю ее существования (унаследованные излучины) или геолого-геоморфологического строения территории.

*Ключевые слова:* нормальные и большие излучины, пояс меандрирования, побочное русло, извилины динамической оси потока, врезанные излучины, излучины рукавов разветвлений

DOI: 10.7868/S2658697525040041

### ВВЕДЕНИЕ

Меандрирующие (извилистые) русла рек — самая распространенная форма проявления русловых процессов. Меандрирующим руслам посвящены многочисленные исследования морфологии, гидролого-морфологических характеристик, условий формирования, деформаций и гидравлики потока (Великанов, 1958; Великанова, 1968; Виноградов, 1973; Гришанин, Замышляев, 1985; Завадский, 2001; Замышляев, 1978; Иванов и др., 1983; Кондратьев, 1954; Кондратьев и др., 1959; Маккавеев, 1955, 1971; Маккавеев, Хмелева, 1965; Матвеев, 1988; Панин, 1991; Попов, 1965; Розовский, 1957; Сидорчук, 2018; Чалов, 1979, 2008, 2011, 2016; Чалов, Алабян, 1998; Чалов и др., 2004). В последнее время были опубликованы обобщающие труды по географии распространения речных излучин

(Чалов, Чалова, 2023), в том числе на конкретных реках (Выгегде, Иртыше, Оке, средней Оби, Кети и др.), и структурным уровням меандрирования как отражению дискретности русловых процессов (Чалов Р.С., Чалов С.Р., 2023). Тем не менее, многие вопросы, связанные с генезисом излучин, причинами их морфологического разнообразия и другие остаются либо дискуссионными, либо недостаточно обоснованными. К таковым, в частности, относятся гидролого-морфологические критерии выделения излучин русла на разных структурных уровнях и различные подходы к классификации, а также проблема соотношения меандрирования с разветвлениями речных русел. Нет четких критериев выделения прямолинейных вставок или новых излучин между смежными крутыми излучинами. Врезанные излучины традиционно

изучались только в контексте исследований расположенных в них перекатов, а также в отношении перемещения потоком галечно-валунных наносов, хотя и с учетом структуры потока, возникающей под влиянием изгибов русла. В данном случае речь идет, следуя высказываниям М.А. Великанова (1958) о том, что русло управляет потоком (в условиях ограниченного развития русловых деформаций). Однако процесс меандрирования развивается, когда поток управляет руслом, т.е. в широкопойменных руслах, соответствующих свободным условиям развития русловых деформаций. Поэтому основным предметом исследования меандрирования речных русел всегда были свободные излучины, а конкретно — оценка условий их формирования и морфология русел. Особенности деформаций врезанных излучин учитываются далеко не во всех классификациях: в некоторых из них врезанные излучины относят к немеандрирующим или недеформируемым руслам и, таким образом, фактически исключают их из рассмотрения как объект изучения русловых процессов.

Все это ограничивает возможности и создает определенные затруднения при решении задач управления русловыми процессами на меандрирующих реках.

В последние годы по мере развития геоинформационных и дистанционных технологий были созданы региональные и глобальные базы данных интенсивности размыва берегов (Langhorst, Pavelsky, 2023), что существенно продвинуло понимание механизмов развития и эволюции излучин (Donovan, Belmont, 2019). Выявленные региональные различия сделали вопрос создания полной классификации еще более актуальным.

Целью настоящей статьи является обобщение более чем 50-летнего опыта исследований меандрирующих рек, проводившихся в МГУ имени М.В. Ломоносова. С гидролого-морфологических позиций приводится обоснование выделения полной классификации меандрирования рек, учитывающей все многообразие излучин (изгибов) русловых потоков. Для этого выполнены обобщение представлений об условиях формирования речных излучин, оценка особенностей их временной динамики, обоснование единой морфодинамической классификации излучин, условий и закономерностей эволюции и морфологии их отдельных типов.

## ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Исследования меандрирующих рек в МГУ имени М.В. Ломоносова были начаты еще во второй половине 50-х годов XX столетия. Первым объектом стала нижняя часть р. Вычегды. Методологическую основу исследований соста-

вили теоретические положения, изложенные в монографии Н.И. Маккавеева “Русло реки и эрозия в ее бассейне” (1955), в которой специальная глава посвящена излучинам речных русел. С тех пор были детально изучены многие меандрирующие реки России и бывших республик СССР: Вычегда по всей ее длине, Вилкой, средняя Обь и Ока, Чулым и Кеть, Дон и Иртыш, Днестр и Неман, малые реки бассейна Волги. Объектами изучения излучин явились также реки с разветвленным руслом, что связано с извилистой формой рукавов и одновременном развитии процессов меандрирования и разветвления русел. В меньшей степени уделялось внимание излучинам врезанных русел, хотя их исследования проводились на Алдане, Витиме, средней Лене, среднем Вилкое.

В состав исследований извилистых (меандрирующих) рек входили съемка и промеры русла, определение структуры потока (скоростных полей), гидрометрические измерения (особенно при изучении излучин рукавов, формировании островов на излучинах и их спрямлении), состав и распределение руслообразующих наносов, интенсивность размыва и наращивания берегов. Для руслового анализа и выявления направленности горизонтальных деформаций излучин использовались карты судоходных рек (ранее они назывались лоцманскими), регулярно издаваемых и фиксирующих состояние русел на разные временные срезы с конца XIX — середины XX в., космические и аэрофотоснимки, топографические карты. Все эти материалы использованы при подготовке данной статьи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Условия формирования излучин и структурные уровни их развития на реках с широкопойменным руслом*

Существует много гипотез формирования излучин в процессе взаимодействия речного потока с ложем реки (Чалов и др., 2004). С точки зрения физики процесса и механизмов взаимодействия потока и русла реки наиболее обоснованным представляется сочетание теорий неустойчивости прямолинейного движения потока (Гришанин, Замышляев, 1985) и гидравлической выгоды извилистой формы русла, обусловленной увеличением живой силы (мощности) потока из-за возникновения неравенства поля скоростей на излучине и зон ускорения и замедления течения в потоке. Многие авторы (Кондратьев, 1954; Friedkin, 1945; Parker, 1957) важнейшими условиями формирования излучин считают наличие внешних воздействий

на поток, инициирующих образование излучин, и несвязность грунтов и отложений, в которых они формируются (Маккавеев, 1971; Сидорчук, 2018; Чалов, 1979, 2008, 2011, 2016; Чалов, Завадский, 2004). Важным является закрепление первичного изгиба потока, благодаря которому происходит аккумуляция наносов в зонах замедления течения и формирование в них крупных грядовых форм руслового рельефа. Образовавшаяся прирусловая отмель (побочень) оказывает направляющее воздействие на поток, подход которого под углом к берегу способствует его размыву, образованию в его линии вогнутости (выбоины) и, как следствие, появлению изгиба самого русла. Закрепление изгиба потока в форме русла может также произойти под влиянием внешних воздействий на поток, таких как неровности ведущего берега, сход оползней или конусы выноса. Но и в этих случаях для того, чтобы одиночный изгиб потока стал бы импульсом к образованию извилистого русла необходимо появление аккумулятивных форм руслового рельефа — прирусловых отмелей (побочней). Сами побочни со временем зарастают растительностью и превращаются в пойменные сегменты — шпоры формирующихся излучин.

На реках с широкопойменным руслом выделяется пять структурных уровней меандрирования русел: извилины динамической оси потока, не проявляющиеся в форме русла и его рельефе → излучины меженного русла (побочневое русло) → нормальные излучины, соответствующие водности реки → большие сегментные и петлеобразные излучины → излучины (изгибы) пояса меандрирования. Каждый уровень излучин развивается в соответствии с общими закономерностями гидравлики потоков и русловых процессов, имея при этом свои специфические особенности. В то же время каждый структурный уровень генетически связан с предыдущим, отражая дискретность и континуальность русловых процессов.

**Первый** (самый низкий) **структурный уровень меандрирования** — извилистость динамической оси потока, как следствие неустойчивости его прямолинейного движения, не проявляется в форме русла, сохраняющего относительную прямолинейность. К этому типу не относятся водотоки с большими уклонами, у которых определяющую роль в их движении играет тангенциальная составляющая силы тяжести, что характерно для горных рек с порожиисто-водопадным руслом или руслом с неразвитыми аллювиальными формами (Чалов, 1979). В природе русла сохраняют прямолинейность на реках с выраженным дефицитом руслообразующих (в основном, влекомых) наносов. Это реки горных областей (таковы большие сибирские реки, как правило, с врезанным руслом — Витим,

верхний Алдан), или малые равнинные реки первого и второго порядка по системе А. Шайдегера. Эти реки не получают то количество наносов, которое обеспечило бы формирование прирусловых отмелей (побочней). В результате русло сохраняет прямолинейные очертания или имеет конфигурацию, связанную с пассивным приспособлением потока к литогенной основе или элементам геологической структуры территории. Классический пример такого русла малой равнинной реки отражен на известной картине И.И. Левитана “Золотая осень”. Извилистость динамической оси потока является характерным типом рек урбанизированных территорий, где за счет спрямления русел рек происходит создание регулируемой прямолинейной в плане формы русла, внутри которой развивается извилистость потока. Так, протяженность таких прямолинейных типов русла на месте излучин на р. Сетуни (крупнейший приток р. Москвы в пределах г. Москвы) достигает 2 км (рис. 1); русло р. Дунай было сокращено за счет спрямлений излучин более чем на 130 км.

