

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.435.1:551.4.01:001.4

О ТЕРМИНОЛОГИИ И КЛАССИФИКАЦИИ РАЗВЕТВЛЕНИЙ РУСЕЛ РАВНИННЫХ РЕК

© 2021 г. Р. С. Чалов^{1,*}, А. С. Чалова¹, Г. Б. Голубцов¹

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет,
Москва, Россия*

**E-mail: rshalov@mail.ru*

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 09.04.2021 г.

Русла рек, разветвленные на рукава, отличаются очень большим разнообразием как морфологически (по количеству и водности рукавов и проток, размерам и форме островов, их взаиморасположению, соотношениям, эволюции и т.д.), так и по режиму деформаций. Тем не менее как в отечественной, так и в зарубежной литературе при их описании и анализе существуют разночтения в применении определяющих их терминов и классификаций, не позволяющих судить о типах разветвлений и характере переформирования, возможной реакции на изменения факторов из-за слишком большой схематичности и обобщенности. В статье дана развернутая, наиболее полная классификация разветвленных русел, разработанная МГУ, и обосновывается применение терминов и понятий, характеризующих каждый тип или разновидность разветвлений и их элементы. Классификация постоянно совершенствуется по мере получения новых данных на основе выполняющихся исследований. Русловые разветвления формируются на нескольких структурных уровнях — точечном, осередковом, русловом (островном), пойменно-русловом и пойменном (раздвоенные русла). Каждый более высокий уровень разветвленности включает в себя типы русла предшествующих уровней. Основными, определяющими русловой режим рек с разветвленным руслом, являются русловые (островные) разветвления, по которым выделяются морфологические однородные участки или единичные формы разветвлений русла или рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел. В свою очередь, в русловых (островных) разветвлениях каждый их тип имеет несколько разновидностей в зависимости от количества и морфологии находящихся в них островов, устойчивости русла, водности рукавов и особенностей рассредоточения по ним стока воды и наносов. Выделенные типы русловых разветвлений и их разновидности характеризуются своими значениями показателей квазиоднородности потока И.Ф. Карасева и коэффициентов в гидролого-морфологических зависимостях, связывающих морфологические параметры русел с показателями определяющих факторов.

Ключевые слова: разветвленные русла, многорукавные русла, острова, осередки, рукава, протоки, русловые деформации, русловой режим

DOI: 10.31857/S0435428121030032

ВВЕДЕНИЕ

Русла рек, разветвленные на рукава (многорукавные), — самые сложные и многообразные морфологически, по режиму переформирования и возможностям регулирования при решении воднотранспортных и водохозяйственных задач. Тем не менее в литературе о разветвлениях существует большой терминологический разнобой: многорукавные русла, хотя это может быть всего два рукава; разветвленность русла и разветвленность потока (разделение его на ветви течения); осередки (отмели посередине русла, обсыхающие в межень), которые нередко называют островами, и ставится знак равенства между осередковыми и русловыми (островными) разветвлениями [1], в

обоих случаях именуемых многорукавностью (но осередки разделяют лишь меженный поток на ветви течения — протоки; у островов, покрытых растительностью, ветви сохраняются при их затоплении в многоводную фазу режима); рукава (или протоки?), создающие собственно разветвления русла, и разветвления, возникающие на излучинах или при их спрямлении (новое русло и староречье); разветвления, созданные небольшими островами, возле которых ширина русла в пойменных бровках остается неизменной, и островами, поперечники которых превосходят ширину русла в несколько раз, а суммарная ширина обоих рукавов больше ширины русла перед узлом разветвления, и т.д. Часто один и тот же термин

применяется для обозначения совершенно разных по морфологии и условиям формирования разветвлений или их элементов. Наглядный пример тому — применение понятий “рукав” и “протока”. Протоками называют и относительно маловодные извилистые водотоки, расчленяющие пойму большой реки на отдельные, разных размеров и конфигурации массивы (о-в Симан на Оби имеет длину 36 км при ширине русла 600 м), и протоки, огибающие в межень осередки (ответвления, по Н.И. Маккавееву [2], — еще один термин для их обозначения), и равноценные по водности и морфометрическим характеристикам рукава, разделенные островами. Эти различия нашли отражение в терминологическом словаре Д.А. Тимофеева [3]. С другой стороны, на картах (как предназначенных для водных путей, так и общегеографических) и в лоциях все рукава называются протоками, если они не имеют местных наименования (полои на Сев. Двине, шары на Печоре, воложки на Волге), а в ряде случаев рукава длиной в десятки и сотни километров — реками (Ахтуба на нижней Волге, Турунчук на Днестре, Малая, Горная и Большая Обь на нижней Оби), равно как и островами — небольшие острова в русле реки, и огромные пойменные массивы между основным руслом и пойменными протоками (упомянутый о-в Симан на р. Оби длиной 36 км).

Все это обусловлено при очень большом морфологическом многообразии разветвлений [4] их слабой изученностью вплоть до середины XX века. Она была связана с рядом причин. Сложные разветвления (именно многорукавность) — прерогатива больших и крупнейших рек, хотя уже размер рек создавал трудности постановки исследований. На них, с одной стороны, глубины и другие параметры русел из-за многоводности рек не создавали затруднений при их использовании как водных путей сообщения, а прокладка коммуникаций через реки была столь редка, что позволяла изыскивать обходные пути, где река собирается в едином неразветвленном русле. С другой стороны, в большинстве случаев такие реки протекают по слабо освоенным еще в недалеком прошлом и мало населенным территориям, вследствие чего создаваемая ими опасность была эпизодична или невелика по масштабам проявления. На сравнительно небольших реках разветвления, особенно сложные по морфологии и динамике, встречаются в предгорьях и во внутригорных котловинах. И хотя здесь они всегда характеризуются повышенной опасностью, но ограниченность распространения и вместе с тем большие технические трудности организации и проведения русловых исследований (но по другим причинам, чем на крупнейших реках — большие скорости течения, галечно-валунный аллювий) обеспечивают до сих пор их состояние “белых пятен” в по-

знании руслового режима рек, и именно за их руслами закрепились определения “разбросанные” или “блуждающие”. Лишь в 1960–1980-е годы появились результаты первых серьезных исследований механизмов, условий формирования, морфологии, режима деформаций и регулирования разветвлений [5–7], приведшие к настоящему времени к созданию теоретических представлений о генезисе, морфодинамике и гидроморфологии разветвлений речных русел [8–11]. В то же время некоторые классификации русел и типизации русловых процессов продолжают сохранять выделение всего одной-двух типов разветвлений под общими названиями (в отличие от меандрирующих русел), не дающими возможности судить об их морфологии и режиме перестроений.

