

УДК 551.482.212:556.5

## ДИСКРЕТНЫЕ СВОЙСТВА РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В МОРФОДИНАМИКЕ РЕЧНЫХ РУСЕЛ

© 2023 г. Р. С. Чалов<sup>а</sup>, \*, С. Р. Чалов<sup>а</sup>

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

\*e-mail: rschalov@mail.ru

Поступила в редакцию 14.06.2022 г.

После доработки 19.12.2022 г.

Принята к публикации 28.12.2022 г.

В статье на основе обобщения материалов по рекам Северной Евразии анализируется дискретность проявления русловых процессов и морфодинамических типов русла. Выделены пять структурных уровней относительно прямолинейных, меандрирующих и разветвленных рек. Процесс разветвления проявляется в существовании на реках точечных, осередковых, русловых (островных), пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел (в дельтах больших и крупнейших рек – дельтовых разветвлений); процесс меандрирования – в извилистости динамической оси потока, не образующей русловых форм, побочном русле, излучинах (пологих, развитых и крутых сегментных), сложных петлеобразных и больших излучинах. Из-за неустойчивости прямолинейного движения потока структурные уровни прямолинейных неразветвленных участков русла выделяются по их размерам: плесовые ложины на перекатах, вставки между смежными излучинами и звеньями сопряженных разветвлений, участки между одиночными разветвлениями и плесовые протяженные участки вдоль коренных берегов или во врезанном русле. Каждый структурный уровень генетически связан с предыдущим (осередки и побочки – основа формирования разветвлений и излучин и т.д.), представляют собой последовательности, хотя в ряде случаев это может иметь и иное происхождение (внутрипойменные перехваты, реликты дельтовых разветвлений и др.). На всех уровнях разветвлений и прямолинейного русла проявляются процессы меандрирования (излучины проток и рукавов, огибающих осередки и острова, извилистость рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел) и формируются острова на крыльях и в привершинных частях излучин. Развитость той или иной формы проявления русловых процессов и уровней их проявления определяются размерами рек (малых, средних, больших и крупнейших), свободными или ограниченными условиями развития русловых деформаций, шириной поймы реки и ее соотношением с шириной русла, условиями прохождения руслоформирующих расходов воды и рядом местных факторов.

*Ключевые слова:* дискретность, континуальность, русловые процессы, структурные уровни, излучины, разветвления, прямолинейные русла

DOI: 10.31857/S2587556623020036, EDN: KELFGA

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных теоретических положений учения о русловых процессах (русловедения) является представление о дискретности (прерывистости) русловых процессов и их неразрывности (континуальности), определяемой свойствами сплошной среды (Кондратьев, 1953, 2000; Сидорчук, 1992; Чалов, 2006). Понятие “дискретность русловых процессов” было впервые введено Н.Е. Кондратьевым (1953), который выделил четыре структурные уровня развития русловых процессов: отдельные частицы наносов – микроформы (малые гряды, “покрывающие обычно все дно потока..., воспринимаемые как его шероховатость”) – мезоформы [“крупные песчаные скопления, соизмеримые с шириной русла” (Кондра-

тьев, 2000, с. 237)] – макроформы [формы самого русла и поймы: “примером может служить речная излучина с прилегающими к ней пойменными массивами” (Кондратьев, 2000, с. 238)]. Впоследствии оно стало рассматриваться как одно из главных положений гидроморфологической теории руслового процесса, развиваемой в ГГИ (Кондратьев, 1982) и как один из общих законов русловых и, в целом, эрозионно-аккумулятивных процессов (Эрозионно-русловые ..., 2017). При этом основу выделения дискретных уровней составляет различие в формах и специфике механизма транспорта (перемещения) наносов, что соответствует представлениям о роли, наряду с самим водным потоком, стока и транспорта наносов как ведущих (активных) факторов русловых процессов. Н.С. Знаменская (1976) на основе принципа

эмерджентности указывала на одинаковые законы развития процессов на разных уровнях.

По Н.И. Маккавееву (1955), «процесс руслообразования можно определить как процесс “отображения” поверхностью твердой среды (т.е. грунтами, слагающими ложе) особенностей движения воды и *перемещаемых ею наносов*» (выделено авторами), а “формы русла можно рассматривать ... как одну из форм перемещения твердого вещества текущей водой ...” (Маккавеев, 1955). Он же рассматривал русловые процессы на четырех главных уровнях: продольный профиль реки–пойма–формы русла–перекаты, каждому из которых соответствуют свои закономерности взаимодействия потока и русла, специфика проявлений эрозии, транспорта и аккумуляции наносов, их баланс и особенности структуры потока. При этом при обосновании дискретности русловых процессов доказывалась взаимность между структурными уровнями их развития, которая позднее наиболее четко была сформулирована А.Ю. Сидорчуком (1992) как принцип континуальности. Он заключается в “непрерывности руслового потока и поля отметок дна речного потока и поля отметок дна речного русла, взаимосвязанности и взаимопереходах отдельных форм русла”.

Аналогичные теоретические подходы к рассмотрению последовательной смены русловых процессов характерны и для англоязычной литературы. Теория руслового “конвейера” (*jerky conveyor belt*) Д. Фергюсона важнейшим свойством транспорта вещества и энергии по длине русловых систем рассматривает эпизодичность в связи с временной задержкой потоков на разных уровнях при сохранении единства процесса (Ferguson, 1981). Понятие континуальности транспорта наносов [*sediment continuity* (Joyce et al., 2018)] характеризует закон сохранения массы при перемещении вещества из верхних в нижние звенья эрозионно–русловой системы (ЭРС). К. Fryirs выделил продольные, поперечные и вертикальные связи между частями эрозионно–русловой системы (соответственно склон–приток–река; горизонтальные деформации; вертикальные деформации) (Fryirs et al., 2007). В общем случае, вниз по течению снижается проявление продольных и поперечных связей и увеличивается выраженность вертикальных связей. Важным свойством дискретности указывалось сочетание эрозионных, транзитных и аккумулятивных участков по длине русловой сети (Fryirs, 2013; Fryirs et al., 2007).

Рассмотренные подходы были обобщены и объединены в единую схему структурной организации (дискретности) русловых процессов, форм их проявления и взаимодействия (континуальности) между ее уровнями (Чалов, 2006). При этом на уровне грядовых форм руслового рельефа и

продольного профиля реки дано более дробное, хотя, возможно, и неполное, выделение структурных уровней (подуровней) в каждом из них. Очевидно, что сложность и многообразие факторов, условий и форм проявления русловых процессов столь велики, что подобное деление возможно и для типов русла (излучины, разветвления, относительно прямолинейные участки), с одной стороны, и для самих русел, формируемых потоками разных размеров. Каждый основной структурный уровень русловых процессов состоит из составных частей (уровней, по отношению к общей схеме – подуровней), отличающихся по гидродинамической структуре потока, его водности, формам и механизмам транспорта и аккумуляции наносов, и, как следствие, размерам русловых форм и их динамике. Наблюдается иерархичность уровней русловых процессов разного масштаба (от системы плес–перекат с характерным масштабом  $>10$  м до морфологически однородных участков и зон продольного профиля с характерным масштабом  $>10^3$  м). Однако в отношении форм русла такой подход был осуществлен только для рек с разветвленным руслом (Чалов Р.С., Чалов С.Р., 2020). Выделялись точечные, осередковые, русловые (островные), пойменно–русловые и пойменные разветвления. Но если точечное, осередковое и русловое разветвления формируются в русле любого геоморфологического типа (врезанном и широкопойменном), то остальные присущи только свободным условиям развития русловых деформаций (широкопойменные русла). Их развитию должны в большинстве случаев соответствовать определенное соотношение между шириной дна долины (пойма + русло) и руслом реки  $B_d/b_p$  и прохождение руслоформирующего расхода воды  $Q_{\phi}$  верхнего интервала при затоплении поймы (Чалов, 1979). Для рек с меандрирующим и относительно прямолинейным, неразветвленным руслом такой структурный подход до сих пор не применялся, хотя соответствующие ему зависимости, особенно в отношении меандрирующих русел, очевидны (Кондратьев, 1959; Маккавеев, 1955; Попов, 1965; Чалов и др., 2004). Сложнее обстоит дело с прямолинейными неразветвленными руслами, которым вообще в исследованиях морфодинамических русел почти не уделяется внимания из-за ограниченности их распространения или смещения руслового анализа на более низкий структурный уровень [таково выделение, например, ленточногрядового и побочного русел в типизации русловых процессов ГГИ (Кондратьев, 1982; Попов, 1965)].

Таким образом, целью статьи стало обоснование дискретности проявления русловых процессов на реках трех основных морфодинамических типов русла. Выявляются общие условия формирования русел разного морфодинамического типа на всех структурных уровнях в зависимости от

Тип русловых процессов	Размер реки	Параметр		Преобладание морфодинамических типов русел	
		N	$b_p/h$	Широко- пойменные	Врезанные
Горные, полугорные и равнинные реки	Русла временных и постоянных водотоков в овражно-балочной сети	—	1 : 2–1 : 3	—	Прямолинейные, пассивно приспособленные
	↓				
	Русла ручьев	1–2	<20	Излучины	Врезанные излучины, прямо- линейные
	↓				
	Русла малых рек	<10			
	↓				
	Русла средних рек	9–10 < N < 14–15	>20		
Равнинные реки	↓				
	Русла больших рек	>14–15	>100	Развет- вления	Прямолинейные, разветвления
	↓				
Русла крупнейших рек					

Рис. 1. Структура русловой системы и параметры речных русел.