**Второй структурный уровень меандрирования** соответствует рекам с достаточно большим стоком наносов. Извилистость динамической оси потока на таких реках создает условия для их аккумуляции в зонах местного снижения скоростей течения. Здесь происходит образование прирусловых отмелей — побочней, создающих следующий, более высокий побочневый уровень извилистости [побочневый тип руслового процесса, по классификации ГГИ (Кондратьев, Попов, 1982)]. Побочни располагаются в шахматном порядке (следствие извилистости стрежня потока) и создают, обсыхая в маловодную фазу режима, извилистость меженного русла. Такие побочневые русла характерны для нижней Вычегды, Пинеги, Мезени выше устья р. Вашки, встречаются на Иртыше, средней Оби, Вилюе (рис. 2).

В многоводную фазу побочни оказываются под водой, стержень потока проходит независимо от их расположения, а сами побочни смещаются, составляя важнейший элемент грядового движения наносов. В межень поток, огибая побочни, размывает противоположный берег, создавая начальные условия для отражения извилистости в форме русла. Однако надвижение во время половодья (паводка) вышерасположенного побочня перекрывает фронт размыва и ликвидирует первичный изгиб русла (рис. 3). Таким образом, при побочневом типе извилистости потока исходная форма русла, в котором развиты побочни, определяющие его морфологический тип, остается неизменной. Русло остается относительно прямолинейным или слабоизогнутым, если соотношение  $l/L < 1.1$  (здесь  $l$  — длина русла,  $L$  — шаг изгиба

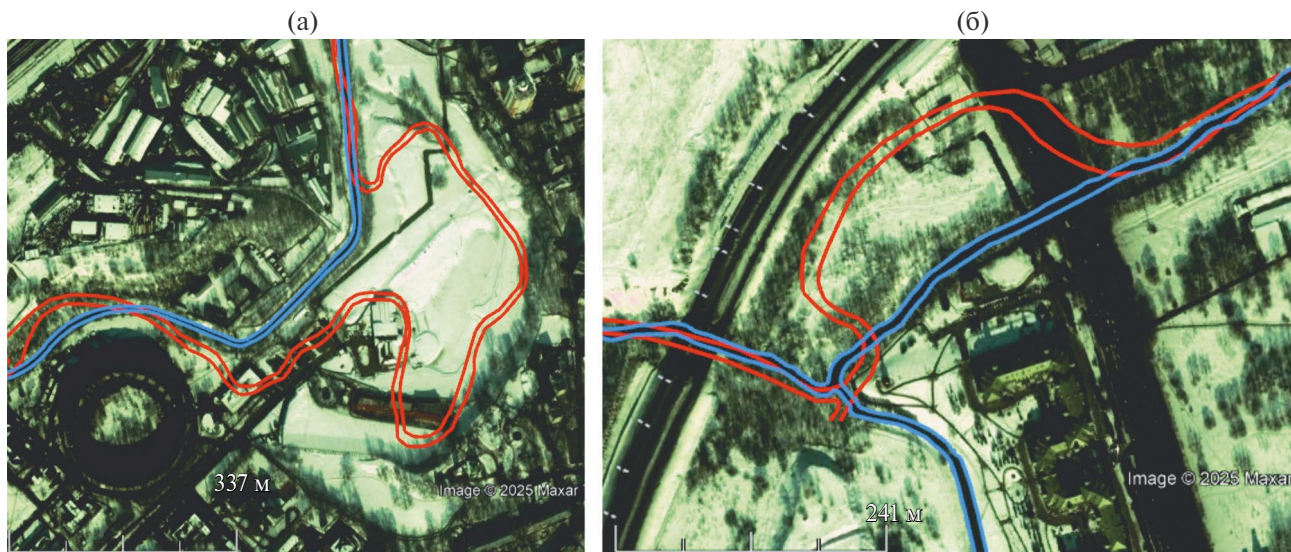


Рис. 1. Спряжения меандрирующего русла р. Сетунь (красным — по аэрофотосъемке 1942 г.; синим — космическая съемка 13 марта 2010 г.).

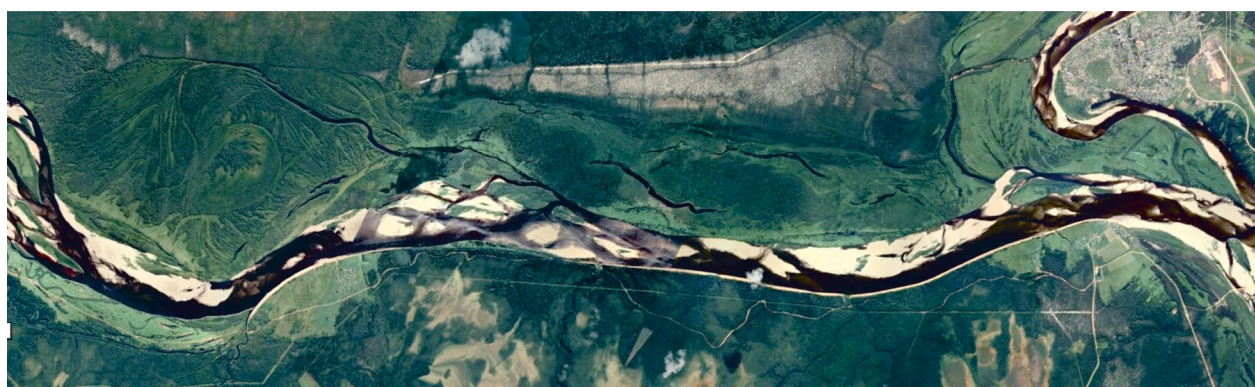


Рис. 2. Побочное русло р. Мезени выше устья р. Вашки (космоснимок, Google Earth).

или излучины). В последнем случае даже слабо выраженная извилистость обуславливает увеличение размеров побочней и замедление их смещения вдоль выпуклых берегов и частичный размыв и большие скорости смещения вдоль слабовогнутых берегов (Чалов, 1963). При надвижении побочней при их смещении в относительно прямолинейном русле на ниже расположенную развитую или крутую излучину, узел разветвления или сужение днища долины и русла, происходит замедление скорости смещения. Вследствие этого возникает своеобразное явление сжатия извилин потока и излучин меженного русла, уменьшение радиусов кривизны  $r$  вплоть до нарушения его гидравлически оптимального соотношения с шириной русла  $b_p - r \geq 2-3b_p$ . В результате образуется побочневый проток, по которому происходит отторжение лево- или правобережного побочня и спрямление извилин потока (Русловые ..., 2001).

Закрепление побочней растительностью приводит к трансформации извилин меженно-

го потока в излучины русла, т.е. формированию следующего, третьего уровня меандрирования, благодаря превращению повышенной тыловой части побочней в пойменные шпоры. Появление растительности на побочне приводит к снижению скорости потока благодаря повышению шероховатости русла и замедлению смещения побочня, аккумуляции взвешенных тонких (илистых) наносов на его поверхности. Это способствует повышению отметок бывшей отмели и активизации ее зарастания и образованию поймы. Дальнейшая эволюция излучины заключается в превращении пологий сегментной формы в крутую и далее в петлеобразную или, при определенных условиях, в синусоидальную или пальцеобразную. При достижении соотношения  $l/L = 1.4-1.8$  возможно спрямление и образования прорванной излучины.

Третий структурный уровень (нормальные излучины) является основным, наиболее распространенным на меандрирующих реках,