Задача настоящей статьи — на основе накопленных материалов исследований русловых процессов на разветвленных реках с конца 50-х годов XX века, их обобщения и новейших данных по рекам разных размеров, протекающих в разных условиях, с разной водоносностью, водным режимом и стоком наносов, в том числе получаемых с применением все более современных методов и аппаратуры (космических снимков, ГИС-технологий, доплеровских измерителей течений и т.д.), и развивая предлагаемые подходы к их типизации, обосновать усовершенствованную классификацию как разветвлений в рамках морфодинамической классификации речных русел МГУ [8, 10–12], так и составляющих их элементов (проток и рукавов, островов и островных массивов) с учетом развития их типов на разных структурных уровнях проявлений русловых процессов, установленных лишь в последнее время [12], и получения в ходе продолжающихся исследований новейших данных о морфодинамике разветвлений. Это неизбежно влечет за собой уточнение терминологии разветвлений, точнее приведение в соответствие с предлагаемой классификацией основных понятий — рукав, протока, ответвление; остров, осередок, островной массив и т.д., снабдив их необходимыми поясняющими определениями.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

В связи с отмеченными терминологическими различиями следует дать определения основным понятиям, которые в статье, как и в других работах авторов, применяются для характеристики разветвленных русел:

осередки — отмели посередине реки или отделенные от берегов протоками, представляющие собой повышенные части гряд — мезо- или макроформ рельефа речного русла, в межень обсыхающие и создающие *осередковые разветвления*;

острова — части суши на реке, покрытые растительностью, отделенные от берегов рукавами, вызывающие рассредоточение стока во все фазы водного режима и затопляемые в половодье или высокие паводки; *пойменные (аккумулятивные) острова* образуются при зарастании осередков, *цокольные острова* — то же, но на выступах посередине реки коренных пород (если растительность отсутствует, то такие выступы называют *огрудками*); при врезании реки они превращаются в незатопляемые *коренные острова*; при затоплении в многоводный период (половодье, паводок) разделение потока на ветви течения сохраняется благодаря растительности (кустарниковой, лесной, луговой) и большей высотой по сравнению с осередками или огрудками, а на поверхности островов происходит аккумуляция наносов, создающих пойменную фацию аллювия; образование островов приводит к формированию *русловой (островной) разветвленности русел*;

протоки — по Н.И. Маккавееву [2, с. 309], “разветвления, длина которых близка к длине изгиба меженного русла реки (т.е. к длине периметра побочной переката) ... Разделяются ... низкими, обычно лишенными растительности осередками” — *осередковая разветвленность*;

рукава — “разветвления, длина которых составляет величины одного порядка с длиной излучины весеннего русла. ... Разделены островами, затопляемыми только в высокое половодье и покрытыми растительностью” [2, с. 309]; являются элементами *русловых (островных) разветвлений* (русловой многорукавности);

пойменные протоки — маловодные по отношению к руслу реки ответвления, расчленяющие пойму на отдельные островные массивы и создающие *пойменную многорукавность*.

Под *разветвлениями* при этом понимается широкий спектр разделений потока на ветви течения, проявляющихся в рельефе русла на уровне грядовых образований (осередков) как форм перемещения наносов, в структуре (морфологии) самого русла — морфодинамическом его типе, в виде единичных форм и морфологически однородных участков, в образовании разветвлений 2–3-го порядков в рукавах самих разветвлений, на излучинах русла и в прямолинейном неразветвленном русле. Это обуславливает необходимость уточнения терминов, определяющих каждый тип или разновидность разветвлений.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К КЛАССИФИКАЦИИ РАЗВЕТВЛЕНИЙ

Обзор и анализ отечественных классификаций разветвлений содержится в ряде публикаций [9, 10, 13, 14]. И хотя практически во всех отмечается морфологическое многообразие разветвлений и

специфичность подходов к управлению русловыми процессами при решении водохозяйственных и воднопутевых задач [5, 6, 15–18], это многообразие нашло отражение только в морфодинамической классификации русел МГУ [4]. В ней оно рассматривается на всех структурных уровнях развития русловых процессов, в формировании морфологически однородных участков и единичных форм разветвлений, в том числе в рукавах разветвлений, на излучинах и в прямолинейном неразветвленном русле, где они представляют собой образования 2–3-го порядков, пойменной и дельтовой многорукавности, и ветвях течения, огибающих отмели (осередки) посередине рек. Всего выделено 25 типов разветвлений, разделенных по 5 уровням их формирования; наибольшее число разветвлений — на островном (русловом) уровне (11, создающих морфологически однородные участки, и 4, встречающиеся в виде единичных форм), причем для каждого типа даны принципиальные схемы их регулирования. В широко распространенной классификации ГГИ [1], классификации Н.А. Ржаницына [19] и некоторых других выделено всего две разновидности разветвленных русел: например, по ГГИ — осередковая или русловая многорукавность и пойменная многорукавность.

Анализ большинства существующих зарубежных классификаций показал, что они основываются исключительно на очертаниях русел в плане. На этот недостаток указано в аналитическом обобщении [20], в котором подчеркнута необходимость учитывать и другие характеристики разветвлений, но отмечено, что в разветвленных руслах трудно поддаются количественной оценке темпы русловых деформаций и существуют сложности получения морфометрических характеристик, сильно варьирующих в зависимости от водности рек. Решению этой проблемы посвящены разработки автоматизированных систем оценки деформаций [21], в том числе с использованием индексов плановых (горизонтальных) переформирований ИПП, технологий дистанционного зондирования и ГИС.

В последние годы был предложен ряд классификационных схем, существенно изменивших, подобно отечественным работам, представления о разнообразии морфодинамических типов разветвленных русел и их географическом распространении. Впервые в зарубежной литературе были выделены и обоснованы русловая и пойменная многорукавность (“anabranching”, “anastomosing” в англоязычной терминологии) [20, 22], выявлены их морфодинамические отличия от разветвленности, соответствующей формам руслового рельефа (“braided channel”) — осередковой. Показано, что многорукавные русла (“anabranching channels”) доминируют на всех крупнейших реках (с расходом воды более 17000 м³/с), за ис-

ключением р. Миссисипи [23] (на реках России таковыми исключениями являются средняя Обь и нижний Иртыш). Указывалось, что морфодинамические типы русел этих рек вообще отличаются от традиционно рассматриваемых в литературе, что характерно и для отечественных исследований.

Наибольшую известность в англоязычной литературе в последние годы получили морфодинамическая классификация A.D. Knighton и G.C. Nanson [24] и гидролого-морфологическая классификация В. Eaton и др. [25]. В основе первой лежит положение о существовании разветвленных русел двух основных категорий: “braided” и “anabranching”. Разветвленное русло “braided” — это русло, разделенное осередками, находящимися в пойменных бровках (соответствует осередковому разветвлению). Разветвленное русло «anabranching» состоит из большого количества рукавов, разделенных островами, размеры которых превосходят размеры самих рукавов. Среди них выделяется 6 типов: 1) Cohesive-sediment anabranching rivers (anastomosing rivers) — много-рукавные русла в связных группах, отличающиеся малыми уклонами, малой мощностью, относительной стабильностью и низкими значениями показателей b_p/h (b_p — ширина русла, h — глубина); развитие русел таких рек происходит при отложении наносов; 2) Sand-dominated, island-forming rivers — русловая многорукавность песчаных русел; стабильность разветвлений обусловлена малой мощностью потока и распространением растительности по берегам, что препятствует их размывам; 3) Mixed-load, laterally active anabranching rivers — блуждающие разветвленные русла, с меандрирующими рукавами, характеризующиеся поперечным смещением в пределах пойменного сегмента; 4) Sand-dominated, ridge-forming anabranching rivers — разветвленные русла с песчаным аллювием и развитыми аллювиальными формами, характерны для рек аридных регионов, отличаются субпараллельным положением рукавов, разделенных узкими, обрывистыми песчаными грядами, вершины которых закреплены растительностью; формирование таких гряд связано либо с появлением растительности посередине русла (запирание осередков), либо с отделением пойменного сегмента (прорванные излуины); 5) Gravel-dominated, laterally anabranching rivers — галечно-валунные и гравийные блуждающие разветвленные русла, обычные для рек горных регионов; под термином “wandering” понимается переходный тип между меандрирующими и разветвленными руслами; эти реки отличаются высокой мощностью потока, достаточной для значительных перестроений (в классификации МГУ они соответствуют полугорным и горным рекам с развитыми аллювиальными формами); образование островов связано с массовой остановкой матери-

ала при переходе от гор к равнинам [20, 23]; 6) Gravel-dominated, stable anabranching rivers — галечно-валунные устойчивые русла — небольшая группа рек с большими уклонами; острова сложены грубообломочным материалом; новые рукава формируются в основном в результате образования древесных заломов и аккумуляции наносов. Для этой классификации характерны использование неоднородных морфологических признаков и отсутствие четких типологических параметров.