размеров (водоносности) рек и геолого-геоморфологических условий их формирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Структурные уровни русловой сети

Дискретность русловых процессов, как и условия их развития, определяется ведущими основными факторами — стоком воды и стоком наносов. Однако последний во многом сам является производной взаимодействия потока и русла, результатом размыва потоком грунтов, слагающих берега и ложе реки. При этом особенности взаимодействия и проявления русловых процессов зависят от размеров (водоносности) рек, величина которых, в свою очередь, является причиной направленных изменений морфометрических характеристик их русел. По мере увеличения стока вниз по течению развитие получают все более морфологически сложные формы русла. Поэтому дискретность русловых процессов, количество и формы структурных уровней развития, соотношения и взаимосвязь между ними связаны с размерами (водноностью) водных потоков и, следовательно, неодинаковы на разных реках (рис. 1). На это накладывается сток наносов и его соотношение с транспортирующей способностью потоков:  $W_{R+G} > W_{тр}$  или  $W_{R+G} < W_{тр}$  (здесь  $W_{R+G}$  — сток взвешенных  $R$  и влекомых  $G$  наносов,  $W_{тр}$  — транспортирующая способность потоков), свободные или ограниченные условия развития рус-

ловых деформаций, горный, полугорный или равнинный тип русловых процессов, устойчивость русел и влияние других факторов, по-разному проявляющихся в различных природных условиях.

Русла постоянных водотоков в овражно-балочной сети (ручьев в общепринятой терминологии) и ручьев (самых малых рек 1–2 порядков), практически лишенных наносов, являются врезанными и пассивно приспособленными к литогенной основе, определяясь составом и свойствами слагающих ее грунтов. Но уже русла малых, транспортирующих достаточное для развития русловых форм наносов, являясь широкопойменными, меандрируют, образуя очень крутые, морфологически очень сложные излучины в условиях соизмеримости (в пределах до 1 : 10) ширины  $b_p$  и глубины  $h$  потока. При этом к малым рекам относятся имеющие порядок  $N$  (по системе А. Шайдеггера в модификации Н.И. Алексеевского (1998) до 8–9, определяемой по первому перегибу кривой зависимости  $b_p/h = f(N)$  (Пахомова, 2021)). Для врезанных русел малых рек формирование морфодинамического их типа зависит от геолого-геоморфологического строения бассейна и долины, создающих ограниченные условия для развития русловых деформаций.

На средних реках широкопойменные русла также меандрируют, но т.к. «интенсивность поперечной циркуляции растет с кривизной русла (т.е. обратно радиусу закругления потока), становится ясным, что чем больше водоносность (а

значит и ширина) реки, тем развитие в ней меандров идет слабее” (Великанов, 1958, с. 31). К этому следует добавить, что винтообразная поперечная циркуляция в извилистом русле наблюдается при  $b_p/h < 20$ , заменяясь при больших значениях лишь отклонением донных струй в направлении поперечного уклона, т.е. к выпуклому берегу. Отсюда, чем больше река, тем слабее ее меандрирование и положе изгибы русла. Уже на больших и крупнейших реках [по И.Ф. Карасеву (1975)  $\frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda} > 9.5$ ;

здесь  $\lambda = \frac{2g}{C^2}$  – коэффициент гидравлических сопротивлений,  $C$  – коэффициент Шези] поток разбивается на несколько ветвей течения, что обуславливает при достаточном стоке наносов формирование разветвленных русел. Одновременно с увеличением размеров реки происходит сокращение соотношения  $B_d/b_p$  от 300–400 на малых реках до 3–4 на крупнейших (Маккавеев, 1955; Чернов, 1983), что является определенным условием для развития как излучин русла, так и разветвлений разного типа. На крупнейших реках (Нижняя Обь, Нижняя Волга и др.)  $B_d/b_p$  иногда намного превышает 10 (на Нижней Оби в районе впадения в нее Северной Сосьвы  $B_d = 60$  км при суммарной ширине рукавов раздвоенного русла до 3 км; на Нижней Лене, водность которой больше, чем на Оби,  $B_d/b_p \approx 2.5$ ). Границей между средними и большими реками (по модели А. Шайдеггера) по тем же перегибам кривых является  $N = 14–15$ ; при  $N > 14–15$  соотношение  $b_p/h$  резко возрастает даже при незначительном увеличении  $N$ , а сама зависимость  $b_p/h = f(N)$  приобретает линейный вид.

Во врезанных руслах больших и особенно крупнейших рек ограничивающий русловые деформации геолого-геоморфологический фактор является ведущим в их развитии. Здесь имеет место преимущественное формирование прямолинейного неразветвленного русла, структурных врезанных излучин и русловых разветвлений.

На горных реках преобладают врезанные русла порожиисто-водопадные и с неразвитыми аллювиальными формами – относительно прямолинейные, с развитыми аллювиальными формами и полугорные – врезанные излучины. Во внутригорных котловинах, троговых долинах в приледниковых зонах и при выходе рек в предгорья наиболее характерны разветвленные осередкового типа, образующие в межень многочисленные протоки среди обширных аллювиальных полей, занимающих все днище долины. Эти закономерные соотношения нарушаются под воздействием селевых потоков, проходящих по руслам горных малых рек или выходящих из притоков в крупные горные реки, а также на реках со скальным руслом.

### *Структурные уровни развития русел разного типа и их взаимосвязи*

Рассмотренные особенности преимущественного распространения русел основных морфодинамических типов на малых, в том числе самых малых – ручьях, средних, больших и крупнейших реках определяют условия развития структурных уровней разветвленности, извилистости и прямолинейности русел рек. В результате формируются вторичные русловые образования в рукавах, на излучинах и прямолинейных участках, относящиеся к уровням более высокого ранга, а также осложняющие излучины или рукава русловых разветвлений. Важнейшими факторами формирования тех или иных структурных уровней являются ширина дна долины реки и соотношение  $B_d/b_p$ , прохождение руслоформирующего расхода воды при затопленной пойме или в ее бровках, соответствие параметров форм русел водности рек и стоку наносов, направленность общих вертикальных русловых деформаций (врезание рек или направленная аккумуляция наносов, устойчивость русла и интенсивность их переформирования (горизонтальные русловые деформации)). Они определяют как формирование русла и его морфодинамическое разнообразие, так и вероятность развития форм русел.

В табл. 1 представлены основные структурные уровни формирования разветвлений (Чалов Р.С., Чалов С.Р., 2020), меандрирования и формирования относительно прямолинейных, неразветвленных русел. Самый низкий структурный уровень представлен точечными разветвлениями, излучинами динамической оси потока как следствие неустойчивости прямолинейного движения потока, которые не находят отражение в форме самого русла. Для прямолинейных русел в первом приближенном к этому уровню отнесены случайно возникающие короткие прямолинейные отрезки потока, развивающиеся в извилины динамической оси потока или ветви течения при

$$\frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda} > 9.5.$$

Осередковые разветвления вместе с извилинами потока, огибающими побочни (побочное русло), соответствуют развитию макроформ руслового рельефа. Прямолинейные отрезки возникают в плесовых ложинах напротив побочней или в протоках возле осередков, образующих обычно пологие излучины меженного русла, вогнутость которых друг по отношению к другу имеет зеркальное отражение. Русловые (островные) разветвления, излучины русла и прямолинейные участки “вставки” между смежными излучинами (особенно на синусоидальных излучинах), звеньями сопряженных разветвлений или соседними разветвлениями любого типа, где поток собирается в едином неразветв-

**Таблица 1.** Структурные уровни развития русла разного морфодинамического типа

Структурный уровень	Разветвления	Излучины (меандрирование)	Относительно прямолинейные русла
I (низший)	Точечные	Извилины потока	—
II	Осередковые	Побочное русло	Плесовые лощины; прямолинейные протоки у осередков
III (основной)	Русловые (островные)	Излучины (сегментные пологие, развитые, крутые)	Прямолинейные вставки между смежными излучинами, одиночными и звеньями сопряженных разветвлений
IV	Пойменно-русловые	Сложные петлеобразные излучины, большие излучины	Прямолинейные участки вдоль ведущих коренных берегов
V (высший)	Раздвоенное русло, дельтовая пойменная многоруканность	Излучины пояса меандрирования	Прямолинейное неразветвленное широкопойменное, врезанное или адаптированное русло

ленном русле, составляют основной структурный уровень развития форм самого русла. Он определяет его морфологический облик и режим горизонтальных русловых деформаций.

Таким образом, выделяются три уровня русловых процессов. Первые два соответствуют межённому руслу и связаны с рельефом русла. Третий уровень образует формы самого русла, его морфодинамический тип. Более высокие уровни — пойменно-русловые разветвления и раздвоенное русло на многорукавных реках, сложные петлеобразные и большие излучины и излучины пояса меандрирования, свойственны только рекам с широкопойменным руслом. Прямолинейное неразветвленное русло встречается редко как в свободных (широкопойменное русло), так и в ограниченных (врезанное русло) условиях развития русловых деформаций. Оно преобладает во врезанных и адаптированных руслах, у которых, соответственно,  $B_p < b_p$  или ширина поймы  $B_p$  превышает  $2-3b_p$ .