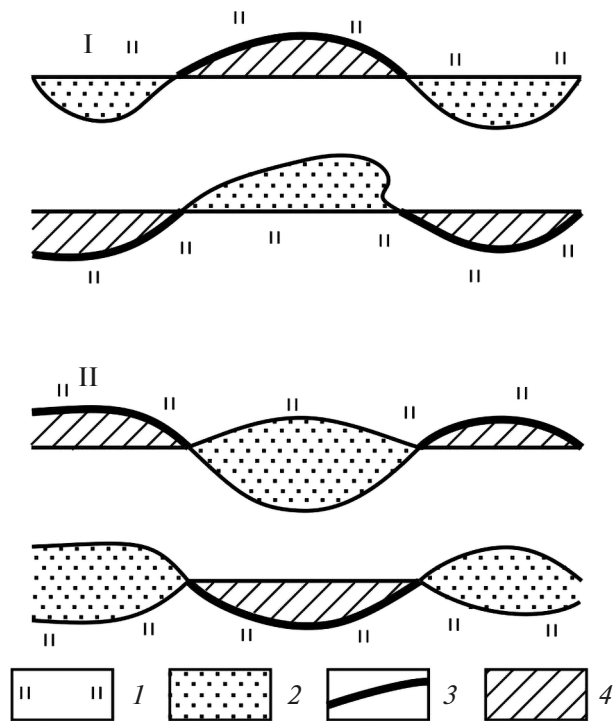


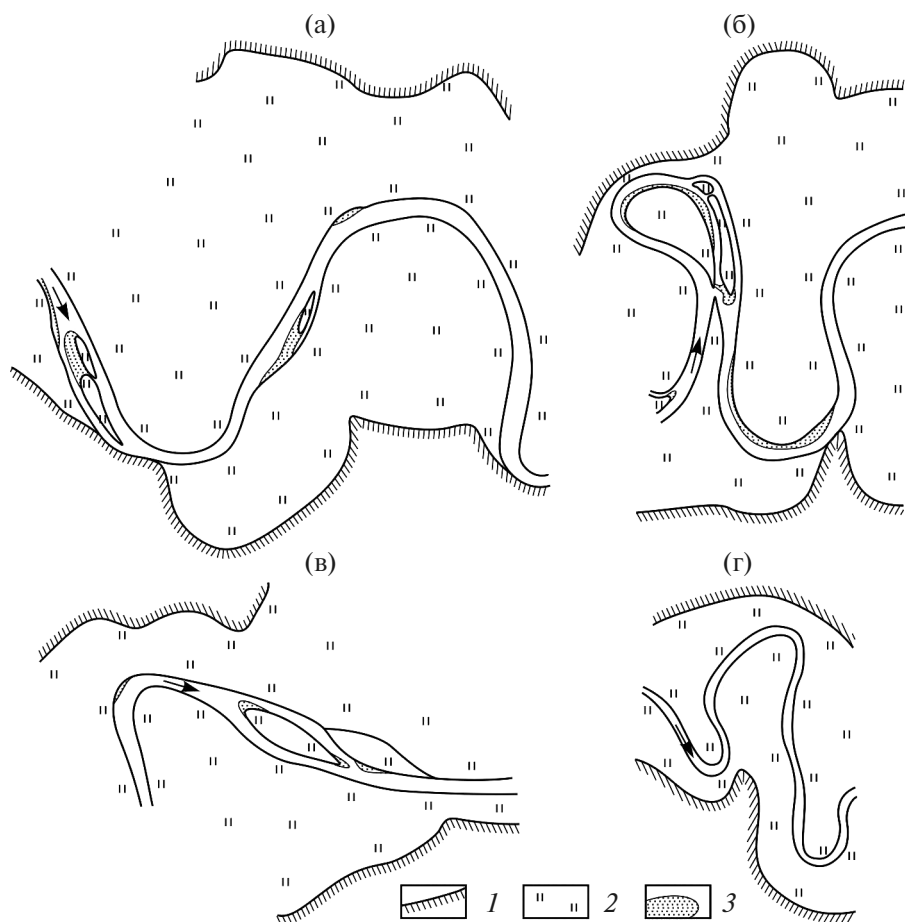
Рис. 3. Сохранение прямолинейности русла при смещении побочной и извилин потока, их огибающих и фронта размыва противоположных берегов: 1 — пойма; 2 — побочки; 3 — размываемые берега; 4 — площадь размыва.

определяющим морфодинамический тип русла. Параметры этих излучин зависят от водности реки, поэтому именно они обычно являются объектами изучения процессов меандрирования и морфологии извилистого русла. Помимо собственно меандрирующих рек, излучины этого уровня характерны для рукавов раздвоенных русел (например, для Малой и Горной Оби в нижнем течении, Юганской Оби и основного русла на широтном участке средней Оби, Ахтубы на нижней Волге, Днестру и протоке Турунчук), пойменно-русловых (средняя Обь, Вычегда) и русловых (островных) разветвлений. В последних излучины обычно пологие или развитые, образуют единичные формы, шаг которых равен длине разветвления (одна излучина в рукаве), а шпору излучины (пойменный сегмент) составляют острова. Крутые излучины таких рукавов не формируются, так как при  $l/L > 1.4$  происходит перераспределение стока между рукавами и вызванное им изменение условий формирования русел рукавов.

Излучины третьего структурного уровня создают на реках морфологически однородные участки. Модальные значения их морфологических параметров (радиусов кривизны, шагов, стрел прогиба) в целом соответствуют показателям водности реки (руслоформирующих, среднемаксимальных, среднегодовых расходов воды, порядка водотока и т.д.). При этом пояс меан-

дрирования  $B_m$  (расстояние между вершинами смежных излучин или сумма их стрел прогиба  $h_n$ ) существенно меньше ширины поймы ( $B_m \ll B_n$ ). В ряде случаев происходит трансформация нормальных излучин в большие, когда в пределах одного протяженного морфологически однородного участка среди преобладающих нормальных излучин имеется некоторое количество больших. В этом случае принимаемые для анализа модальные или средние величины параметров интегрируют в себе излучины нормальные и большие излучины, т.е. значения параметров излучин двух структурных уровней. Поэтому результаты гидролого-морфологического анализа дают в той или иной мере (в зависимости от количества больших излучин) искаженные результаты или обнаруживают отсутствие связей  $\pi = f(Q)$ , где  $\pi$  — параметры излучин ( $r, h_n, L, l/L$ ),  $Q$  — расход воды. Это характерно для больших меандрирующих рек, у которых ширина поймы  $B_n \gg 10b_p$  (Иртыш, средняя Обь, средний Амур) (Завадский, 2001; Чалов, 2016; Чалов и др., 2004). По-видимому, такой анализ должен проводиться отдельно для нормальных и больших излучин. При этом роль водности в формировании параметров излучин этого уровня отчетливо проявляется при ее направленных изменениях. Так, в р. Москве ниже Москвы в результате увеличения водности при межбассейновой переброске части стока Волги по Каналу имени Москвы произошло “выполаживание” излучин, увеличение их размеров (Каргаполова, Завадский, 2006).

Четвертый структурный уровень меандрирования представлен большими сегментными и сложными излучинами широкопойменных русел, формирующимися на реках при  $B_n > 10b_p$  (здесь  $B_n$  — ширина поймы,  $b_p$  — ширина русла). У них как правило соизмеримы ширины пояса меандрирования и стрелы прогиба. Вершины таких излучин подходят к противоположным бортам долины реки, не образуя вынужденных изгибов русла, а касаясь их, или располагаются вблизи коренных берегов. При сохранении сегментной формы они являются развитыми или крутыми, но между их крыльями имеются прямолинейные вставки, одиночные или односторонние (реже сопряженные из двух звеньев) разветвления. Встречаются ситуации, когда на вставке начинается формирование нормальных сегментных излучин, что приводит к образованию петлеобразной формы излучины (рис. 4). Иногда излучины приобретают синусоидальную или пальцеобразную форму с протяженными прямолинейными вставками между привершинными частями, занимающими до 3/4–4/5 всей излучины. Борта долин, особенно если они сложены трудно- или неразмываемыми отло-



**Рис. 4.** Разновидности излучин четвертого структурного уровня (на примере среднего и нижнего Иртыша): (а) большая сегментная излучина; (б) петлеобразная излучина; (в) синусоидальная излучина; (г) пальцеобразная излучина: 1 — коренные берега; 2 — пойма; 3 — прирусловые отмели.

жениями, препятствуют дальнейшему поперечному смещению излучин. При крутом изгибе ( $r < 2-3b_p$ ) деформации происходят в привершинной части, где стрежень потока смещается к выпуклому берегу, обеспечивая стабилизацию формы русла в целом. Возможно формирование осередков (а при их зарастании — островов) в местных расширениях русла, возникающих из-за размыва выпуклого берега при смещении к нему стрежня потока. Может также происходить спрямление привершинной, наиболее узкой и пониженной части шпоры излучин с образованием здесь острова. В любом случае деформации здесь затухают, и дальнейшие переформирования излучин сосредотачиваются на их крыльях.

Начальным импульсом к трансформации нормальных излучин в большие с образованием прямолинейных вставок между смежными излучинами является остаточная поперечная циркуляция, распространяющаяся с нижнего крыла одной излучины на верхнее крыло следующей. На это явление, вернее на его морфологические последствия, указывал еще Л. Фарг (Fargue, 1908), обративший внимание в одном из сфор-

мулированных им законов на то, что мелководная часть русла между смежными излучинами сдвинута по отношению к створу перегиба вниз по течению приблизительно на  $1/4$  суммарной длины крыльев смежных излучин. Впоследствии это нашло гидравлическое обоснование (Гришанин, 1972; Маккавеев, 1955; Розовский, 1957), упомянутое выше. На возникновение прямолинейной вставки накладывается поперечное смещение нижней излучины, сопровождающееся удлинением ее верхнего крыла. Суммарный эффект этих процессов приводит к появлению прямолинейной вставки и превращению нормальной излучины в большую.

Поперечное смещение смежных излучин начинает абсолютно преобладать при переходе их в стадию крутой сегментной излучины, у которой  $l/L > 1.7$  (Чалов и др., 2004). При этом происходит активизация циркуляционных течений, свойственных криволинейному движению потока, и, как следствие, проявление все в большей мере условий для формирования прямолинейных вставок. При этом может продолжаться продольное смещение излучин, особенно при достижении их вершинами бортов долины. Это,

в свою очередь, благоприятствует сохранению сегментной формы излучин. У нормальных излучин, у которых отсутствуют прямолинейные вставки, подобная ситуация характерна для адаптированных русел, имеющих относительно узкую пойму —  $b_p < B_n < 3-4b_p$  (Чалов, 2008). В классификации ГГИ подобный процесс получил название незавершенное меандрирование (Кондратьев и др., 1982).