Классификация В. Eaton и др. [25] развивает известные построения, принятые для дифференциации русел по гидролого-морфологическим зависимостям и QI -диаграммам [20]. Пороговые значения определяют границы между неразветвленными (прямолинейными и меандрирующими) и многорукавными (разветвленными) руслами. Вторая граница проходит между стабильными разветвленными руслами “anabranching channels” и нестабильными разветвлениями — осередковой разветвленностью “braided channels”. Сами зависимости и их пороговые значения аналогичны зависимостям, предложенным еще в середине XX века [26]. Разветвленные русла разных типов группируются в разных областях QI -диаграммы.

Приведенный анализ показывает ограниченность зарубежных классификаций, отсутствие в них морфодинамического подхода и, как следствие, невозможность применить к оценке сложных разветвлений, их многообразия, эволюции и трансформации при изменении природных факторов и антропогенных воздействиях (относительно последнего — кроме [25]); в ряде классификаций, в том числе отечественных [19], принят подход, не позволяющий проводить сопоставления с другими подходами, в том числе из-за разнотипности признаков, по которым происходит выделение типов разветвлений.

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗВЕТВЛЕНИЙ

В соответствии с представлениями о дискретности русловых процессов [1, 9] формирование разветвлений русла рассматривается на нескольких структурных уровнях [12]. **Точечные разветвления** [21] проявляются только в межень, когда образующие их формы обсыхают, будучи связанными с крупными наносами (валунами, глыбами) или грядовыми ультрамикро- и микроформами руслового рельефа на мелководьях. В многоводные фазы водного режима этот вид разветвленности утрачивается, а образующие его валуны или гряды слагают формы движения влекомых наносов, первые — на горных галечно-валунных реках, вторые (микро- и ультрамикроформы руслового рельефа) — по периферии прирусловых отмелей на равнинных реках.

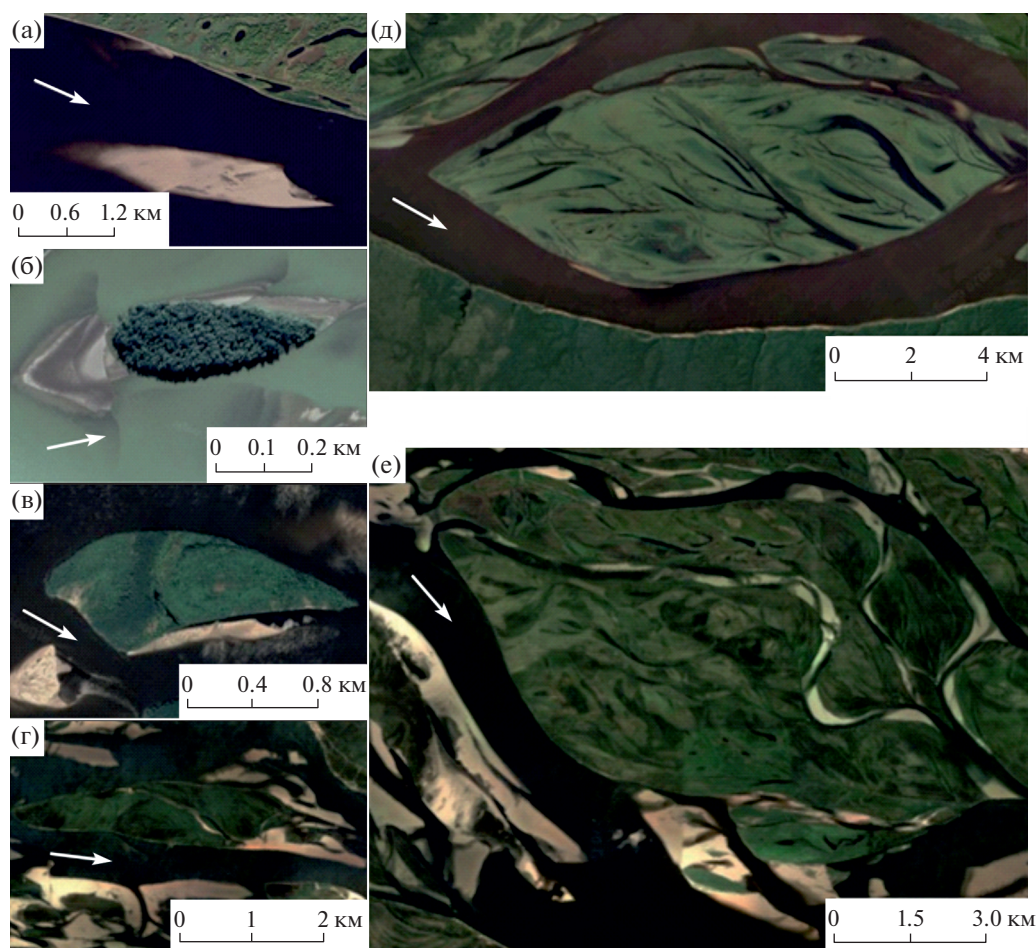


Рис. 1. Осередок ((а) — средняя Лена, выше г. Якутска) и острова разных типов: (б) — элементарный (верхняя Обь, Акутихинское разветвление), (в) — малый (средняя Лена, “разбой Рассолода”), (г) — средний (средняя Лена, о-в Пономарева), (д) — большой (нижняя Обь, о-в Сухоруковский), (е) — островной массив (средняя Лена, выше Кангаласского камня) [30, с изменениями и дополнениями], (космоснимки).

Осередковые разветвления [1] связаны с грядовым движением наносов, представляя собой протоки меженного русла, разделенные обсыхающими осередками (рис. 1а). В многоводные фазы режима они, оказываясь под воздействием потока, перестают разделять поток на ветви течения, смещаются, составляя макроформы грядового движения наносов. Осередки могут быть [27]: 1) элементарными (простыми), представляющими собой высокие части одиночных больших гряд — макроформ, занимающими от 1/5 до 1/10 ширины русла; 2) большими (сложными) состоящими из нескольких надвинувшихся друг на друга гряд — макроформ, шаг которых сопоставим с шириной русла или рукава, в котором они сформировались; 3) побочными, отделенными от берегов побочными протоками; 4) косами в устьях островов, отчлененными от них протокам, вследствие разницы в уровнях воды в рукавах.

Русловые (островные) разветвления наиболее многочисленны и разнообразны по морфологии

и переформированиям, определяют морфодинамический тип русла, связаны с образованием в русле островов, разделяющих реки на ветви течения даже во время максимального их затопления и представляющих собой важный элемент консервации руслообразующих наносов. Выделяются *элементарные острова* (рис. 1б), формирующиеся при зарастании осередков, сохраняющие их форму и размеры (на верхней Оби их длина и ширина от нескольких десятков до сотен метров, на средней Лене — до 1–2 км при ширине русла, соответственно, до 2.5 и 5–7 км); *малые острова* (рис. 1в), возникающие при объединении 2–3 элементарных; преобладающие их размеры на больших реках — сотни метров (реже первые километры) в длину и 200–300 м в ширину при средней суммарной ширине русла вместе с островами — 3–5 км; *средние острова* (рис. 1г), образующиеся как несколькими объединившимися малых или элементарных, а также вследствие причленения к ним побочной со стороны рукавов или к оголов-

кам, и кос в ухвостьях при частичном, обычно с оголовков, размыве; их размеры сопоставимы с размерами русла, имея на больших реках — верхней Оби и средней Лене — 3–5 км в длину и 1–1.5 км в ширину при суммарной ширине русла соответственно 3–4 и 7–8 км; *большие острова* (рис. 1д), представляющие собой несколько объединившихся малых и средних при обсыхании и зарастании разделяющих их протоков; это — наиболее крупные формы в русловых разветвлениях, квазистабильные, подверженные лишь частичным переформированиям в течение многих десятилетий и даже столетий. В ширину они достигают на средней Лене 3–5 км при длине до 10–12 км.