При прочих равных условиях количество структурных уровней, как и форм русел разного типа, зависит от размеров реки и ширины днища (пойма + русло) долины. Во врезанном русле оно всегда минимально, в широкопойменном — максимально, причем любые формы русла (излучины, разветвления, прямолинейные отрезки) осложняются формами второго или третьего порядков, создавая очень сложную морфологическую структуру русла. Во всех случаях наибольшей иерархической сложностью и разнообразием отличаются разветвления, самой простой — прямолинейные неразветвленные русел. Точечные разветвления создают морфодинамический тип русла только на горных реках. Во всех других руслах они либо единичны (на малых реках), либо проявляется только в периферических отдаленных зонах. Полный набор структурных уровней

разветвлений встречается на широкопойменных реках, а излучин — также на широкопойменных, но ограничивается большими реками. Крупнейшим рекам меандрирование вообще не свойственно, развиваясь только в рукавах раздвоенных русел и пойменно-русловых разветвлений. В русловых (островных) разветвлениях излучины, как правило, представляют собой единичные формы рукавов, огибающих острова, соответствующие шпорам излучин.

Каждому структурному уровню присущи свои гидравлическая структура потока, формы проявления, соотношения с другими типами русла и уровнями их развития, значимость в общей системе русловых деформаций, стоке руслообразующих наносов и, в конечном счете, в русловом режиме реки.

**Основными структурными уровнями разветлений** являются точечные, осередковые, русловые (островные), пойменно-русловые и раздвоенные русла. *Точечные разветвления* (Алексеевский, 2009; Алексеевский, Чалов, 2009; Чалов, 2007) характерны для горных рек с порожиисто-водопадным руслом или руслом с неразвитыми аллювиальными формами и для малых равнинных рек с галечно-валунным руслом, у которых размеры валунов и глыб  $d_{\max}$  превышает глубину потока в межень, и они разделяют поток на ветви течения. На средних и больших галечно-валунных реках они встречаются только в периферических частях русел, на мелководьях. К этой же категории относятся локальные выступы скал в русле, но, в отличие от образованных валунами и глыбами, отличающиеся постоянством своего положения и неизменностью форм, если только возле них не происходит аккумуляции наносов. На отдаленных частях песчаных русел точечные разветвления возникают при спаде уровней, возникая при частичном обсыхании ультрамикро- и микроформ

грядового рельефа, полностью перестраиваются потоком при их новом затоплении. Точечные разветвления существуют только в межень и исчезают в высокую воду и меняют свое положение при смещении глыб и валунов, ультрамикро- и микроформ руслового рельефа (Chalov and Alexeevsky, 2015).

*Осередковые разветвления* (рис. 2а) являются межненными образованиями, будучи связанными с обсыханием в межень повышенных частей гряд — мезо- и макроформ руслового рельефа. В многоводную фазу водного режима они оказываются под воздействием потока, перемещаются, деформируются, изменяют свою конфигурацию и перестают разделять поток на ветви течения. Осередки, образующиеся в процессе переформирования перекатов, существуют в течение ряда лет. Условием окончания их развития является причленение к берегу. Нередко осередки приурочены к местным расширениям русла и их положение стабильно. При слабом затоплении они обеспечивают разделение потока на ветви течения, а из-за снижения скорости потока над ними на их поверхности аккумулируются тонкие наносы, служащие субстратом для развития растительности, что способствует росту осередков в высоту (Martynov, 2020). Со временем в таких или подобных условиях осередки превращаются в элементарные острова, которые уже разделяют поток во все фазы водного режима — и в межень, и в половодье. Таким образом, возникает основной уровень *русловых (островных) разветвлений*. По мере эволюции и переформирования островов и рукавов на этом уровне возникают одиночные, сопряженные, параллельно-рукавные и прибрежные русловые (островные) разветвления (рис. 2б).

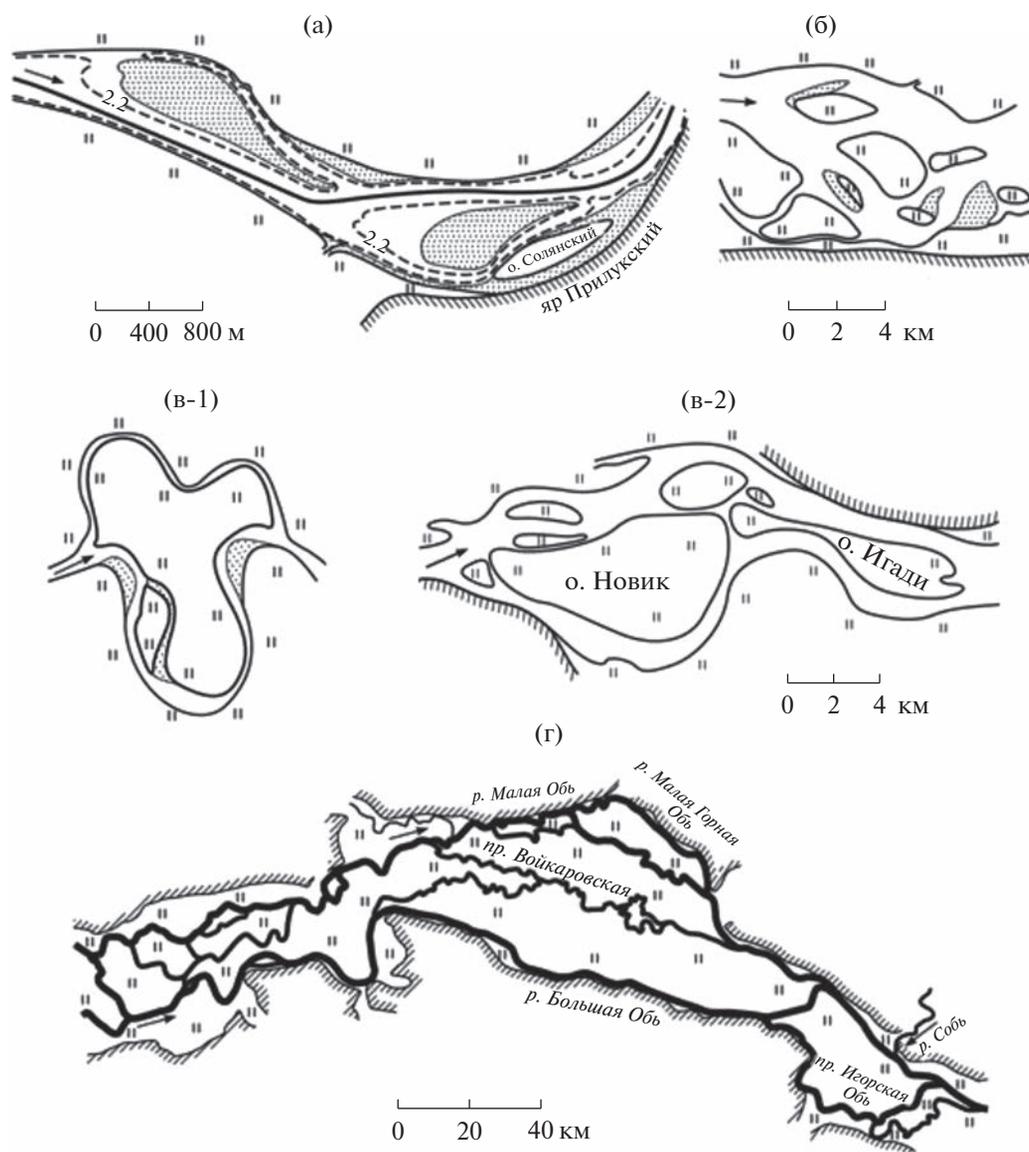
Для островов, от элементарных до больших, представляющих собой объединение нескольких (до 5–8) элементарных, характерным является соотношение их длины к максимальной ширине  $L_o/B_o = 3-4$  и каплевидная форма в плане, соответствующая минимуму гидравлических сопротивлений (Тарбеева, 2004; Вакер, 1977; Комар, 1983). При определенных условиях и нарушении этого соотношения острова приобретают веретенообразную (удлиненную) или овальную форму.

*Пойменно-русловые разветвления* (рис. 2в-1, 2в-2) отличаются от русловых (островных) соизмеримостью водности рукавов (не менее 20%) и размерами разделяющих их островных массивов. Каждый рукав, в свою очередь, образует несколько (до 3–5) излучин или разветвлений, представляющих по отношению к ним формы 2-го порядка, или, наряду с ними, протяженные прямолинейные участки. В большинстве случаев пойменно-русловые разветвления приурочены к местам, где реки перемещаются в пределах широкого днища долины от одного ее борта к другому, пересекая пойму

по диагонали. Такие разветвления распространены на Средней Оби (между устьями Томи и Ваха, где их насчитывается 13), Выгегде, Киренге. Подобно тому как русла их рукавов формируют излучины и русловые разветвления, пойменно-русловые разветвления образуются в рукавах раздвоенных русел (Нижняя Обь) и в пределах излучин поясов меандрирование на извилистых реках (Ока, Выгегда). Иногда они формируются при слиянии больших рек (например, Оби и Томи, Амура и Буреи) и вследствие внутриводосборных перехватов пойменных ответвлений основным руслом реки при размыве пойменного перешейка между ними (Енисей в Минусинской котловине, Малая Обь — левый рукав раздвоенного русла Нижней Оби). Между рукавами пойменно-русловых разветвлений расположены островные массивы иногда очень сложной конфигурации; соотношение их длины и ширины  $L_o/B_o \gg 3-4$ , причем  $B_o$  по длине острова несколько раз изменяется, как в ту, так и другую сторону.