При увеличении размеров излучин до безразмерного соотношения  $l/L > 1.6$  утрачивается гидравлическая выгодность извилистой формы русла (Маккаев, 1955; Милович, 1914). Затраты энергии потока начинают превышать рост его живой силы из-за увеличения неоднородности поля скоростей. Это приводит к тому, что на удлинённых прямолинейных вставках между излучинами, захватывая частично их крылья, возникает пережат, как следствие снижения средней скорости потока и его транспортирующей способности (по сравнению с излучинами), и в его пределах — изгиб потока и на его основе — нормальная излучина сегментной формы. Такие излучины формируются или на одной из вставок между большими излучинами, и тогда они приобретают гипертрофированную форму, либо на обоих, и излучины становятся петлеобразными. Образованию нормальных излучин на участках прямолинейных вставок между излучинами способствует, как в любом прямолинейном русле при достаточно большом стоке наносов, возникновение побочной (рис. 5). Развитие подобной петлеобразной излучины

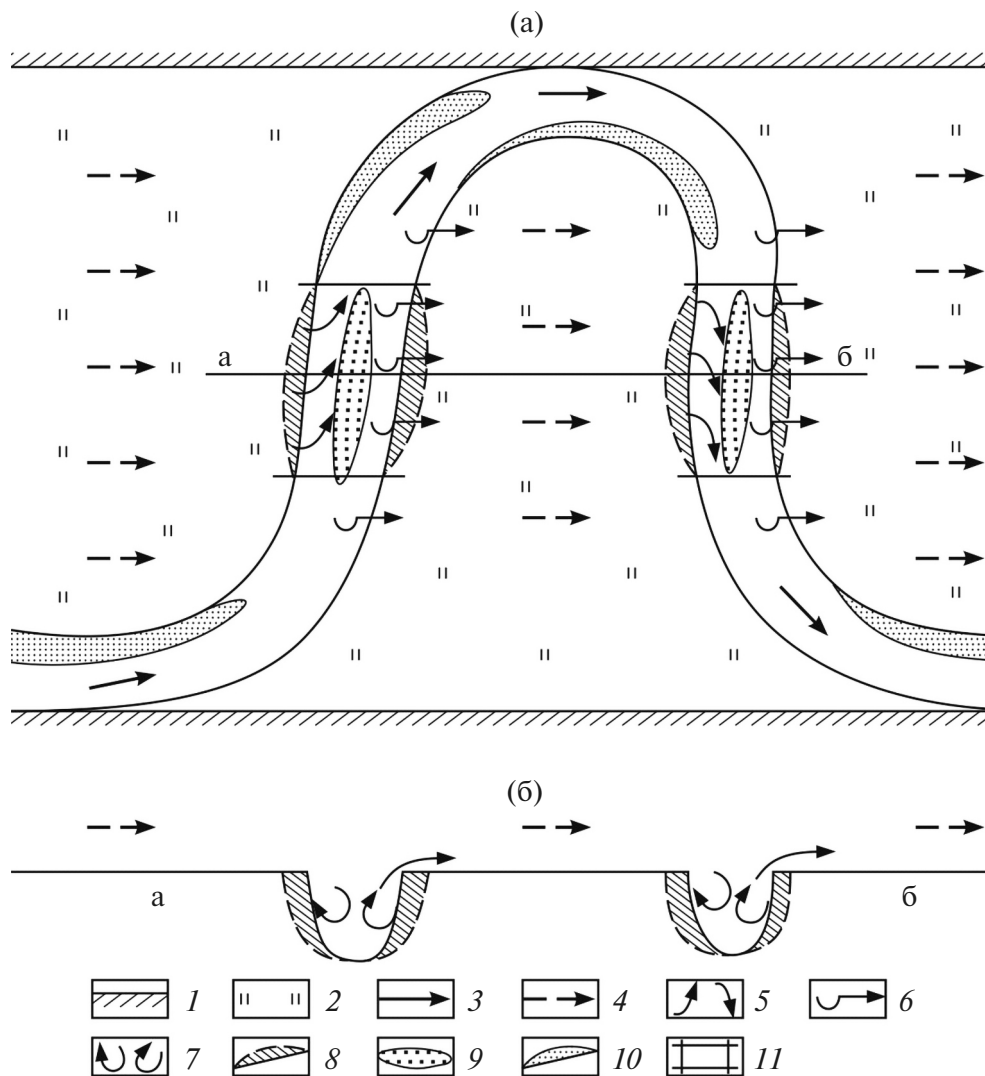
и ее спрямление благодаря встречному размыву берегов на удлинённых прямолинейных вставках крыльях было детально описано на среднем и нижнем Иртыше (Куракова, Чалов, 2022).

Если образование излучин на прямолинейных вставках, соединяющих крылья смежных излучин, не происходит, и при этом стабилизируется положение возле борта долины (ее коренного берега) вершины излучины, большая излучина трансформируется в синусоидальную или пальцеобразную. В ее пределах река переваливает от одного борта долины к другому. Та или иная форма трансформации большой излучины зависит от стока руслообразующих наносов, а при его сравнительно небольшой величине — от наличия выше по течению местных источников их поступления.

Еще одна форма трансформации больших излучин связана с формированием в пределах вставок одиночных разветвлений. Удлинённые крылья излучин (нижнее верхней и верхнее нижней) и прямолинейные вставки между ними располагаются поперек (или по диагонали) к оси поймы реки и, соответственно, к направлению потока воды. Вследствие этого происходит слив воды с поймы со стороны верхней излучины и перелив воды на пойму, образующую шпору нижней излучины (рис. 6). В обоих случаях у левого и правого берегов возникают в потоке вихри с горизонтальной осью (Лебявский, 1948; Маккаев, 1955), размывающие берега и переносящие наносы — продукты размыва, к се-



Рис. 5. Начальная стадия формирования излучины на прямолинейной вставке между смежными большими излучинами (р. Днестр). Фотография Р.С. Чалова.



**Рис. 6.** Формирование одиночного разветвления между смежными большими излучинами: (а) — план русла и течения; (б) — профиль по оси дна долины. 1 — борта долины; 2 — пойма; 3 — направление течения руслового потока; 4 — то же на затопленной пойме; 5 — слив воды с поймы в русло; 6 — перелив воды из русла в пойму; 7 — вихревые течения в русле при пересечении руслового и пойменного потоков; 8 — размывы берегов; 9 — осередки в местных расширениях русла; 10 — прирусловые отмели; 11 — прямолинейная вставка между излучинами.

редине русла. В результате возникает местное расширение русла с осередком, при зарастании превращающимся в остров (Чалов и др., 2023). Таким образом, между смежными большими излучинами формируются осередковые или одиночные островные разветвления, в которых поток рассредоточивается по рукавам. Огибая вновь сформировавшиеся острова, каждый из них образует излучины со свойственным им скоростным полем, появлением зон ускорения течения, увеличением средней скорости и транспортирующей способности потока (Экспериментальная ..., 1969). Этот процесс, как и формирование нормальной излучины в пределах бывшей прямолинейной вставки, в свою очередь, отражает восстановление живой силы (мощности) потока и гидравлической выгоды извилистой формы русла.

Большие сегментные излучины встречаются в рукавах пойменно-русловых разветвлений, обычно в одном из них, в виде единого большого изгиба крутой сегментной формы. Второй рукав, как правило, с меньшей водностью, меандрирует, образуя серию излучин (до 5–7), параметры которых, как и у большой излучины первого рукава, соответствуют его водности. Такие соотношения больших излучин одного и нормальных другого рукава характерны для пойменно-русловых разветвлений средней Оби, рукавов раздвоенного русла нижней Оби (Чалов Р.С., Чалов С.Р., 2023).

Параметры больших излучин при одной и той же или соизмеримой водности реки колеблются в широких пределах, определяясь стадией развития излучины. На них влияют объемы потока воды, поступающего в пределы затопленной

поймы и в пойменные протоки (ответвления, составляющие пойменную многорукавность), изгибы долины в целом, неровности коренных берегов и другие местные причины. Наиболее репрезентативным, для сравнения с нормальными излучинами, параметром является стрела прогиба  $h_{\text{п}}$ . На среднем и нижнем Иртыше она всегда больше 2000 м, возрастая вниз по течению по мере увеличения водности реки и достигая 4000–5000 м. Соответственно ширина пояса меандрирования  $B_{\text{пм}}$ , представляющего сумму стрел прогиба смежных излучин  $B_{\text{пм}} = h_{\text{п1}} + h_{\text{п2}}$ , равняется от 4000–4500 м до 8000–10000 м, охватывая всю или большую часть ширины поймы. У нормальных излучин на Иртыше  $h_{\text{п}}$  всегда меньше 2000 м, составляя в среднем 400–6000 м и возрастая в нижнем течении до 1500–1600 м.

Наличие на меандрирующих реках больших сегментных и петлеобразных излучин (помимо Иртыша они имеются на Вычегде, Вилюе, средней Оби, Оке) при их спрямлении оставляет следы в рельефе поймы в виде старичных понижений и озер в ее тыловой части. Это обстоятельство следует учитывать, используя параметры бывших излучин (старич) на пойме для палеогеологических и палеогеографических построений за время формирования поймы.

**Пятый структурный уровень меандрирования**, самый высокий, составляют изгибы пояса меандрирования (рис. 7). Это — наименее, или даже вообще неисследованная форма извилистости речных русел. Она встречается на реках с широкопойменным руслом, у которых  $B_{\text{п}} \gg 10b_{\text{р}}$ , с относительно выдержанным направлением долины (на уровне ее днища — поймы + русла). Ее проявлением являются извилины оси пояса меандрирования серий нормальных излучин, из которых периодически лишь одна-две располагаются возле бортов долины, а остальные по диагонали пересекают пойму. В результате серии излучин последовательно находятся в противоположных частях долины и посередине ее днища, прерываясь при образовании больших излучин, на изгибах долин и при сужении их днища. Изгибы пояса меандрирования описаны на среднем Иртыше, Вычегде выше устья Сысолы, средней Оби между устьями рр. Томи и Ваха.