В процессе эволюции (причленения и зарастания побочной) развития кос в ухвостьях и объединения острова приобретают все большие размеры, сохраняя соотношение длины и ширины $L_o/B_o = 3-4$, соответствующее минимуму гидравлических сопротивлений [28, 29]. Со временем они образуют *островные массивы* (рис. 1е) сложной конфигурации и с размерами, превосходящими ширину русла [30], создавая уже более высокие уровни разветвленности.

Пойменно-русловые разветвления связаны с островными массивами, причем каждый рукав имеет свой морфодинамический тип русла, представленный несколькими излучинами, русловыми разветвлениями и прямолинейными, неразветвленными участками или их чередованием по длине рукавов. Они формируются: а) на реках с меандрирующим руслом (Ока, Вычегда, средняя Обь между устьями Томи и Ваха) там, где их русла по диагонали пересекают пойму, перемещаясь от одного борта долины к другому, при глубоком затоплении поймы в многоводную фазу режима (рис. 2а); б) на реках с разветвленным руслом (Сев. Двина, Печора, Обь, Киренга); связаны они с образованием больших островов также на перевале реки от одного борта долины к другому (рис. 2б); в) ниже выступов и мысов коренных берегов (верхняя и нижняя Обь, Лена между устьями Алдана и Вилюя, нижняя Волга), оказывающих на поток направляющее воздействие, и поворотов долины реки (рис. 2в); г) в узлах слияния больших рек (Амуро-Уссурийский узел; Обь и Томь), в которых один из рукавов, первый соединяющийся с притоком, характеризуется при различном сочетании уровней воды на главной реке и притоке переменным направлением течения то в одну, то в другую сторону (рис. 2г); д) сложные трех-, четырехрукавные с развитыми, крутыми или прорванными излучинами (рис. 2д); эта разновидность разветвлений описана совсем недавно [12], и их генезис еще не установлен; е) вследствие размыва перешейка между руслом (в том числе рукава раздвоенного русла) и пойменной протокой (средняя Обь, левый рукав раз-

двоенного русла нижней Оби — Малая Обь, Енисей между Майнским гидроузлом и Красноярским водохранилищем) и увеличения водности последней из-за отвлечения в них части стока, иногда значительной, из основного русла и превращения их в рукава реки (рис. 2е); ж) при образовании прорванных излучин или спрямлении двух-трех смежных излучин (средняя и нижняя Обь) и рассредоточении стока между старым руслом, превратившимся в рукав, и спрямляющим рукавом, русло которого меандрирует или, в свою очередь, разветвляется (рис. 2ж). Иногда, в трех-, четырехрукавных пойменно-русловых разветвлениях возникают комбинации рукавов, имеющих различный генезис. Например, на верхней Оби ниже Тарадановской вписанной излучины трехрукавное пойменно-русловое разветвление сформировалось ниже вогнутого правого коренного берега, причем левый рукав представляет бывшую пойменную протоку, между которой и современным центральным рукавом через узкий перешеек во время половодья образовался проран; каждый из рукавов состоит из чередования прямолинейных отрезков, пологих сегментных излучин и одиночных разветвлений (рис. 2з).

Пойменный уровень разветвлений свойственен только широкопойменному руслу. В *раздвоенном русле* река протекает двумя (на нижней Оби местами до четырех) самостоятельными рукавами длиной на больших и крупнейших реках до нескольких десятков и даже сотен километров. Между ними находятся обширные пойменные массивы (междурукавья, по [31]), расчлененные пойменными протоками. Разновидности раздвоенных русел: а) на крупнейших реках (средняя и нижняя Обь, нижний Амур) при соотношении $B_n/b_p > 10$ (B_n — ширина поймы, b_p — русла), количество рукавов раздвоенного русла — от 2 до 4 при соотношении водности рукавов 1 : 1 до 1 : 3, что создает условия для развития пойменной многорукавности, обеспечивающей гидравлическую связь между рукавами при условии прохождения руслоформирующего расхода воды Q_ϕ при глубоко и на длительный срок затопляемой пойме (рис. 3а); б) “реlikтовые”, являющиеся отражением заполнения наносами ингрессионных заливов — бывших дельт выполнения (Волга—Ахтуба, Днестр—Турунчук), причем в зависимости от условий прохождения Q_ϕ рукава могут иметь или не иметь соединений по пойменным протокам (рис. 3б); в) в условиях направленной аккумуляции наносов на малых и средних реках: Чарыш [31], Туул [32], Аргунь [33] (рис. 3в); г) пойменные проточно-озерные разветвления (Янцзы, Терек) [10] (рис. 3г); д) образующие “внутренние дельты” (Нигер) [34].

На этом же уровне формируются *дельтовые разветвления* в устьях рек и *разветвления на кону-*