*Раздвоенное русло* (рис. 2г) — верхний уровень разветвленности, характеризующийся разделением реки на два самостоятельных рукава, проходящих вдоль или вблизи противоположных бортов долины, равноценные по водности — не менее 1 : 3 в узле раздвоения (Малая и Горная-Большая Обь, разветвления Нижнего Амура, Днестр и проток Турунчук) или различающихся на порядок величины (Волга и Ахтуба). Рукава имеют собственный водосбор, водный и русловой режимы и отличаются большой протяженностью, в сотни раз превышающую ширину русел. Будучи характерными для больших и крупнейших рек, они иногда встречаются на средних реках — Чарыше (Смирнова, 2002), Тууле (река в Монголии, приток Орхона). Пойменные массивы между рукавами больших и крупнейших рек (Средняя и Нижняя Обь, Нижняя Волга) расчленены многочисленными протоками (пойменной много-рукавностью). На Днестре, Чарыше и Тууле, реках, на которых руслоформирующий расход воды  $Q_\phi$  проходит в пойменных бровках, они представляют единые консолидированные массивы. Условие формирования раздвоенных русел является аномально большая ширина поймы ( $B_p \gg 10b_p$ ) и прохождение  $Q_\phi$  при ее длительном и глубоком затоплении, что соответствует одновременному развитию пойменных ответвлений. Пойменные массивы между рукавами раздвоенных русел можно называть межрукавьями (Смирнова, 2002), следуя за местным на Нижней Оби термином Межобье, обозначающим пространство шириной до 60 км между Малой и Горной-Большой Обью.

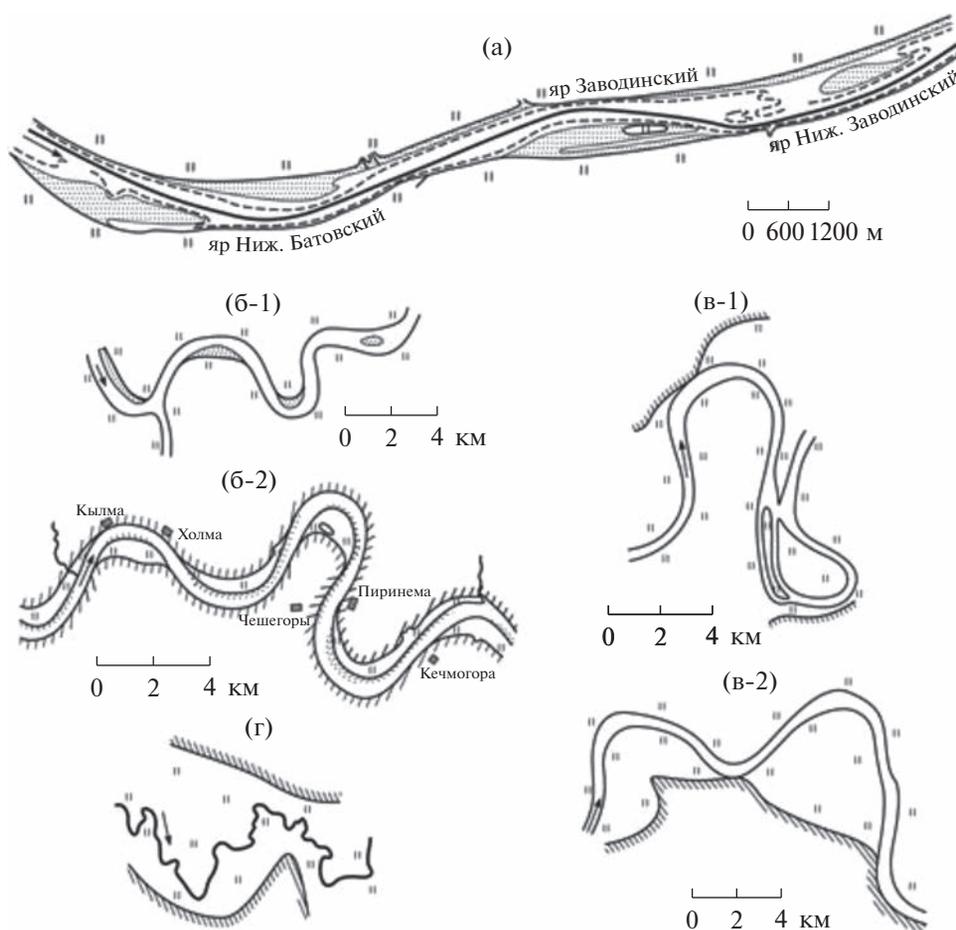
*Структурные уровни развития процессов меандрирования* (рис. 3), соответствующие по значимости уровням разветвлений, наиболее четко выражены у побочных и извилистых (меандрирую-



**Рис. 2.** Структурные уровни разветвлений речных русел: (а) осередковое (р. Иртыш); (б) русловое (островное) (р. Лена); (в-1) – пойменное-русловое на меандрирующей реке (р. Обь); (в-2) – то же на реке с разветвленным руслом (р. Киренга); (г) раздвоенное русло (р. Обь).

ших) русел. Более низкий уровень – *извилистость динамической оси потока* (аналог точечных разветвлений) – постоянно и быстро меняет свое положение и не проявляется в форме русла. Она представляет собой форму меандрирования потока, аналогичную извилистости морских течений, струйных течений в атмосфере и т.д. Их закрепление может произойти в случае накопления наносов с выпуклой стороны излучины, что приводит к трансформации извилистости потока в извилистость русла. При наличии необходимого объема перемещаемых потоком наносов первичное их скопление превращается в побочень, и со временем все русло становится *побочневым* (см. рис. 3а). В нем побочни располагаются в шахматном по-

рядке, а русло образует извилины. Процесс образования побочневого русла изучался в лабораторных условиях (Кудряшов, 1959; Шарашкина, 1959). При повышении уровней воды (увеличении стока во время половодья или паводка) побочни оказываются под водой, а извилистость потока (подобно осередковой разветвленности) перестает существовать. Побочни, как грядовые формы рельефа русла или их части, смещаются, изменяя свое положение на реке. Такое смещение побочней в относительно прямолинейном и слабоизвилистом русле было детально описано на Вычегде (Чалов, 1963) и на Пинеге (Жила, 1978). В классификации ГГИ (Кондратьев, 1982) выделен побочневый тип русловых процессов.



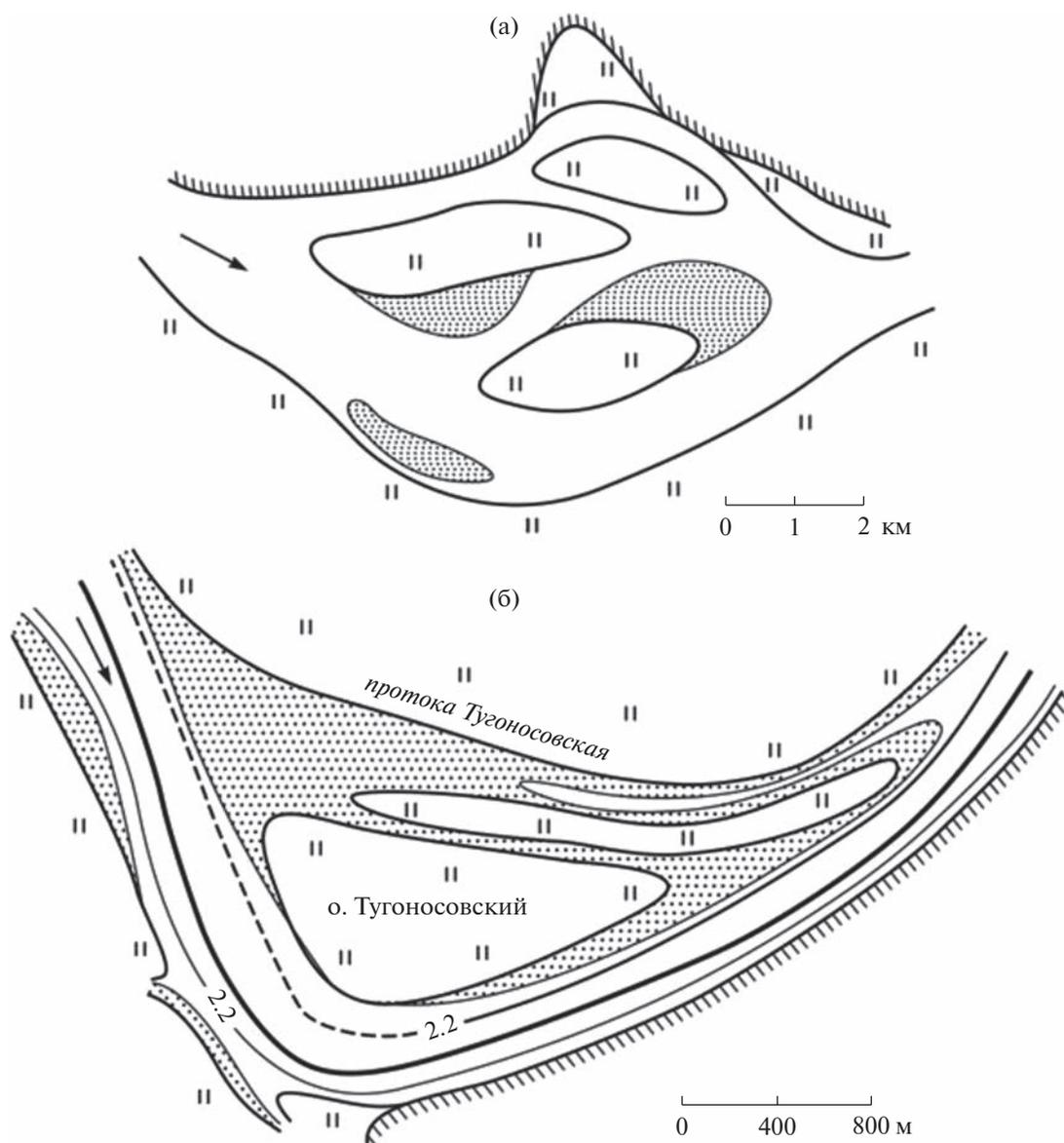
**Рис. 3.** Структурные уровни меандрирования русел рек: (а) побочное русло (р. Вычегда); (б-1) свободные излучины (р. Обь); (б-2) врезанные излучины (Верхняя Лена); (в-1) сложные петлеобразные излучины (р. Иртыш); (в-2) большие излучины (р. Иртыш); (г) излучина пояса меандрирования (р. Камчатка).