На реках, русла которых формируются в условиях ограниченного развития русловых деформаций, размеры врезанных излучин и, соответственно, их параметры определяются геолого-геоморфологическими условиями, в которых они формируются (Матвеев, 1988; Панин, 1991; Чалов и др., 2004). Наиболее близки к свободному меандрированию и развитию форм русел на разных структурных уровнях унаследо-

ванные врезанные излучины, образовавшиеся при врезании ранее свободно меандрирующих рек в рыхлые или пластичные (но размываемые, хотя и замедленно) отложения. Поэтому у них возможно проявление структурных уровней развития излучин. Их размеры отражают наибольшую водность реки за все время ее существования и наибольшую удельную величину расхода воды, сосредотачивающегося в русле во все фазы режима.

Вторая разновидность врезанных излучин — литологически или структурно-геологически (тектонически) обусловленные, формы и размеры которых полностью определяются геологическим строением территории, сложенной в основном скальными породами (Панин, 1991; Чалов и др., 2004).

#### *Морфодинамическая классификация меандрирующего типа русла*

Излучины третьего и четвертого структурных уровней меандрирования, т.е. меандрирующих типов русла, являются предметом морфодинамических классификаций. Как российскими, так и зарубежными исследователями было предложено несколько их вариантов. Выделяемые в классификация ГГИ (Кондратьев и др., 1982; Попов, 1965) свободное, незавершенное, ограниченное меандрирование и побочный тип русловых процессов поставлены авторами в зависимость от транспортирующей способности потока. Н.И. Маккавеев (1971) типизировал излучины по их форме в плане, которая соответствует преимущественному виду их смещения — продольному, поперечному и продольно-поперечному: сегментные, петлеобразные, синусоидальные, заваленные, прорванные и сундучные. А.С. Завадский (2001) разработал классификацию по стадиям развития излучин (пологие, развитые, крутые сегментные, петлеобразные и т.д.), определив для них основные количественные показатели степени развитости  $I/L$ . К.В. Гришанин (1972) выделял свободные и вынужденные излучины. В морфодинамической классификации МГУ (Чалов, 1979, 2008), все излучины разделены последовательно по разным признакам на свободные, вынужденные и адаптированные широкопойменных русел и врезанные, и далее — по их конфигурации в плане, морфологической сложности, форме смещения, структуре потока, условиям спрямления, расположению зон размыва и аккумуляции наносов. Однако эта классификация не учитывает структурные уровни их развития, в первую очередь — нормальные и большие излучины, формирование разветвлений между смежными излучинами, на их крыльях и в привершинных частях, раз-

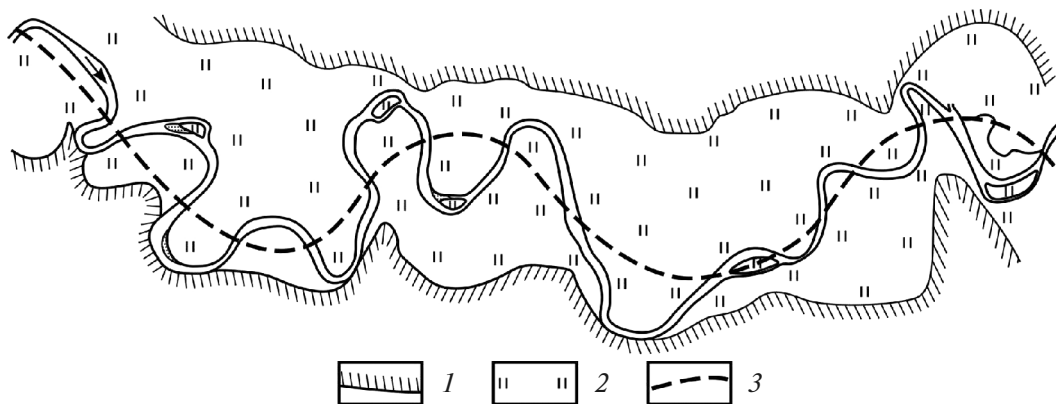


Рис. 7. Изгибы пояса меандрирования на среднем Иртыше: 1 — борта долины; 2 — пойма; 3 — ось пояса меандрирования.

витие излучин благодаря образованию островов у выпуклых берегов, излучины рукавов русловых (островных) и пойменно-русловых разветвлений и раздвоенного русла, пойменных проток — ответвлений, образующих пойменную многорукавность. При этом не определены различия между излучинами, создающими морфологически однородные участки, и излучинами, осложняющими разветвленное или прямолинейное русло, формирующиеся как единичные формы среди других типов русла или их осложняющие.

На рис. 8 представлена полная классификация излучин речных русел, которую следует рассматривать как дальнейшее развитие и уточнение морфодинамической классификации МГУ (Чалов, 2011) в отношении излучин русла. В ней показано многообразие излучин и форм проявления меандрирования, соотношения между ними и другими типами русла (разветвлениями). Излучины, создающие морфологически однородные участки, соответствующие тому или иному типу широкопойменного, адаптированного (при  $b_p < B_n < 2-3b_p$ ) и врезанного русла, составляют верхнюю и центральную части классификационной схемы. К ним могут быть отнесены излучины рукавов пойменно-русловых разветвлений, но при крупномасштабной оценке русловой морфодинамики, и раздвоенного русла при крупно- и среднемасштабной.

Излучины каждого геоморфологического типа (широкопойменные, адаптированные и врезанные) представлены обособленными ячейками, отличаясь по условиям формирования, морфологическим и морфометрическим параметрам. Так в адаптированном русле преобладают сундучные излучины, создающие морфологически однородные участки. Здесь небольшая ширина поймы ( $B_n < 2-3b_p$ ) позволяет формироваться только пологим и развитым сегментным излучинам, смещающимся исключительно в продольном направлении и сравнительно быстро трансформирующимся в вынужденные

и адаптированные (Чалов, 2011). Если берега таких русел легкоразмываемые, формируются вписанные излучины, привершинные части которых создают фестончатые очертания коренных берегов. При разнородной литологии левого и правого коренных берегов возникает чередование вписанных у одного и сундучных излучин у другого берега (рис. 9), вершины которых располагаются в противоположных частях дна долины.

Врезанные излучины подразделяются на унаследованные (в рыхлых или размываемых пластичных грунтах) и структурные (в скальных грунтах). В первом случае они сохраняют сегментную форму от пологой до крутой, отличаясь от широкопойменных русел длительностью своего развития и большими значениями морфологических параметров. Форма структурных врезанных излучин полностью определяется геологическим строением территории (литологией, тектоникой, разломами и т.д.), а их формирование происходит на протяжении геологических отрезков времени, в течении которых поток лишь моделирует исходную форму. В отношении русловых процессов они относятся к категории недеформируемых [русло управляет потоком, по М.А. Великанову (1958)], и русловые деформации сводятся к перемещению наносов, образующих галечно-валунные формы руслового рельефа.

В нижней части классификационной схемы помещены разновидности излучин, не образующие типы русла и не составляющие морфологически однородные участки (за исключением излучин рукавов раздвоенных русел крупных рек). К ним относятся излучины рукавов одиночных, односторонних, сопряженных и пойменно-русловых разветвлений, рукавов раздвоенных русел на малых и отчасти средних реках, а также излучины, осложненные разветвлениями на крыльях или в привершинных частях. Последние возникают из-за несовпадения направлений руслового и пойменного потоков,