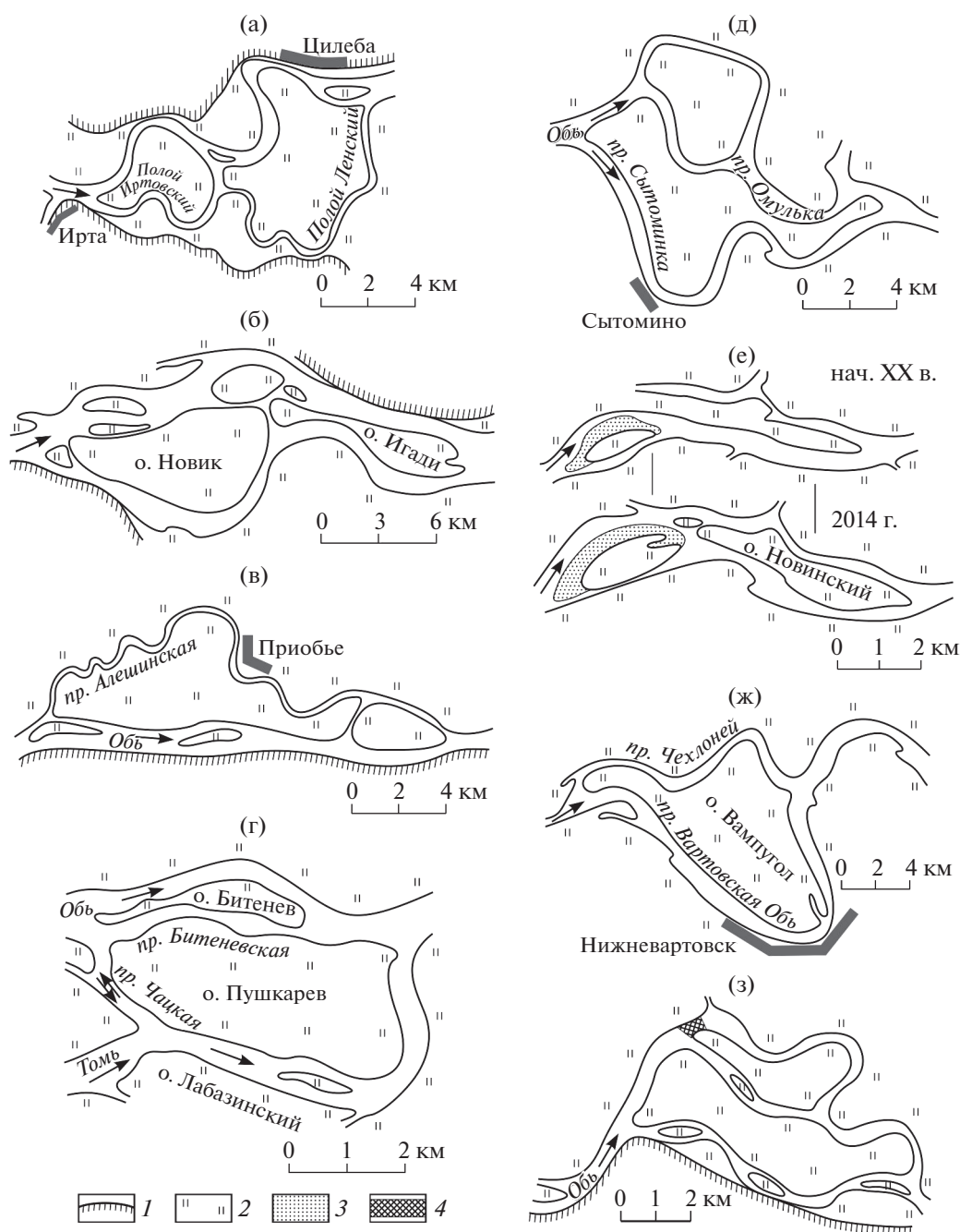


Рис. 2. Пойменно-русловые разветвления: (а) — на реке с меандрирующим руслом (р. Вычегда, Иртовско-Ленское разветвление), (б) — на реке с разветвленным руслом (р. Печора), (в) — ниже выступов коренных ведущих берегов или изгибов возле них долины (нижняя Обь, Алешкинское разветвление), (г) — в узле слияния рек (Обь—Томь), (д) — сложное трехрукавное с развитыми, крутыми и прорванными излучинами рукавов (средняя Обь, Сытоминско-Салманское разветвление), (е) — образовавшееся при размыве перешейка между основным руслом и пойменной протокой (нижняя Обь — Лапорское разветвление Малой Оби), (ж) — следствие спрямления излучин — прорванная излучина (средняя Обь, Нижневартовское разветвление), (з) — трехрукавное с рукавами разного генезиса (верхняя Обь, ниже Тарадановской излучины).

1 — коренные берега; 2 — пойма; 3 — прирусловые отмели; 4 — проран в пойменном перешейке.

сах выноса рек, выходящих в предгорья (подгорные наклонные равнины) и во внутригорные котловины, в том числе образующие “слепые” устья.

Своеобразные раздвоенные русла возникают при слиянии рек (левый рукав нижней Оби — Ма-

лая Обь и Сев. Сосьва, Обь — Кеть), где приток соединяется с относительно коротким рукавом или пойменными протоками главной реки; по ним во время половодья на притоке может возникать противотечение в главную реку. Размыв пой-

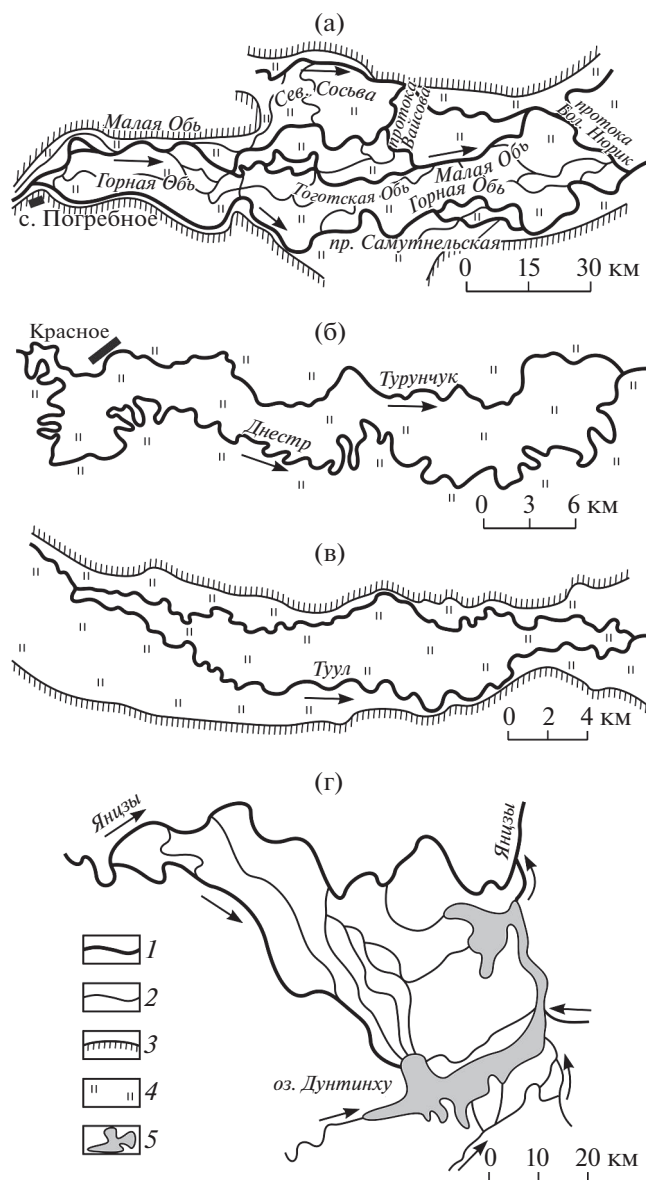


Рис. 3. Раздвоенные русла: (а) — на крупнейшей реке (нижняя Обь), (б) — реликтовое (Днестр—Турунчук), (в) — на малой реке (р. Туул, Монголия) [32], (г) — пойменное проточно-озерное (р. Янцзы, Китай). 1 — основные рукава раздвоенного русла; 2 — пойменные протоки; 3 — коренные берега; 4 — пойма; 5 — озера.

мы между руслом реки или основным его рукавом и притоком — малой рекой (на Оби — р. Уень), выходящей на пойму главной большой реки и протекающей в тыловой ее части, приводит иногда к тому, что нижняя часть притока становится рукавом главной реки, образовавшим раздвоенное русло (в приведенном примере на Оби до 30% расхода воды забирает бывший небольшой приток, превратившийся в рукав раздвоенного русла — протоку Симан). Аналогичная ситуация создавалась при слиянии Оби с р. Кетью [35].

Пойменная многорукавность — расчленение поймы пойменными протоками, представляющими объединившиеся между собой бывшие староречья, образовавшимися при спрямлении излучин или на месте бывших рукавов при причленении островов к пойме. Отшнуровавшиеся от русла рукава полностью отмирают не все, если руслоформирующий расход проходит при затопленной пойме и вдоль них концентрируется пойменный поток, обеспечивая их функционирование [10].

МОРФОДИНАМИЧЕСКИЕ ТИПЫ РУСЛОВЫХ (ОСТРОВНЫХ) РАЗВЕТВЛЕНИЙ

Развитие разветвлений на разных структурных уровнях определяет очень большую сложность морфологического строения, рассредоточения стока, режима деформаций, изменений транспортирующей способности потока и аккумуляции наносов. При этом русловые (правильно называть — островные) разветвления представляют собой основной уровень разветвлений, который определяет морфодинамический тип русла, рукавов пойменно-русловых разветвлений и раздвоенных русел и условия управления русловыми процессами. Русловые (островные) разветвления составляют морфологически однородные участки или одиночные формы, образованные отдельными островами как на реке, так и в рукавах раздвоенного русла, разветвления 2–3-го порядков в прямолинейном русле, на излучинах русла и в рукавах русловых разветвлений в их истоках как следствие снижения транспортирующей способности из-за рассредоточения стока и при слиянии рукавов. Но развитие форм русла на реке в целом или в рукавах разветвлений более высокого уровня отражается в морфологических, морфометрических и динамических характеристиках и, соответственно, в русловом режиме рек, поскольку все параметры русел (π) зависят от водности (Q) реки и рукавов, стока наносов (W), т.е. $\pi = f(Q, W)$. Поэтому и морфодинамические типы русла, рукавов раздвоенного русла и пойменно-русловых разветвлений могут быть различными, а если и совпадают, то отличаются по размерам, конфигурации и, соответственно, структуре потока и направленности деформаций.