Закрепление побочной растительностью сопровождается накоплением на них, как и на зарастающих осередках, тонких наносов, повышением их отметок и превращением в пойменную шпору (сегмент) излучины. Это соответствует развитию излучин русла как наиболее распространенного морфодинамического типа широкопойменных русел (см. рис. 3б-1), а в условиях ограниченного развития русловых деформаций при интенсивном врезании реки – врезанных излучин (см. рис. 3б-2). Излучины формируются в рукавах пойменно-русловых разветвлений и раздвоенного русла, пойменных протоках (ответвлениях), в русловых разветвлениях практически любых морфодинамических типов.

Таким образом, меандрирование русел представляет собой всеобщий процесс, развивающийся на реках любого морфодинамического типа, определяющего переформирование как извилистых русел (излучин), так и разветвлений (рис. 4) (Чалов, 2021).

Структурный уровень меандрирования, параллельный пойменно-русловым разветвлениям, представлен разными типами. *Сложные петлеобразные излучины* (см. рис. 3в-1) являются завершающим этапом эволюции крутых излучин ( $l/L > 1.7$ ; здесь  $l$  и  $L$  – длина и шаг излучины). Происходит образование двух новых сегментных излучин на крыльях. Исходная излучина сохраняется лишь в ее привершинной части. В таком случае формируется заваленные излучины. В ряде случаев на одном из крыльев формируются русловые разветвления. Такие излучины оказываются вытянутыми в поперечном направлении по отношению к оси долины, и река в их пределах перемещается от одного ее борта к другому. Формирование петлеобразных излучин как результат эволюции излучин и превращение побочной в излучины русла – яркий пример континуальности меандрирования на разных структурных уровнях.

*Большие излучины* (см. рис. 3в-2) характерны тем, что их параметры (радиусы кривизны  $r$  и шаг  $L$ ) существенно превосходят соответствующие



**Рис. 4.** Излучины рукавов сложного одиночного разветвления (а – р. Обь) и разветвление на излучине русла (б – р. Иртыш).

величине стока рек, т.е.  $r(L) \gg r(L) = f(Q)$ . Эти излучины имеют форму сегментных развитых ( $1.4 < l/L < 1.7$ ) и, также как и петлеобразные и пойменно-русловые разветвления, обеспечивают перемещение русла от одного борта долины к другому (см. рис. 3в-2). Вероятно, их можно рассматривать иногда как макроизлучины, сформировавшиеся в другой гидроклиматической обстановке (Сидорчук и др., 2000; Sidorchuk, 2018) и являющиеся реликтовыми образованиями. Они характерны для Средней Вычегды, Нижнего Иртыша (ниже слияния с р. Тоболом), где наряду с развитыми здесь петлеобразными излучинами, при ширине поймы  $< 10b_p$  образуют единичные формы, между которыми русло прямолинейное,

чередующееся с вынужденными и адаптированными излучинами. Вниз по течению при расширении поймы до 15–20 км они замещаются типичным меандрирующим руслом, представленным сериями (до 5–7 единиц) сегментных развитых и крутых излучин, у которых  $r = f(Q)$ . Большие излучины нередко встречаются в одном из рукавов пойменно-русловых разветвлений, образуя в нем один большой изгиб рукава. При этом на заходе в него и перед слиянием со вторым рукавом в нем формируются или одиночные русловые разветвления, или излучины, соответствующие его водности. Второй рукав, иногда более маловодный, меандрирует, образуя серию излучин (до 5–7), параметры которых соответствуют

его водности. Такие соотношения больших излучин одного и “нормальных” другого рукава встречаются в пойменно-русловых разветвлениях Средней Оби, рукавах раздвоенного русла Нижней Оби.

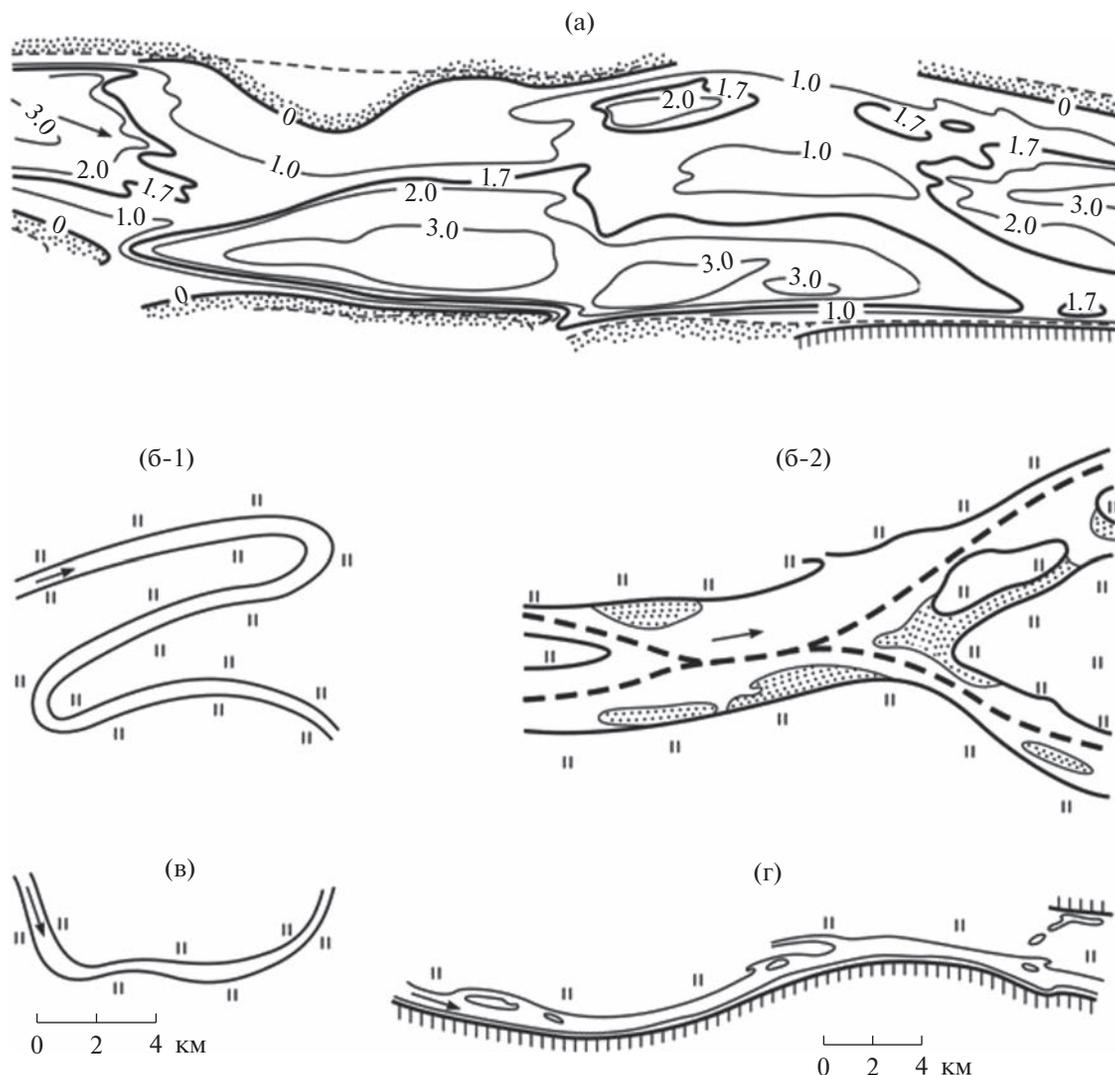
Самый высокий уровень меандрирования представлен *излучинами пояса меандрирования* (см. рис. 3г), которые образуют большие изгибы, в пределах которых река перемещается от одного борта очень широкой долины к другому. Возможно, что эти излучины пояса меандрирования в ряде случаев являются реликтовыми макроизлучинами. При снижении водности реки они формируют серии излучин с параметрами, отвечающими современному стоку реки. Подобно условиям формирования раздвоенного русла, они развиваются при соотношении  $B_n/b_p \gg 10$  и чем больше этот критерий, тем морфологически четче выражены излучины пояса меандрирования. Наиболее отчетливо они прослеживаются на средних реках (Верхняя Сухона) с широкопойменным руслом, но встречаются и на больших (Средняя Обь между устьями Томи и Ваха, Нижний Дон, Ока, Средняя и Верхняя Вычегда). Однако, вопросы формирования поясов меандрирования, к сожалению, до сих пор остаются вне сферы внимания исследователей.