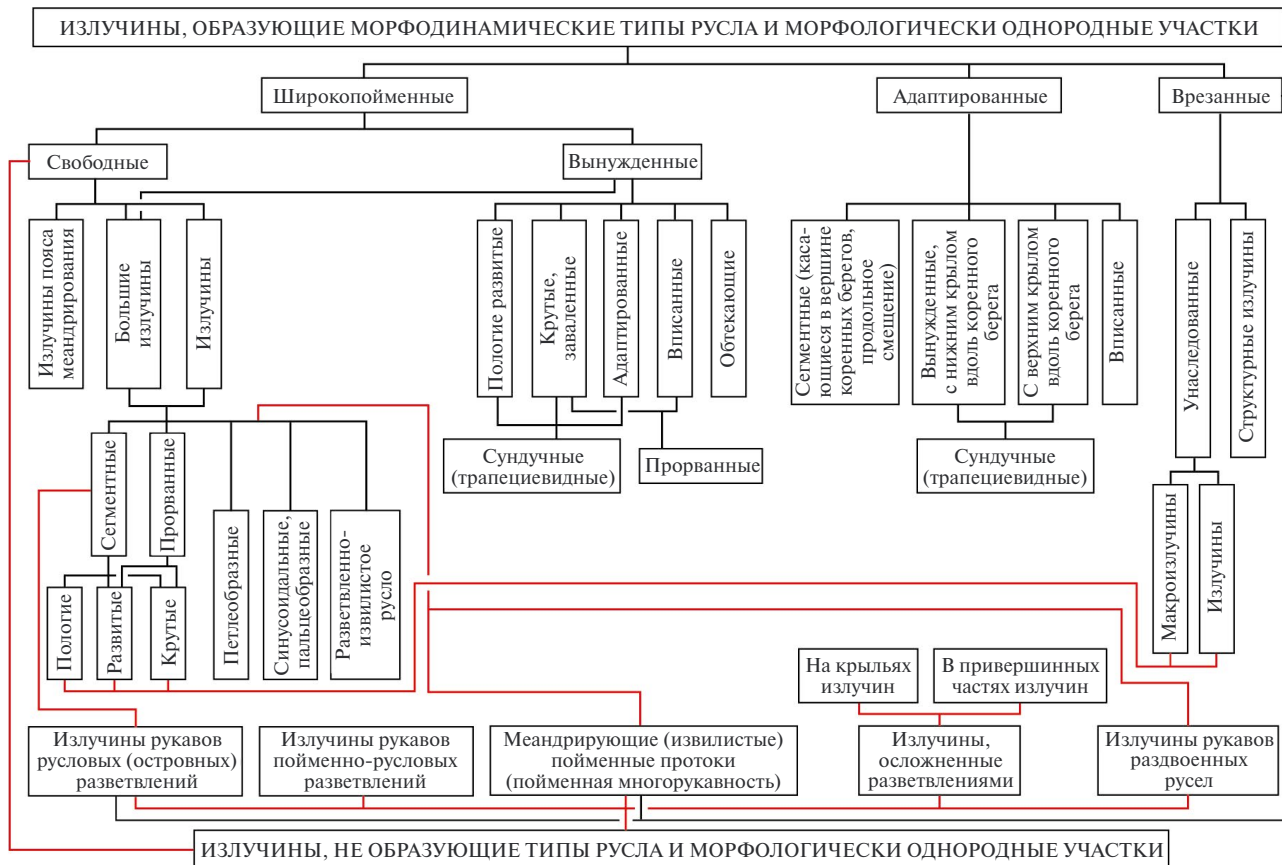
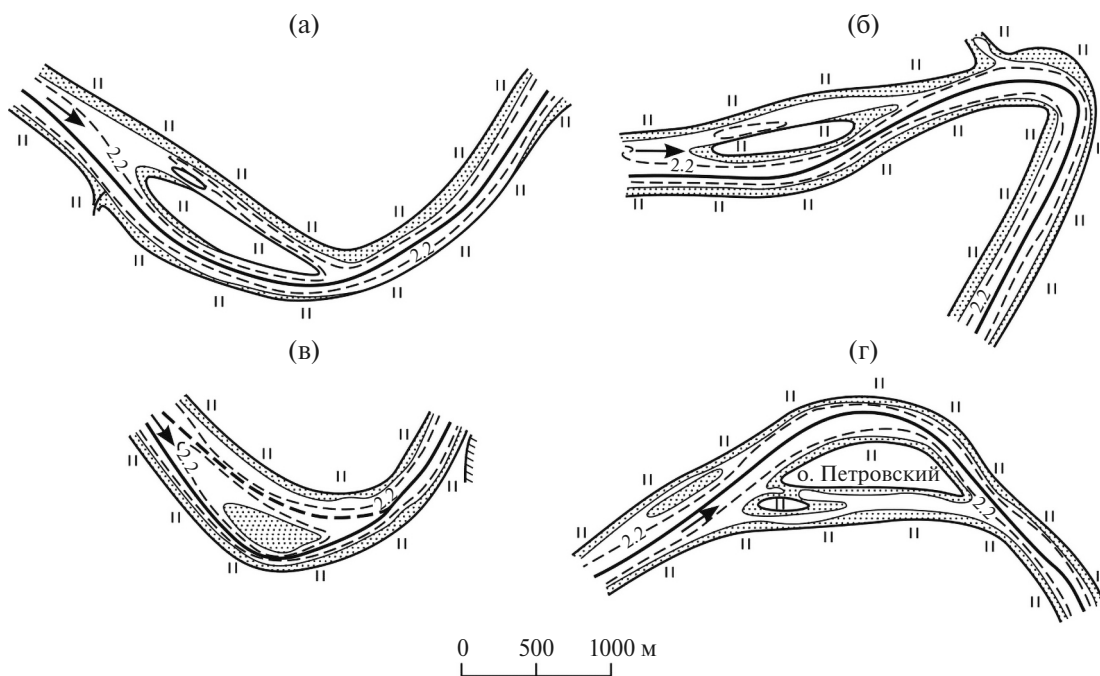


Рис. 8. Полная (сводная) морфодинамическая классификация извилистых (меандрирующих) русел — речных излучин.



Рис. 9. Сундучные и вписанные излучины адаптированного русла. Скандинавские горы. Фотография З. Бабиньского.



**Рис. 10.** Излучины русла, осложненные разветвлениями: (а) на крыльях свободных излучин; (б) в верхнем крыле вынужденной излучины; (в) в привершинной части излучины при условии  $r < 2-3b_p$ ; (г) при отторжении привершинной части шпоры.

а также в условиях подпора, возникающего от крутого поворота русла в вершине излучины, особенно вынужденной при расположении нижнего крыла вдоль коренного берега. Нередко оба эти фактора проявляются одновременно, и тогда возникает особенно сложное разветвление в верхнем крыле излучин (рис. 10а, б).

В привершинных частях излучин разветвления возникают при их большой кривизне, когда  $r < 2-3b_p$ . В этом случае стрежень потока отрывается от вогнутого берега и, подходя к выпуклому, вызывает его размыв. В расширении русла образуется осередок, который зарастая, со временем превращается в остров (рис. 10в). Из-за большой кривизны русла может также произойти частичное отторжение привершинной части шпоры, и тогда остров имеет эрозионное происхождение (рис. 10г). В спрямляющую протоку перемещается значительная часть расхода воды, происходит рассредоточение стока, сказывающееся в последующем развитии излучины.

На реках со слабоустойчивым руслом при большом стоке наносов и в тех случаях, если русло подстилается трудно размываемыми грунтами, возникают гидравлические условия для разделения потока на ветви течения. По И.Ф. Карасеву (1975), это происходит, если критерий квазиоднородности потока  $\theta = \frac{h}{b_p} \sqrt{\lambda} \geq 9.5$  (здесь  $\lambda = \frac{2g}{C^2}$  — коэффициент гидравлических сопротивлений,  $C$  — коэффициент Шези): при относительно малой глубине и повышенной ширине русла на его

излучинах формируются разветвления. По этой же причине на больших и тем более крупнейших реках излучины развиваются благодаря образованию островов у выпуклых берегов, в зонах замедления течения и аккумуляции наносов. В этих условиях русло становится разветвленно-извилистым, если образующиеся острова повторяют по своему расположению изгиб русла, или его излучина огибает группу прибрежных островов, протоки между которыми ее спрямляют. В таком случае спрямление излучины осуществляется при достижении степени развитости  $l/L = 1.4$  по одной из спрямляющих излучину протоку между островами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ условий формирования и морфологических проявлений процессов меандрирования речных русел, их деформаций, эволюции и перестроений позволили определить основные структурные уровни развития излучин: 1) излучины, размеры которых соответствуют размеру реки и изменяющие свою форму (от пологих сегментных до крутых петлеобразных) и параметры в процессе их деформаций; 2) большие сегментные с прямолинейными вставками между смежными излучинами, петлеобразные, синусоидальные и пальцеобразные, стрела прогиба и пояс меандрирования которых соизмеримы с половиной и более ширины и шириной дна долины (поймы); 3) изгибы пояса меандрирования, которые на современном этапе остаются практически неизученными в отношении их генезиса,

морфодинамики и гидроморфологии. Установлено, что первичными уровнями меандрирования, не отражающимися в морфологии русла, являются извилины динамической оси потока и побочные русла, в которых меженный поток огибает обсыхающие прирусловые отмели. Большие излучины, которые характеризуются образованием прямолинейных вставок вследствие остаточной поперечной циркуляции ниже створа перегиба между смежными излучинами, при дальнейшем развитии осложняются разветвлениями.

Разработана полная морфодинамическая классификация излучин русла. Она включает геоморфологические типы (широкопойменные, адаптированные, врезанные), структурные уровни развития широкопойменных русел (собственно излучины — нормальные, соответствующие водности реки; большие излучины; изгибы пояса меандрирования), морфодинамические типы нормальных и больших излучин, разновидности адаптированных и врезанных излучин. Эти излучины, образующие морфодинамические типы русла и морфологически однородные участки на реках, составляют основную часть классификации. Вторая часть классификации объединяет излучины, не образующие типы русла и морфологически однородные участки. К таковым относятся излучины рукавов русловых (островных) и пойменно-русловых разветвлений, излучины, осложненные разветвлениями на их крыльях и в привершинных частях, и меандрирующие (извилистые) протоки пойменных ответвлений, составляющие пойменную многорукавность. Излучины рукавов раздвоенных русел (самый высокий структурный уровень разветвленных русел) определяют морфологически однородные участки на больших и крупнейших реках, на которых этот тип русла имеет распространение на протяжении нескольких десятков и первых сотен километров.