Морфодинамические типы разветвленных русел, составляющих русловой (островной) уровень разветвленности, достаточно широко освещены в литературе [2, 4, 7, 9–13]. Поэтому можно ограничиться их перечислением, или привести лишь дополнительные характеристики и дать некоторые терминологические уточнения.

При характеристике разветвлений того или иного морфодинамического типа важны размеры, морфология и количество образующих их островов [30], их положение в русле и друг по от-

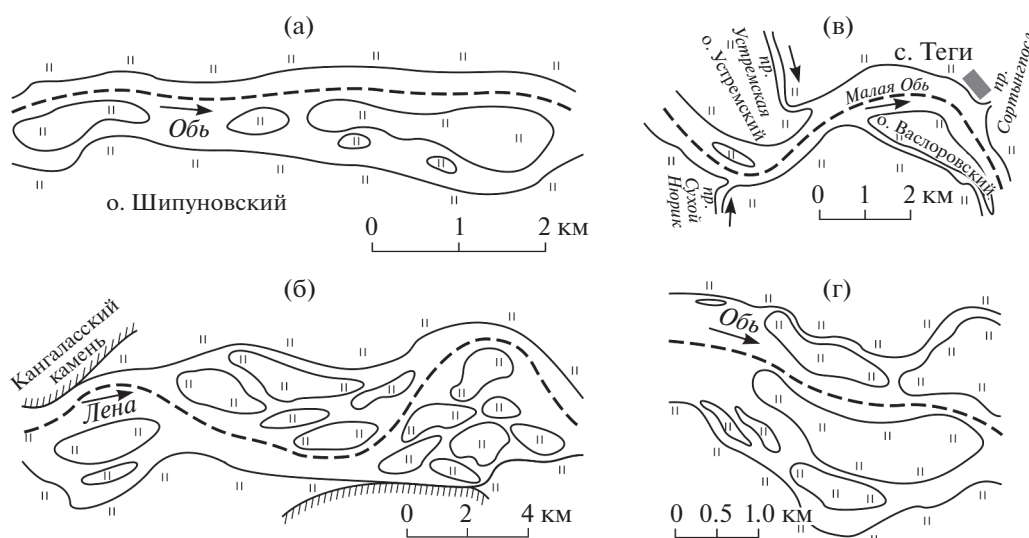


Рис. 4. Прибрежные разветвления: (а) — односторонние (верхняя Обь), (б) — чередующиеся односторонние (средняя Лена, ниже Кангаласского камня), (в) — на излучинах русла (нижняя Обь, Малая Обь у с. Теги), (г) — двусторонние (верхняя Обь, выше устья Чарыша).

ношению к другу. Элементарные острова вследствие русловых переформирований либо объединяются, создавая малые, а затем при их объединении — средние и большие острова, которые сохраняют оптимальное соотношение $L_o/B_o = 3-4$ [28, 29] или, подвергаясь частичному размыву при одновременном приращении к ним с оголовка и в рукавах побочной и кос в ухвостьях, обмелении и зарастании межостровных протоков, приобретают удлиненную ($L_o/B_o \gg 5$) или квазиовальную ($L_o/B_o \ll 5$) форму. Острова разделяют русло на рукава, либо встречаются в виде единичных форм или группами в зонах замедления течения и устойчивой аккумуляции наносов. В этих условиях при направленном горизонтальном смещении русла возникают пойменные островные массивы, являющиеся уже следствием объединения островов разных размеров, отмирания рукавов между ними и превращения рукавов в пойменные ответвления. В случае раздвоенных русел пойму между их рукавами В.Г. Смирнова [31] предложила называть межрукавьями, которые при развитой пойменной многоорукавности состоят из множества островных массивов.

Среди русловых (островных) разветвлений выделяются шесть их разновидностей:

А) одиночные: 1) *простые*, образованные элементарными, малыми, средними или большими островами; 2) *сложные*, образованные группами из двух-трех элементарных или малых, реже средних и еще реже больших островов; 3) *веерного типа* (“голова утки” по китайской терминологии [34]), в которых три-четыре рукава в одном поперечнике характеризуются все более крутыми изгибами от одного берега к другому. Они пред-

ставлены единичными формами, разделяющими протяженные участки прямолинейного неразветвленного русла, формами второго порядка в русловых разветвлениях или, чередуясь с относительно короткими прямолинейными отрезками, образуют морфологически однородные участки. Этот тип разветвлений подробно описан в [4];

Б) прибрежные (рис. 4): 1) *односторонние*; 2) *чередующиеся односторонние*; 3) *на крыльях или в привершинных частях излучин*; 4) *двусторонние* (образованные цепочками островов, вытянутыми вдоль обоих берегов). Эти разветвления отличаются наличием одного постоянно (во все фазы водного режима) многоводного рукава, тогда как остальные, находящиеся за островами, маловодны, могут пересыхать в межень, т.е. являются всегда второстепенными. Иногда функционирование таких рукавов поддерживается ледовыми заторами, когда поток половодья частично направляется в них, обходя ледовую “плотину”. Образующие их острова, как правило, средние и большие, часто это — несколько островов, особенно в чередующихся разветвлениях;

В) сопряженные: 1) *простые*, образованные малыми и средними островами, вытянутыми цепочкой посередине реки; развитие рукавов в них происходит по правилу “восьмерки” [5, 10]; 2) *сложные*, представленные группами островов, по протокам между которыми осуществляется гидравлическая связь между рукавами и происходит перераспределение стока; 3) *сдвинутые*, в которых ухвостье верхнего острова спускается ниже оголовка нижнего острова (разветвления этого типа, их морфология и режим переформирования получили особенно широкое освещение в

русловедческой литературе из-за применения правила “восьмерки” при проектировании водных путей [4, 5, 7, 8, 10, 13, 15, 16]);

Г) “дельтовые”, формирующиеся при слиянии рек или рукавов раздвоенного русла в условиях переменного подпора; обычно они представлены малыми, средними и большими островами, создающими “дельты” выдвигания одной из рек (рукава) в общую акваторию, “дельты выполнения” приустьевого расширения русел одной или обеих сливающихся рек (рукавов раздвоенного русла) или комбинацией обеих разновидностей [10, 35];

Д) параллельно-рукавные, в которых поток разделяется по двум равнозначным по водности рукавам, разделенным цепочкой элементарных и малых островов, а местами осередков (в слабо- или неустойчивом русле) или большими островами (относительно устойчивое русло), вытянутыми посередине реки. Это — наименее изученный тип разветвлений, несмотря на имеющиеся специальные публикации [36, 37], и в то же время наиболее сложный и разнообразный по морфологии, режиму деформаций и условиям формирования. Параллельно-рукавные разветвления свойственны в основном большим и крупнейшим рекам, имеющим большую ширину русел (и наибольшее значение критерия квазигодности

потока И.Ф. Карасева [38] $\theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda}$, где b_p — ширина, h — глубина русла, $\lambda = \frac{2g}{C^2}$ — коэффициент гидравлических сопротивлений, C — коэффициент Шези), вследствие чего в потоке возникают две стрекневые зоны, между которыми посередине реки, где скорости относительно понижены, аккумулируются наносы и формируется цепочка островов и осередков. Особенно характерны они для слабо- или неустойчивых русел при отсутствии влияния на поток коренных берегов, прохождении руслоформирующего расхода в условиях затопленной поймы и ее сравнительно небольшой ширине ($B_p = 2-4b_p$). На реках с врезанным руслом параллельно-рукавные разветвления аналогичны по морфологии и режиму деформаций широкопойменным, отличаясь большими размерами и удлинённостью больших островов, но встречаются в скальных устойчивых руслах со скульптурными и скульптурно-аккумулятивными островами и галечно-валунными руслообразующими наносами (Ангара). По русловому режиму параллельно-рукавные разветвления индивидуальны практически на каждой реке. Поэтому для них не существуют универсальные подходы к управлению русловыми процессами, и методы и приемы регулирования русел разрабатываются с учетом их особенностей;

Е) разбросанные, представляющие собой сборную разновидность очень разнообразных и практически неизученных морфологически и по режиму деформаций сложно разветвленных русел, чаще всего встречающихся в переходных условиях от гор к равнине и во внутригорных котловинах при резком уменьшении уклонов и изменении формы транспорта руслообразующих наносов.