Сложнее обстоит дело с выделением *структурных уровней относительно прямолинейных неразветвленных русел* (рис. 5). Неустойчивость прямолинейного движения потока определяет формирование прямолинейных русел при наличии внешних факторов, способствующих закреплению прямолинейности русла (Иванов, Чалов, 1991). Самый низкий уровень прямолинейности можно выделить лишь условно из-за эфемерности и кратковременности его существования, быстрой (текущей) трансформации в извилины или разветвления динамической оси потока. Следующие уровни соответствуют последовательно плесовым лощинам, прямолинейным вставкам на излучинах, прямолинейным участкам русла вдоль ведущих коренных берегов и прямолинейному неразветвленному руслу. Плесовые лощины характерны перекатным участкам в побочном русле или прямолинейным протокам возле осередков. Прямолинейные вставки особенно часто встречаются на синусоидальных излучинах, а также на коротких участках между островами одиночных разветвлений (если они образуют морфологически однородные участки) или между звеньями сопряженных разветвлений. Само относительно прямолинейное русло может быть врезанное или адаптированное (т.е. с узкой поймой), встречаться в рукавах односторонних разветвлений, проходящих вдоль коренных ведущих берегов и имеющих большую протяженность. Очевидно, к этому же уровню относятся прямолинейные русла рек первых порядков, отличающиеся малым стоком наносов.

### *Взаимосвязи и взаимозависимость (континуальность) структурных уровней*

Развитие русловых процессов и русел рек разного морфодинамического типа всех структурных уровней, при автономности условий их формирования, тесно взаимосвязаны. В зависимости от размеров рек, их водности и стока наносов имеет место сложное переплетение типов русла на разных уровнях. Так, рукава пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел меандрируют; в сложных петлеобразных и больших излучинах русла возникают русловые (островные) разветвления; крылья крутых сегментных и синусоидальных излучин включают в себя прямолинейные “вставки” и одиночные разветвления и т.д. Развитие каждого более высокого уровня предполагает его формирование является наиболее ярким отражением континуальности (неразрывности) русловых процессов. Однако “чтобы понять надежность явления, мы должны вырвать их из всеобщей связи и рассматривать изолированно” (Энгельс, 1969, с. 218). Учет форм физической (гидромеханической) природы (взаимодействие наносонесущего потока с грунтами ложа реки) и естественных (географических) условий русловых процессов, позволяет выявить закономерности и механизмы развития, прогнозировать их эволюцию в процессе саморазвития, управлять процессами, обеспечивая их развитие в нужном для условий жизнедеятельности людей направлении. В этом проявляется диалектическое единство дискретности и континуальности русловых процессов.

На рис. 6 представлены соотношения и формы взаимосвязи между различными структурными уровнями развития разветвлений, меандрирования и формирования относительно прямолинейных неразветвленных русел. Толстыми стрелками (1 на рис. 6) показаны эволюционные ряды перехода от одного уровня к другому, в том числе диагональные, отражающие возможное преобразование меандрирующего русла в пойменно-русловое разветвление и далее в раздвоенное русло. Точечные разветвления при аккумуляции наносов возле отдельных выступов шероховатости (валунов, глыб, скал) превращаются в осередки; микроформы грядового рельефа располагаются на верховых склонах грядовых мезо- и макроформ руслового рельефа, в совокупности образующих осередки и побочни. Извилистость динамической оси потока, сопровождаемая накоплением наносов с внутренней стороны изгиба, превращается в побочное русло. Осередки и побочни, закрепляясь растительностью и увеличиваясь по высоте, представляют собой основу формирования, соответственно, русловых (островных) разветвлений и излучин русла. Побочни в ходе русловых деформаций отторгаются от берегов, превращаясь в

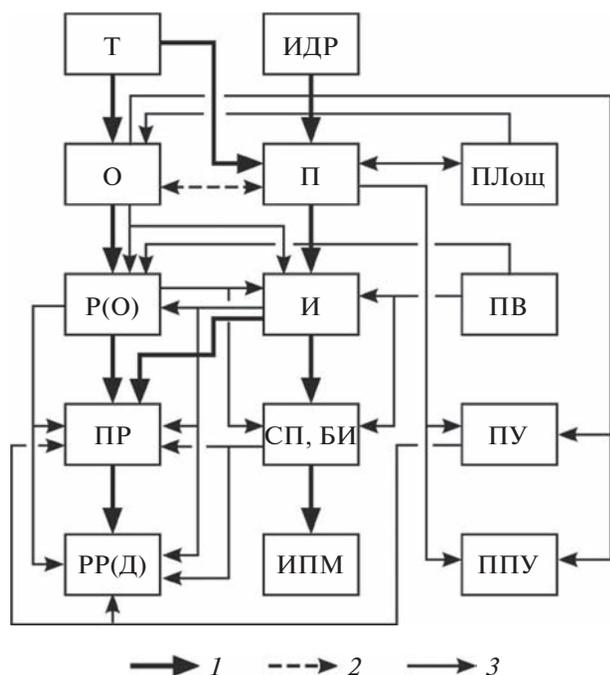


**Рис. 5.** Структурные уровни прямолинейных неразветвленных русел: (а) плесовая лощина между смежными перекадами (р. Вычегда); (б-1) – вставка между смежными синусоидальными излучинами (р. Днестр); (б-2) то же между звеньями сопряженных разветвление (р. Обь); (в) прямолинейный участок вдоль пойменного берега между вынужденной и адаптированной излучинами (р. Иртыш); (г) плесовой участок (р. Северная Двина).

осередки; в свою очередь, осередки приключаются к берегам (при обмелении проток) и становится побочными. Дальнейшее развитие (эволюция) русловых разветвлений приводит в широкопойменном русле к формированию пойменно-русловых разветвлений и, как квинтэссенция разветвленности – раздвоенных русел. Во врезанных руслах этого не происходит из-за ограниченных условий развития русловых деформации и направленного врезания рек (глубинной эрозии), сопровождающегося обмелением и отмиранием рукавов и сосредоточении потока в более многоводном вследствие его преимущественного из-за этого углубления. Они сохраняются только в русловых разветвлениях (например, во врезанном русле Ангары, Сухоны, Верхней Лены) при усло-

вии равнозначности водности рукавов и темпов их врезания.

На меандрирующих реках эволюция излучин приводит к формированию сложных петлеобразных форм, состоящих как минимум из трех (а по мере их развития и большего количества) сегментных излучин, что при дальнейшей эволюции может привести к формированию излучин поясов меандрирования. В отличие от разветвлений, сложные петлеобразные излучины встречаются и во врезанных руслах, образуя иногда замысловатые по форме петли. Они описаны И.С. Шукиным (1960) и Э. Мартонном (1945). При этом речь идет именно о врезанных излучинах, а не изгибах рек и речных долин типа Самарской луки на Волге, имеющих структурную геологическую природу. Эти петли,



**Рис. 6.** Взаимосвязь между структурными уровнями русловых процессов. Разветвления: Т – точечное; О – осередковое; Р(О) – русловое (островное); ПР – пойменно-русловое; РР(Д) – раздвоенное русло (дельтовое). Меандрирование: ИДР – извилины динамической оси потока; П – побочное русло; И – излучина; СП, БИ – сложные петлеобразные, большие излучины; ИПМ – излучины пояса меандрирования. Прямолинейное неразветвленное русло: ПЛощ – плесовые лощины; ПВ – прямолинейные вставки между формами русла; ПУ – прямолинейные участки; ППУ – протяженные плесовые (перекатные) участки.  
1–3 – объяснение в тексте.

как и вообще врезанные излучины, характеризуются параметрами, существенно превышающими параметры свободных излучин при той же водности реки из-за большей величины удельного максимального расхода воды и отражения в их формах наибольшей водности реки за всю историю ее геологического развития.

На реках с широкопойменным руслом пойменно-русловые разветвления, раздвоенные русла и излучины поясов меандрирования могут иметь и иной генезис: внутривпойменные перехваты русел пойменными ответвлениями и притоками, меньшими по размерам, чем главная река [таковы низовья притоков Оби – Северной Сосьвы и Кети, малой р. Уени, превратившиеся в рукава или части рукавов раздвоенного русла (Чалов, 2020; Чалов и др., 2004)], реликты бывших дельтовых разветвлений в заливах эстуарного типа [Волго-Ахтубинское раздвоенное русло, Днестр–Турунчук (Чалов, 2021) и др.]

Эволюционная последовательность в развитии структурных уровней проявления русловых процессов не характерна для прямолинейных неразветвленных русел. Они представляют собой участки русла разной длины между морфологическими элементами перекатов (плесовые лощины в осередковом или побочном русле), прямолинейные вставки между смежными излучинами, звеньями сопряженных разветвлений, островами одиночных разветвлений или протяженные плесовые (перекатные) участки широкопойменного русла, расположенные вдоль коренных берегов и врезанного русла, следующего вдоль геологических структур. Такое положение этого типа русла объясняется неустойчивостью прямолинейного движения потока и естественной трансформацией прямолинейных русел в извилистые или разветвленные. Для сохранения прямолинейности требуются особые факторы (наличие ведущего коренного берега и др.).