Морфодинамические типы широкопойменных русел представляют собой определенные стадии их развития. В отличие от них излучины адаптированных и тем более врезанных русел характеризуются относительно стабильными формами, сохраняющимися даже при их смещении (сегментные и вписанные излучины адаптированного русла) или относящимися к категории недеформируемых. Излучинам каждого выделенного в классификации типа присущи определенные закономерности эволюции (продольного или поперечного смещения, изменений скоростного поля потока, морфологических и морфометрических параметров), которые должны учитываться при водохозяйственном и воднотранспортном освоении реки, предотвращении опасных проявлений и при других видах использования речных ресурсов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши (№ 121051400038-1) и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева (№ 12105100166-4) (исходные данные) при финансовой поддержке РФФИ (проект 2317-00065 — натурные исследования, русловой анализ). Анализ излучин рек урбанизированных территорий выполнен в рамках гранта РФФИ № 25-17-00073. Гидролого-морфологический анализ выполнен в рамках госзадания РУТ № 103-0001-25-02 от 20.03.2025 г.

## FUNDING

This paper was prepared as part of the Department of Land Hydrology's (project no. 121051400038-1) and the Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes' (project no. 12105100166-4) scientific research plans, with financial support from the Russian Science Foundation (project no. 23-17-00065), Russian University of Transport state contract (no. 103-00001-25-02 from March 20, 2015). The analysis of urban rivers was conducted as part of the Russian Science Foundation project no. 25-17-00073.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Великанов М.А.* Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
- Великанова З.М.* Лабораторные исследования речных излучин // Тр. ГГИ. 1968. Вып. 147. С. 40–51.
- Виноградов В.А.* Некоторые особенности структуры потока и морфологии излучин при свободном меандрировании // Тр. ГГИ. 1973. Вып. 209. С. 36–59.
- Гришанин К.В.* Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 286 с.
- Гришанин К.В., Замышляев В.И.* Возникновение меандрирования рек как проблема гидродинамической неустойчивости // Тр. ГГИ. 1985. Вып. 301. С. 5–12.
- Завадский А.С.* Гидролого-морфологический анализ меандрирования русел равнинных рек. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2001. 27 с.
- Замышляев В.И.* О причинах меандрирования рек (обзор работ зарубежных авторов) / Вопросы гидрологии суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. С. 133–141.
- Иванов В.В.* Условия формирования, гидролого-морфометрические зависимости и деформации относительно прямолинейных неразветвленных русел. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1989. 23 с.
- Иванов В.В., Матвеев Б.В., Чернов А.В.* Особенности развития излучин при изменении условий руслоформирования // Геоморфология. 1983. № 3. С. 71–78.
- Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 288 с.

- Каргаполова И.Н., Завадский А.С.* Естественные изменения русла нижнего течения р. Москвы и его трансформация в условиях интенсивной хозяйственной деятельности // Геоморфология. 2006. № 1. С. 45–56.
- Кондратьев Н.Е.* О дискретности русловых процессов // Проблемы русловых процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1953. С. 34–42.
- Кондратьев Н.Е.* Русловые деформации в меандрирующем русле // Тр. ГГИ. 1954. Вып. 44 (98). С. 5–13.
- Кондратьев Н.Е., Ляпин А.Н., Попов И.В., Пиньковский С.И., Фёдоров Н.Н., Якунин Н.А.* Русловой процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 272 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сущенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
- Лелявский Н.С.* О речных течениях и формировании речного русла // Тр. 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб., 1893 (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 146–156).
- Куракова А.А., Чалов Р.С.* Морфодинамика русла нижнего Иртыша // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 99–109.
- 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.
- Маккавеев Н.И., Хмелева Н.В.* Смещение речных излучин // Речной транспорт. 1965. № 1. С. 34–36.
- Матвеев Б.В.* Процесс меандрирования и развития речных долин // Геоморфология. 1988. № 1. С. 63–69.
- Милович А.Я.* Нерабочий изгиб потока жидкости // Бюлл. Политех. общ-ва. 1914. № 10. С. 5–72.
- Панин А.В.* Морфология и динамика врезанных галечно-валунных русел. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1991. 24 с.
- Попов И.В.* О формах перемещения речных излучин // Тр. ГГИ. 1956. Вып. 56 (110). С. 36–57.
- Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 328 с.
- Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. 1964. Вып. 36. 262 с.
- Розовский И.Л.* Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд-во АН УССР, 1957. 188 с.
- Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
- Сидорчук А.Ю.* Меандры речного русла // Маккавеевские чтения. 2017. М.: Географ. ф-тет МГУ, 2018. С. 93–104.
- Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С.* Динамика перекатов и ее количественные характеристики // Вопросы географии. М.: Географиз, 1963. Вып. 63. С. 100–111.
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Чалов Р.С.* Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2016. 569 с.
- Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В.* Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В.* Речные излучины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 571 с.
- Чалов Р.С., Камышев А.Л., Куракова А.А., Голубцов Г.Б.* Формирование разветвлений на излучинах русла // Вест. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2023. Т. 78. № 6. С. 64–78.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р.* Дискретные свойства русловых процессов и их отражение в морфодинамике речных русел // Водные ресурсы. 2023. Т. 87. № 2. С. 234–249.
- Чалов Р.С., Чалова Е.Р.* Географические закономерности меандрирования русел рек России // География и природные ресурсы. 2023. № 3. С. 13–24.
- Чалов С.Р.* Гидрологические функции разветвленного русла. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2007. 25 с.
- Экспериментальная геоморфология. М.: Изд-во МГУ, 1969. Вып. 2. 173 с.
- Ярославцев И.А.* Особенности руслового процесса на излучинах русла в паводок // Тр. ГГИ. 1966. Вып. 136. С. 77–81.
- Allen J.B.I.* Sedimentary structures: their character and physical basis. Vol. II. Amsterdam: Isevier, 1994.
- Fargue L.* La forme du lit des rivières a fond mobile. Paris: Gauthier-Villars, 1908. 87 p.
- Ferguson R.T.* The Threshold between meandering and braiding // Proc. Intern. Conf. "Channels and channel conral structures". Berlin e. a. 1984. № 6. P. 15–29.
- Fredsoe G.* Meandering and braiding of rivers // G. Fluidl. Mech. 1978. Vol. 84. № 4. P. 609–624.
- Friedkin G.F.* A Laboratory study of the meandering of alluvial rivers / US Army Corps Eng. Waterways Experimental Station. Vicksburg: Mississippi, 1945. 40 p.
- Hickin E.G.* Mean flow structure in meanders of the Squamish River, British Columbia // Can. G. Earch. Sce. 1978. Vol. 15. № 11. P. 1833–1849.
- Hooke J.M.* Changes in river meanders: A river of technigues and results of analyses // Progress in Pysical Feography. 1984. № 8. P. 473–508.
- Knighton A.D.* The meander problem // Geography. 1977. P. 2. № 275. P. 106–111.
- Leopold L.B., Wolman M.G.* River meander // Geol. Soc. Am. Bull. 1960. Vol. 71. P. 70–79.
- Parker G.* On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers // J. of Fluid Mechanics. 1976. № 76. P. 457–480.
- Rice J.C.* Pianform properties of meandering rivers in River vandering // Proceedings of the Conferece — Rivers' 83. American Society of Civil Engineers. New Orleans, 1984. P. 1–15.
- Tincler K.J.* Pools, riffles and meanders // Geol. Soc. Am. Bull. 1970. Vol. 81. № 2. P. 547–552.
- Yang C.T.* On River meanders // G. Hydrol. 1971. Vol. 13. № 3. P. 231–253.

## Structural Levels of Meandering of River Channels and Morphodynamic Classification of Bends

R. S. Chalov<sup>a,\*</sup> and S. R. Chalov<sup>b,\*\*</sup>

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

\*e-mail: rschalov@mail.ru

\*\*e-mail: hydroserg@mail.ru

The study presents a novel classification of meandering channels, as well as the hydrological and morphological drivers of their evolution. The classification includes bends in the flow that are not related to channel patterns and that exist under small runoff and sandy channel-forming sediments; side-bar channels, in which the sinuosity of the flow enveloping the side channels is manifested during the low-water period, normal bends in the channel that form specific patterns; morphologically homogeneous sections; characteristic of the sleeves of channels; floodplain-channel branches and bifurcated channels; large meanders formed on rivers with large floodplains, where the tops of adjacent meanders are located near or at opposite ends of the valley; and meander belts. For incised meanders, characteristic of limited conditions for the development of channel deformations, their shape and parameters are associated with a greater specific value of the channel-forming water flow (due to the absence of dispersion of runoff across the flooded floodplain), a reflection of the greatest water content of the river throughout the history of its existence (inherited meanders) or the geological and geomorphological structure of the territory. The morphological manifestations of the structural levels of meandering (normal and large meanders) are reflected in the newly developed, comprehensive classification of river channels. This classification includes both the meanders that determine the type and form of morphologically homogeneous sections of the channel, and the meanders of the branches of channel, floodplain-channel branches and bifurcated channels. Various forms of meandering channels and structural levels of meandering should be taken into account when substantiating water management, route (on shipping rivers) and hydraulic engineering measures, developing forecasts of channel reformations and paleochannel and paleohydrological analysis.