В зависимости от устойчивости русла, условий прохождения руслоформирующих расходов воды, наличия или отсутствия коренных ведущих берегов, рассредоточения стока наносов и расположения по отношению к местным источникам их поступления рукава русловых разветвлений могут образовывать разветвления 2–3-го порядка. Размеры образующих их островов (или группы островов) зависят от водности рукавов, создавая в них или одиночные разветвления, приуроченные к узлам разветвления или слияния основных рукавов, сопряженные системы из двух-трех звеньев, прибрежные односторонние, чередующиеся односторонние и двусторонние разветвления с островами (группой островов) возле большого острова, образующего основное разветвление. В результате создается сложная картина общей многорукавности реки, особенно если учесть одновременное развитие более высоких уровней разветвленности, пойменных протоков (ответвлений), осередковых разветвлений, в которой выделение основных рукавов возможно только при выполнении руслового анализа, что имеет принципиальное значение при решении вопросов управления русловыми процессами.

В разветвлении любого морфодинамического типа острова являются причиной не только разделения потока на ветви течения, но и изгибов его динамических осей. В прямолинейном неразветвленном русле осередковая разветвленность в межень вызывает образование извилин динамической оси потока [2], вследствие чего в протоках, огибающих осередки, она подходит к берегу под углом, вызывая сжатие потока и активизацию размыва берегов, очертания которых в плане приобретают вогнутую форму, русло расширяется, способствуя стабилизации осередков и создавая условия для их превращения в острова. В разветвленных руслах рукава, огибая острова, образуют пологие и развитые излучины, развиваются по законам меандрирования, а параметры излучин определяются водностью самих рукавов. Меандрирование — характерный процесс переформирования рукавов пойменно-русловых разветвлений и рукавов раздвоенных русел, в которых параметры излучин зависят от водности рукавов $\pi = f(Q_{рук})$. Таким образом, меандрирование проявляется на всех структурных уровнях и в разветвлениях любого типа: извилины динамической оси потока

возле осередков в относительно прямолинейном русле → пологие излучины в одиночных или звенных других типов русловых (островных) разветвлений → меандрирование рукавов пойменно-русловых разветвлений и разбросанных русел. Излучины больших рек осложнены разветвлениями, вследствие чего поток рассредоточивается по рукавам, особенно в многоводную фазу режима, образуются прорванные формы, в которых спрямляющие рукава или, наоборот, староречья забирают до 25–30% расхода воды.

Структура потока в разветвлениях любого морфодинамического типа (распределение скоростей, циркуляционные течения) аналогична таковой на излучинах, вследствие чего процесс меандрирования рукавов служит основным механизмом развития разветвленного русла. На это накладывается снижение транспортирующей способности в узлах разделения потока по рукавам, ее рост в рукавах в связи с неравномерным распределением скоростей на изгибах при обтекании островов и гидравлических явлений (подпор–спад) в узлах слияния рукавов [10, 11].

Параметры излучин рукавов и скорости размыва берегов в них определяются водностью самих рукавов. Характерной формой проявления процессов меандрирования в развитии разветвлений является искривление русла одного из рукавов до достижения им критического значения степени развитости $l/L = 1.4–1.7$ (l – длина русла, L – шаг излучины) [2, 10]. Это приводит к перераспределению стока между рукавами и вызывает переформирование в смежных узлах разветвления. При определенных условиях одиночные разветвления приобретают сложную конфигурацию, вплоть до образования веерной формы, при которой функционируют одновременно и спрямляющий рукав, и изогнутые два-три рукава, образующие крутые сегментные излучины, расходящихся веером от узла разветвлений и сходящиеся при слиянии рукавов. Формирование прорванных излучин, приводящее к образованию пойменно-русловых разветвлений, представляет собой один из путей эволюции излучин, после спрямления которых устойчиво сохраняются старое изогнутое русло и новое, его спрямляющее.

В ходе эволюции разветвлений, в связи с естественными изменениями водности, различных других природных факторов и под влиянием антропогенных воздействий происходят определенные трансформации разветвлений [39]. Временная трансформация разветвлений при изменении определяющих природных факторов и антропогенных воздействиях осуществляется следующими путями [41]: 1) при увеличении водности: развитые и крутые излучины → прорванные излучины; сопряженные разветвления → параллельно-рукавные разветвления; прямолинейные нераз-

ветвленные русла → одиночные, сопряженные, параллельно-рукавные разветвления; чередующиеся односторонние разветвления → сопряженные разветвления; при сохранении извилистого русла → усложнение излучин вследствие образования островов у выпуклых берегов на крыльях излучин и в их привершинных частях; 2) при снижении стока воды – последовательность преобразований обратная; 3) увеличение стока наносов и их аккумуляция: усложнение разветвлений или их образование в бывшем неразветвленном русле → превращение осередковой разветвленности в русловую; развитые и крутые излучины → прорванные излучины; 4) в нижних бьефах гидроузлов: вследствие врезания рек – разветвление любого типа → прямолинейное неразветвленное русло; сопряженные разветвления → пологие сегментные излучины; прорванные излучины → развитые и крутые излучины при отмирании старых русел; вследствие аккумуляции наносов ниже зоны размыва русла – увеличение степени разветвленности или образование односторонних, одиночных или сопряженных разветвлений (промежуточный этап – осередковые разветвления); 5) выше водохранилищ: развитые и крутые излучины → прорванные излучины; прямолинейное неразветвленное или слабо-извилистое русло → разветвления разного типа; восстановление стока в староречьях и образование прорванных излучин; 6) дноуглубительные и выправительные работы: разветвления любого типа → прямолинейное неразветвленное русло; сопряженные разветвления → одиночные или односторонние разветвления; расчленение морфологически однородных участков на более короткие, разделенные более простыми по морфологии разветвлениями, сужение пояса активных русловых деформаций и, соответственно, суммарной ширины разветвленного русла.