Проявление континуальности русловых процессов связано с всеобщностью процесса меандрирования, сказывающегося в образовании пологих излучин проток возле осередков, рукавов, огибающих острова, развитии излучин рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел, в которых они составляют основной морфодинамический тип русел (Чалов, 2021). Оно также проявляется при образовании островов и развитии разветвлений на излучинах меандрирующего русла, на крыльях и в привершинных частях, при спрямлении излучин, достигших критических величин параметров (соотношение радиусов кривизны  $r$  и шириной русла  $b_p$ , степени развитости  $l/L$  т.д.). На рис. 6 эти соотношения показаны тонкими стрелками (2). Наконец, формирование пойменно-русловых разветвлений на меандрирующих реках, в основном средних и больших, при меандрировании их рукавов (пунктирная стрелка 2 на рис. 6 между меандрирующими руслами и пойменно-русловыми разветвлениями) также является примером континуальности. Обычно такие связи меандрирования и разветвлений встречаются на широкопойменных меандрирующих реках на участках, где река перемещается от одного борта долины к другому и имеет место несовпадение направлений меженного и поводного, затопившего пойму потоков (Средняя Обь, Вычегда).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дискретность русловых процессов проявляется в формировании русел разного морфодинамического типа на пяти основных структурных уровнях. Разветвление русла развивается на точечном, осередковом, русловом (островном), пойменно-русловом уровнях и формировании раздвоенных русел (верхний структурный уровень). Последние

два присущи рекам с широкопойменным руслом (свободным условиями развития русловых деформаций). Для раздвоенных русел требуется соотношение  $B_n/b_p > 10$ . На реках с врезанным руслом (ограниченные условия развития русловых деформаций) они не образуются из-за отсутствия или малой ширины поймы.

Структурными уровнями меандрирования являются извилины динамической оси потока, не проявляющиеся в форме русла, побочные, извилистые (сегментные пологие, развитие и крутые излучины), сложные петлеобразные и большие излучины, излучины поясов меандрирования русла. Из них только последние не могут возникать на реках с врезанным руслом.

Исключение представляет собой относительно прямолинейное неразветвленное русло. Из-за неустойчивости прямолинейного движения потока структурные уровни развития этого типа русла выделяются по размерам соответствующих участков в виде плесовых ложин как элементов перекатов (осередковое и побочное русло), вставок на крыльях развитых излучин и между сопряженными разветвлениями или одиночными разветвлениями. Их характерным типом являются плесовые (перекатные) протяженные участки вдоль выровненных в плане ведущих коренных берегов и во врезанном русле, наследующем геологические структуры.

Все структурные уровни, в основном разветвлений и меандрирования, имеют между собой в пределах каждого типа русел эволюционные связи, обуславливающие непрерывность (континуальность) их формирования. Меандрирование как процесс развития русел проявляется в рукавах всех разветвлений – осередковых, русловых (островных) и в виде извилистости рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел. На излучинах русла формируются одиночные разветвления, возникают острова в привершинных их частях и на крыльях, вызывая рассредоточение стока, что в свою очередь, сказывается на параметрах излучин.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева (исходные материалы) и при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-17-00086П – данные по разветвленным руслам). Натурные данные и обобщение – при поддержке проекта РФФИ 21-17-00181.

#### FUNDING

The study is supported by Governmental Research subject of Hydrology department and Makkaveev soil erosion and fluvial processes laboratory of MSU and under Russian

Science Foundations projects (no. 18-17-00086П—field works at braided rivers, no. 21-17-00181—data on Lower Lena River).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И.* Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 203 с.
- Алексеевский Н.И., Чалов Р.С.* Гидрологические функции разветвленного русла. М.: Географ. ф-тет МГУ, 2009. 240 с.
- Великанов М.А.* Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
- Жила И.М.* Натурные исследования побочного типа руслового процесса // Сб. работ по гидрологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. № 14. С. 28–37.
- Знаменская Н.С.* Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 192 с.
- Иванов В.В., Чалов Р.С.* Прямолинейные неразветвленные русла как морфодинамический тип // Геоморфология. 1991. № 2. С. 67–73.
- Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 288 с.
- Кондратьев Н.Е.* О дискретности русловых процессов // Проблема русловых процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1953. С. 34–42.
- Кондратьев Н.Е.* Русловые процессы и деформации берегов водохранилищ. СПб.: Знак, 2000. 258 с.
- Кондратьев Н.Е., Ляпин Н.Н., Попов И.В., Пиньковский С.И., Федоров Н.Н., Якунин И.И.* Русловой процесс. Л.: Гидрометеоиздат, 1959. 372 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 272 с.
- Кудряшов А.Ф.* Воспроизведение русла побочного типа в лабораторных условиях // Тр. ГГИ. 1959. Вып. 69. С. 102–130.
- Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Мартонн Э.* Основы физической географии. Т. 2. Геоморфология. М.: Учпедгиз, 1945. 556 с.
- Пахомова О.М.* Гидролого-морфологические характеристики и порядковая структура речной сети: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 28 с.
- Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 328 с.
- Сидорчук А.Ю.* Структура рельефа речного русла. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 128 с.
- Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Чернов А.В., Борисова О.К., Ковалюх Н.А.* Сток воды и морфология русел рек Русской равнины в поздневалдайское время и в голоцене (по данным палеоруслового анализа) // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. Вып. 12. С. 196–231.
- Смирнова В.Г.* Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Алтайского региона: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: ИГ СО РАН, 2002. 20 с.
- Тарбеева А.М.* Формирование и эволюция островов в русле Оби // Эрозионные, русловые процессы и

- проблема гидроэкологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. С. 202–208.
- Чалов Р.С. Динамика перекаатов и ее количественные характеристики // Вопросы географии. М.: Географгиз, 1963. № 63. С. 100–111.
- Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С. Дискретные и континуальные проявления русловых процессов в морфологии и динамике речных русел // Геоморфология. 2006. № 4. С. 22–31.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Раздвоенное русло и пойменная многоруканность Нижней Оби: русловая сеть, рассредоточение стока и морфодинамика рукавов // Маккавеевские чтения – 2020. М.: Географ. ф-тет МГУ, 2021. С. 63–71.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излучины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 371 с.
- Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 259–271.
- Чалов Р.С. Трансформация разветвленных русел рек: факторы, условия, причины // Геоморфология. 2020. № 4. С. 15–33.
- Чалов Р.С. Извилистость или разветвленность потоков и формирование меандрирующих и разветвленных на рукава речных русел // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 3. С. 3–12.
- Чалов Р.С. Раздвоенные русла, их место в морфодинамической классификации, условия формирования и встречаемость // Тридцать третья пленар. межвуз. координац. совещ. по проблемам эрозионных, русловых и устьевых процессов. Ижевск: ИД “Удмурт. ун-т”, 2021. С. 154–156.
- Чалов С.Р. Гидрологические функции разветвленного русла: Автореф. дис. ... канд географ. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. 25 с.
- Чернов А.В. Геоморфология пойм равнинных рек. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 198 с.
- Шарашкина Н.С. Роль грядообразного движения наносов в формировании речных русел // Гидравлика сооружений и динамика речных русел. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 212–223.
- Шукин И.С. Общая морфология суши. М.–Л.–Новосибирск: ОНТИ, 1933. Т. 1. 366 с.
- Шукин И.С. Общая геоморфология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. Т. 1. 616 с.
- Энгельс Ф. Диалектика природы. М.: Госполитиздат, 1969. 260 с.
- Эрозионно-русловые системы. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
- Baker V.R. Stream – channel response to floods, with examples from Central Texas // Geol. Soc. Am. Bull. 1977. Vol. 88. № 8. P. 1057–1071.
- Chalov S., Alexeevsky N.I. Braided rivers: structure, types and hydrological effects // Hydrol. Resur. 2015. Vol. 46. № 2. P. 258–275.
- Ferguson R.I. Channel form and channel changes (Britain) // British rivers. 1981. P. 90–125.
- Fryirs K. (Dis)connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem // Earth Surface Processes and Landforms. 2013. Vol. 38. № 1. P. 30–46.
- Fryirs K.A., Brierley G.J., Preston N.J., Kasai M. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades // Catena. 2007. Vol. 70. № 1. P. 30–46.
- Joyce H.M., Hardy R.J., Warburton J., Large A.R.G. Sediment continuity through the upland sediment cascade: geomorphic response of an upland river to an extreme flood event // Geomorphology. 2018.
- Komar P.D. Shaper of streamline island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum drag form // Geology. 1983. № 11. P. 651–654.
- Martynov A.V. Influence of The Large Flood on The Element Composition of Fluvisols in The Amur River Valley // Geogr., Environ., Sustainability. 2020. Vol. 13. № 2. P. 52–64.
- Sidorchuk A.Yu. The fluvial system on the East European plain: sediment source and sink // Geogr., Environ., Sustainability. 2018. Vol. 11. № 3. P. 5–20.