*Keywords:* normal and large bends, meandering belt, side channel, bends of the dynamic axis of the flow, incised bends, bends of branching branches

### REFERENCES

- Allen J.B.I. *Sedimentary structures: their character and physical basis. Vol. 2.* Amsterdam: Elsevier, 1994.
- Chalov R.S. Dynamics of riffles and its quantitative characteristics. In *Voprosy geografii. Vyp. 63* [Problems of Geography. Vol. 63]. Moscow: Geograf. Publ., 1963, pp. 100–111. (In Russ.).
- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov* [Geographic Studies of Channel Processes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ. Publ., 1979. 232 p.
- Chalov S.R. Hydrological functions of a branched channel. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation.* Moscow: Moscow State Univ., 2007. 25 p.
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: Teoriya, geografiya, praktika. T. 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* [Riverbed Science: Theory, Geography, Practice. Vol. 1. Channel Processes: Factors, Mechanisms, Forms and Conditions of Channel Formation]. Moscow: LKI Publ., 2008. 608 p.
- Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnykh rusel* [Riverbed Science: Theory, Geography, Practice. Vol. 2: Morphodynamics of River Channels]. Moscow: KRASAND Publ., 2011. 960 p.
- Chalov R.S. *Ruslovye processy (ruslovedenie)* [Channel Processes (Riverbed Science)]. Moscow: INFRA-M Publ., 2016. 569 p.
- Chalov R.S. Chalov S.R. Discrete properties of channel processes and their reflection in the morphodynamics of river channels. *Water Resour.*, 2023, vol. 87, no. 2, pp. 234–249. (In Russ.).
- Chalov R.S. Chalova E.R. Geographical patterns of river channel meandering in Russia. *Geogr. Nat. Resour.*, 2023, vol. 44, pp. 198–207. <https://doi.org/10.1134/S1875372823030034>
- Chalov R.S., Alabyan A.M., Ivanov V.V., Lodina R.V., Panin A.V. *Morfodinamika rusel ravninnykh rek* [Morphodynamics of Lowland River Beds]. Moscow: GEOS Publ., 1998. 288 p.
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. *Rechnye izluchiny* [River Meanders]. Moscow: Izd-vo MGU, 2004. 371 p.
- Chalov R.S., Kamyshev A.L., Kurakova A.A., Golubcov G.B. Formation of branches at bends in the riverbed. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2023, vol. 78, no 6, pp. 64–78. (In Russ.).
- Ekspperimental'naya geomorfologiya. Vyp. 2* [Experimental Geomorphology. Issue 2]. Moscow: Izd-vo MGU, 1969. 173 p.

- Fargue L. *La forme du lit des rivières a fond mobile*. Paris: Gauthier-Villars, 1908. 87 p.
- Ferguson R.T. The Threshold between meandering and braiding. In *Proc. Intem. Conf. "Channels and channel contral structures"*, no 6. Berlin, 1984, pp. 15–29.
- Fredsoe G. Meandering and braiding of rivers. *G. Fluid. Mech.*, 1978, vol. 84, no. 4, pp. 609–624.
- Friedkin G.F. *A laboratory study of the meandering of alluvial rivers*. Vicksburg: US Army Corps Eng. Waterways Experimental Station, 1945. 40 p.
- Grishanin K.V. *Teoriya ruslovogo protsesssa* [Channel Process Theory]. Moscow: Transport Publ., 1972. 216 p.
- Grishanin K.V., Zamyshlyayev V.I. The emergence of river meandering as a problem of hydrodynamic instability. In *Tr. GGI. Vyp. 301* [Proc. of the State Hydrological Institute. Issue 301]. Leningrad, 1985, pp. 5–12. (In Russ.).
- Hickin E.G. Mean flow structure in meanders of the Squamish River, British Columbia. *Can. J. Earth Sci.*, 1978, vol. 15, no. 11, pp. 1833–1849.
- Hooke J.M. Changes in river meanders: A river of techniques and results of analyses. *Prog. Phys. Geog.*, 1984, no. 8, pp. 473–508.
- Ivanov V.V. Formation conditions, hydrological-morphometric dependencies and deformations of relatively straight, unbranched channels. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 1989. 23 p.
- Ivanov V.V., Matveev B.V., Chernov A.V. Features of the development of bends with changing channel formation conditions. *Geomorfol.*, 1983, no. 3, pp. 71–78. (In Russ.).
- Karasev I.F. *Ruslovye protsessy pri perebroske stoka* [Channel Processes During Runoff Diversion]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1975. 288 p.
- Knighton A.D. The meander problem. *Geogr.*, 1977, vol. 275, no. 2, pp. 106–111.
- Kondrat'ev N.E. On the discreteness of channel processes. In *Problemy ruslovykh protsessov* [Problems of Channel Processes]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ, 1953, pp. 34–42. (In Russ.).
- Kondrat'ev N.E. Channel deformations in a meandering channel. In *Tr. GGI. Vyp. 44* [Proc. of the State Hydrological Institute]. Moscow, 1954, pp. 5–13. (In Russ.).
- Kondrat'ev N.E., Lyapin A.N., Popov I.V., Pin'kovskii S.I., Fedorov N.N., Yakunin N.A. *Ruslovoi process* [Riverbed Process]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1959. 272 p.
- Kondrat'ev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesssa* [The Basics of Hydromorphological Theory of Channel Processes]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1982. 272 p.
- Kurakova A.A., Chalov R.S. Morphodynamics of Lower Irtysh riverbed. *Geomorfol.*, 2022, vol. 53, no. 4, pp. 99–109. (In Russ.).
- Langhorst T., Pavelsky T. Global observations of riverbank erosion and accretion from Landsat imagery. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2023, vol. 128. <https://doi.org/10.1029/2022JF006774>
- Lelyavskii N.S. About river currents and formation of river beds. In *Tr. 2-go s'ezda inzhenerov-gidrotehnikov v 1893 g.* [Proc. of 2<sup>nd</sup> Hydrotechnic Engineers Congress]. St. Petersburg, 1893.
- Leopold L.B., Wolman M.G. River meander. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1960, vol. 71, pp. 70–79.
- Makkaveev N.I. Ruslo reku i eroziya v ee basseine [River Bed and Erosion in Its Basin]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1955. 347 p.
- Makkaveev N.I. *Stok i ruslovye protsessy* [Runoff and Channel Processes]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1971. 116 p.
- Makkaveev N.I., Khmeleva N.V. Shifting river bends. *Rechn. Transport*, 1965, no. 1, pp. 34–36. (In Russ.).
- Matveev B.V. The process of meandering and development of river valleys. *Geomorfol.*, 1988, no. 1, pp. 63–69. (In Russ.).
- Milovich A.Ya. Non-working bend in fluid flow. *Byull. Politekhn. Obshch.*, 1914, no. 10, pp. 5–72. (In Russ.).
- Panin A.V. Morphology and dynamics of incised pebble-boulder channels. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 1991. 24 p.
- Parker G. On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers. *J. Fluid Mechanics*, 1976, no. 76, pp. 457–480.
- Popov I.V. On the forms of movement of river bends. In *Tr. GGI. Vyp. 56* [Proc. of the State Hydrological Institute. Issue 56]. Leningrad, 1956, pp. 3–57. (In Russ.).
- Popov I.V. *Deformatsii rechnykh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Deformations of River Channels and Hydraulic Engineering]. Leningrad.: Gidrometeoizdat. Publ., 1965. 328 p.
- Rice J.C. Planform properties of meandering rivers in River. In *Proceedings of the Conference – Rivers' 83. American Society of Civil Engineers*. New Orleans. 1984, pp. 1–15.
- Rozovskii I.L. Dvizhenie vody na povorote otkrytogo rusla [Movement of Water at a Turn in an Open Channel]. Kiev: Izd-vo AN SSSR, 1957. 188 p.
- Ruslovye processy i vodnye puti na rekakh Ob'skogo basseina* [Channel Processes and Waterways on the Rivers of the Ob' Basin]. Novosibirsk: RIPEL plus Publ., 2001. 300 p.
- Sidorchuk A.Yu. River bed meanders. In *Makkaveevskie chteniya – 2017* [Makkev's Readings – 2017]. Moscow: Geogr. fakul'tet MGU, 2018, pp. 93–104. (In Russ.).

- Tinler K.J. Pools, riffles and meanders. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1970, vol. 81, no. 2, pp. 547–552.
- Tr. CNIIEVT. T. 36: Proektirovanie sudovykh khodov na svobodnykh rekakh [Proceedings of CNIIEVT. Vol. 36: Design of shipping lanes on free rivers], 1964. 262 p.
- Velikanov M.A. Ruslovoi process [Riverbed Process]. Moscow: Gosfizmatizdat Publ., 1958. 395 p.
- Velikanova Z.M. Laboratory research of river bends. In *Tr. GGI. Vyp. 147* [Proc. of the State Hydrological Institute. Issue 147]. Leningrad, 1968, pp. 40–51. (In Russ.).
- Vinogradov V.A. Some features of the flow structure and morphology of bends during free meandering. In *Tr. GGI. Vyp. 209* [Proc. of the State Hydrological Institute. Issue 209]. Leningrad, 1973, pp. 36–59. (In Russ.).
- Yang C.T. On River meanders. *G. Hydrol.*, 1971, vol.13, no. 3, pp. 231–253.
- Yaroslavtsev I.A. Features of the channel process on bends of the channel during flood. *Tr. GGI. Vyp. 136* [Proc. of the State Hydrological Institute. Issue 136]. Leningrad, 1966, pp. 77–81. (In Russ.).
- Zamyshlyayev V.I. On the causal factors of river meandering (review of works by foreign authors). In *Vopr. gidroplogii sushy* [Land Hydrology Questions]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1978, pp. 133–141. (In Russ.).
- Zavadskii A.S. Hydrological and morphological analysis of meandering of channels of lowland rivers. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Moscow State Univ., 2001. 27 p.