## Channel Processes Disconnectivity in Rivers Hydromorphology

R. S. Chalov<sup>1, \*</sup> and S. R. Chalov<sup>1</sup>

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

\*e-mail: rschalov@mail.ru

The present paper deals with five main structural levels of channel processes and channel patterns due to disconnectivity of fluvial processes. River braiding is related to existence of point, bar, channel (island), anabranching and large distributary channels (located in the deltas of large and largest rivers). Meandering is related to sinuosity of the flow and formation of complex loop and large meanders, the dimensions of which are larger than those corresponding to the water content of the river, and the meanders of the meandering belts. Due to the instability of the straight flow, the structural levels of the straight single channel are distinguished by their size: pool hollows on the riffles, reaches between adjacent bends and segments of braided channel, sections between single branches and stretched stretch areas along the bedrock banks or in the incised channel. Each structural level is related to the previous one forming scaling sequence (middle and side channels are the basis for the formation of branches and bends, etc.), representing genetic series, although in some cases they may have a different origin (intra-floodplain intercepts, relics of delta branches, etc.). The

meandering process happens over various scales in both braided and straight channels. The formation of structural levels is governed by river size, geology, effective discharges and local drivers.

*Keywords:* discontinuity, continuity, channel processes, structural levels, meanders, braided channels, straight channels

## REFERENCES

- Alexeevsky N.I., Chalov S.R. *Gidrologicheskie funktsii razvetvlennoogo rusla* [Hydrological Functions of a Branched Channel]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2009. 240 p.
- Alexeevsky N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [Formation and Movement of River Sediments]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1998. 203 p.
- Baker V.R. Stream – channel response to floods, with examples from Central Texas. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1977, vol. 88, no. 8, pp. 1057–1071.
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., Kamyshev A.A., Kurakova A.A., Mikhailova N.V., Ruleva S.N. *Razdvoennoe ruslo i poimennaya mnogorukavnost' nizhnei Obi: ruslovaya set; rassredotochenie stoka i mirfodinamika rukavov* [Branched Channel and Numerous Branches of the Lower Ob: Channel Network, Dispersion of Flow, and Morphodynamics of Branches]. Makkaevskie chteniya – 2020, Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2021. 6371 p.
- Chalov R.S. Dynamics of Rifts and Its Quantitative Characteristics. In *Voprosy Geografii* [Problems of Geography]. Vol. 63., Moscow: Geografiz, 1963, pp. 100–111. (In Russ.).
- Chalov R.S. Bifurcated channels, their place in morphodynamic classification, conditions of formation and occurrence. In *Tridtsat' tpe'e plenarnoe mezhvuz. soveshch. po problemam erozionnykh, ruslovykh u ustevykh protsessov* [Thirty-Sixth Plenary Interuniversity Meeting on the Problems of Erosion, Channel and Estuary Processes]. Izhevsk: ID Udmurt. Un-t, 2001, pp. 154–156. (In Russ.).
- Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov* [Geographical Studies of Channel Processes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1979. 232 p.
- Chalov R.S. Discrete and Continuum Manifestations of Channel Processes in the Morphology and Dynamics of River Channels. *Geomorfol.*, 2006, no. 4, pp. 22–31. (In Russ.).
- Chalov R.S. Transformation of branched river channels: factors, conditions, causes. *Geomorfol.*, 2020, no. 4, pp. 15–33. (In Russ.).
- Chalov R.S. Sinuous or braiding Water flows and formation of meandering and braided river channel. *Vest. Mosk. Univ. Ser. S. Geogr.*, 2021, no. 3, pp. 3–12. (In Russ.).
- Chalov R.S., Chalov S.R. Structural levels and morphodynamic classification of channel braiding. *Water Resur.*, 2020, vol. 47, no. 3, pp. 374–386. (In Russ.).
- Chalov R.S., Zavadskii A.S., Panin A.V. *Rechnye izluchiny* [River Meanders]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2004. 371 p.
- Chalov S.R. Hydrological Functions of a Branched Channel. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2007. 25 p.
- Chalov S., Alexeevsky N.I. Braided rivers: structure, types and hydrological effects. *Hydrol. Resur.*, 2015, vol. 46, no. 2, pp. 258–275. (In Russ.). <https://doi.org/10.2166/nh.2013.023>
- Chernov A.V. *Geomorfologiya poim ravninnykh rek* [Geomorphology of Floodplains of Plain Rivers]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1983. 198 p.
- Engels F. *Dialektika prirody* [The Dialectic of Nature]. Moscow: Gospolitizdat, 1969. 260 p.
- Eroziionno-ruslovye sistemy* [Fluvial Systems]. Moscow: IN-FRA-M, 2017. 702 p.
- Ferguson R.I. Channel form and channel changes (Britain). *Br. Rivers*, 1981, pp. 90–125.
- Fryirs K. (Dis)connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surf. Proc. Land.*, 2013, vol. 38, no. 1, pp. 30–46.
- Fryirs K.A., Brierley G.J., Preston N.J., Kasai M. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 2007, pp. 30–46.
- Ivanov V.V., Chalov R.S. Rectilinear unbranched channels as a morphodynamic type. *Geomorphology*, 1991, no. 2, pp. 67–73. (In Russ.).
- Joyce H.M., Hardy R.J., Warburton J., Large A.R.G. Sediment continuity through the upland sediment cascade: geomorphic response of an upland river to an extreme flood event. *Geomorphology*, 2018.
- Karasev I.F. *Ruslovye protsessy pri perebroske stoka* [Channel Processes in the Course of Water Diversion]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1975. 288 p.
- Komar P.D. Shaper of streamlined island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum-drag form. *Geol.*, 1983, no. 11, pp. 651–654. (In Russ.).
- Kondratev N.E. On the discreteness of channel processes. In *Problema ruslovykh protsessov* [The Problem of Riverbed Processes]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1953, pp. 34–42. (In Russ.).
- Kondratev N.E. *Ruslovye protsessy i deformatsii beregov vodokhranilishch* [Channel Processes and Deformations of Reservoir's Banks]. St. Petersburg: Znak Publ., 2000. 258 p.
- Kondratev N.E., Lyapin A.N., Popov I.V., Pinkovskii S.I., Fedorov N.N., Yakunin I.I. *Ruslovoi protsess* [Channel Process]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1959. 272 p.
- Kondratev N.E., Popov I.V., Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovykh protsessov* [Fundamentals of the Hydromorphological Theory of Channel Processes]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1982. 272 p.
- Kudryaschov A.F. Reproduction of a problem channel in the laboratory. *Tr. GGI*, 1959, vol. 69, pp. 102–130. (In Russ.).

- Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* [River Channel and Erosion in the River Basin]. Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1955. 347 p.
- Martonn E. *Osnovy fizicheskoi geografii. Vol. 2. Morfologiya* [Basics of Physical Geography. Issue 2. Morphology]. Moscow: Uchpedgiz, 1945. 556 p.
- Martynov A.V. Influence of the Large Flood on the Element Composition of Fluvisols in the Amur River Valley. *Geogr., Environ., Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 52–64.
- Pahomova O.M. Hydrological and Morphodynamic Characteristics of River Channels and the Order Structure of the River Network. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2001. 28 p.
- Попов I.V. *Deformatsii rechnykh rusel i gidrotekhnicheskoe stroitelstvo* [River Channel Deformations and Hydraulic Engineering]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965. 328 p.
- Shcharashchkina K.S. The role of hydroforming sediment movement in the formation of river channels. In *Gidravlika sooruzhenii i dinamika rechnykh rusel* [Hydraulics of Constructions and Dynamics of Riverbeds]. Moscow: Publ. AN SSSR, 1959, pp. 212–223. (In Russ.).
- Shchukin I.S. *Obshchaya morfologiya sushchi. Vol. 1* [General Morphology of Land. Vol. 1]. Moscow–Leningrad–Novosibirsk: ONTI, 1933. 336 p.
- Shchukin I.S. *Obshchaya geomorfologiya. Vol. 1* [General Geomorphology. Vol. 1]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 1960. 616 p.
- Sidorchuk A.Yu. *Struktura rel'efa rechnogo rusla* [Relief Structure of the River Bed]. St. Petersburg: Girometeoizdat, 1992. 128 p.
- Sidorchuk A.Yu. The fluvial system on the East European plain: sediment source and sink. *Geogr., Environ., Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 5–20.
- Sidorchuk A.Yu., Panin A.V., Chernov A.V., Borisova O.K., Kovalyuh N.N. *Stok vody i morfologiya rusel rek Russkoi ravniny v pozdnevaldaiskie vremena i v golotsene (po dannym paleoruslovogo analiza)* [Water Flow and Channel Morphology of Rivers of the Russian Plain in the Late Valdai and Holocene (Based on Paleochannel Analysis)]. In *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* [Soil Erosion and Riverbed Processes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2000, no. 12, pp. 196–231. (In Russ.).
- Smirnova V.G. Hydrologic and Morphological Analysis of Branching River Channels in Altai Region. *Extended Abstract of Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation*. Irkutsk: Inst. Geogr. SO RAN, 2002. 20 p.
- Tarbeeveva A.M. Formation and Evolution of Islands in the Ob Channel. In *Eroziionnye ruslovye protsessy i problemy gidroekologii* [Erosion, Riverbed Processes and Problems of Hydroecology]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., 2004, pp. 202–208. (In Russ.).
- Velikanov M.A. *Ruslovoi protsess* [Channel Processes]. Moscow: Gosfizmatizdat, 1958. 395 p.
- Zhila I.M. In-situ Studies of a Side Type of Channel Process. In *Sb. rabot po gidrologii* [Collection of Works on Hydrology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1978, no. 14, pp. 28–37. (In Russ.).
- Znamenskaya N.S. *Donnye nanosy i ruslovoi protsess* [Bottom Sediment and Channel Process]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1976. 192 p.