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУСЛОВЫХ (ОСТРОВНЫХ) РАЗВЕТВЛЕНИЙ

Каждый морфодинамический тип русла характеризуется своими значениями количественных морфологических и динамических критериев и гидролого-морфологическими и морфометрическими соотношениями. В качестве основных параметров приняты показатель степени разветвленности русла n_0/x (n_0 – количество островов на единицу длины русла x) и критерий квазиоднородности потока И.Ф. Карасева Θ [38]. Величина последнего закономерно изменяется по морфодинамическим типам русла в направлении их усложнения: сопряженные → пойменно-русловые → сложные одиночные → прибрежные → параллельно-рукавные. При этом для разветвлений Θ находится в пределах 30–60 ед., но его кон-

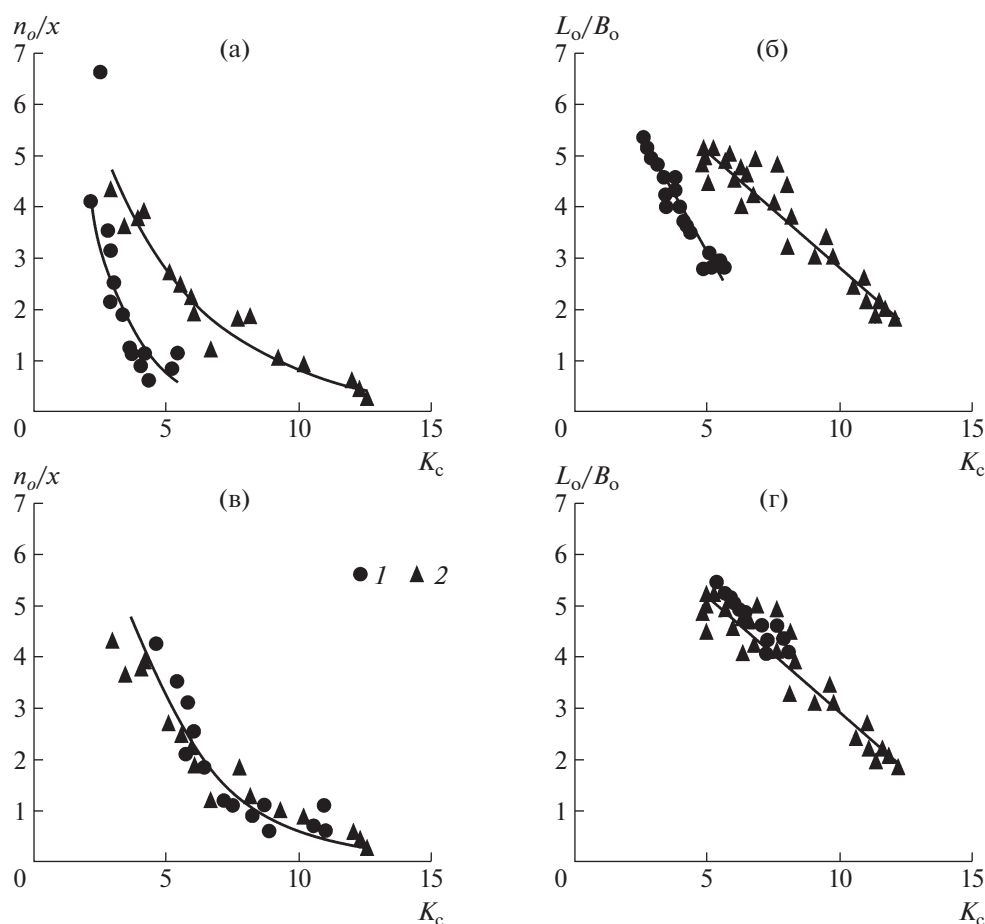


Рис. 5. Зависимости степени разветвленности русла n_o/x (а) и их относительной длины L_o/B_o (б) от устойчивости русла K_c для верхней Оби (1) и средней Лены (2) и объединенные для обеих рек с учетом поправочного коэффициента на размер реки (в, г).

кретные величины зависят от устойчивости русла, возрастая по мере снижения показателей устойчивости [40]. Это коррелирует с обратной зависимостью показателя разветвленности n_o/x и относительного размера островов L_o/B_o (здесь L_o – длина, B_o – ширина острова) от устойчивости русла K_c : $n_o/x = f(K_c)^{-m}$ и $L_o/B_o = f(K_c)^{-m}$. При этом соотношение между L_o и B_o четко дифференцируется по типам русловых разветвлений: у параллельно-рукавных разветвлений на верхней Оби $B_o = 0.19L_o + 1.05$, на средней Лене $B_o = 0.34L_o + 4.8$, у чередующихся односторонних разветвлений на верхней Оби $B_o = 0.34L_o + 122.11$, у односторонних и сложных одиночных разветвлений $B_o = 0.32L_o + 85.9$ на верхней Оби и для этих двух типов русла на средней Лене $B_o = 0.5L_o - 604.2$. Аналогичные соотношения были получены для Сев. Двины, Вычегды, Мезени и Печоры, для которых они четко дифференцировались по типам разветвлений, характеризуясь наибольшим значением L_o/B_o у параллельно-ру-

кавных разветвлений (на Печоре – 8.1, на Северной Двине – 5.7), т.е. острова имеют более вытянутую в длину форму по сравнению с островами, образующими разветвления других типов. При вводе поправочного коэффициента $a = 6.5$ (соотношение размеров верхней Оби и средней Лены по водности и по ширине русла) обе зависимости $n_o/x = f(K_c)^{-m}$ и $L_o/B_o = f(K_c)^{-m}$ становятся едиными для всех рек с разветвленным руслом (рис. 5) [30].

Аналогичные зависимости были получены для осередковых разветвлений [27], но они соответствуют рассредоточению стока только на спаде половодья (паводков) и в межень. Относительная ширина островов B_o/b_p (b_p – ширина русла выше узла разветвления) зависит от удельного средне-

максимального расхода воды $q_{\text{макс}} = \frac{Q_{\text{ср.макс}}}{b_p}$:

$\frac{B_o}{b_p} \pm kq_{\text{макс}}$, в которой коэффициент k закономерно увеличивается от сопряженных разветвлений

на реках севера ЕТР, и в обратном порядке — от сопряженных к параллельно-рукавным на средней и нижней Лене, что связано с различиями в размерах рек, их водном режиме, общих условиях формирования. Также неодинаковы в разветвлениях разного типа соотношения параметров рукавов различной водности с направленностью изменений зависимости ширины рукавов от руслоформирующего расхода воды в них: $b_{рук_ф} = kQ_{фрук} + \alpha$, где индекс $фрук$ означает, что руслоформирующий расход воды в реке приведен к рукавам [41]. Значение коэффициента k в уравнении возрастает, подобно относительной ширине, от параллельно-рукавных разветвлений к сопряженным. Ширина рукавов растет с увеличением расходов воды в разветвлениях всех типов; самые широкие рукава, имеющие относительно прямую конфигурацию, характерны для параллельно-рукавных разветвлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разветвления речных русел — наиболее морфологически многообразный тип русла, сложный по режиму деформаций, механизмам и условиям формирования. Это определяет многоуровневность их развития, начиная от разделения потока осередками на ветви течения в меженьный период до раздвоенных и сложно разветвленных (многорукавных) русел, в ряде случаев характеризующихся обобщенными определениями (разбросанные, блуждающие). На это накладывается временная трансформация русла, связанная с саморазвитием форм русла, изменениями природных факторов и антропогенными воздействиями, развитие форм разветвлений 2–3-го порядков, извилистость (меандрирование) потока и самих русел рукавов и т.д. В свою очередь, управление русловыми процессами в разветвлениях и его эффективность определяются их изученностью и использованием при разработке проектов закономерностей руслового режима разветвлений. Предложенный подход к классификации разветвленных русел и соответствующие ему уточнения терминологии открывают новые возможности регулирования русел и обеспечения гидротехнической и экологической безопасности при освоении водных и связанных с ними земельных, минеральных и других речных ресурсов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ им. М.В. Ломоносова (исходные материалы и их обобщение) при финансовой поддержке РНФ (проект 18-17-00086 — полевые исследования, гидро-

лого-морфологический анализ и разработка классификации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сущенко Б.Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 272 с.
2. Макавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 348 с.
3. Тимофеев Д.А. Терминология флювиальной геоморфологии. М.: Наука, 1981. 268 с.
4. Чалов Р.С. О морфологическом разнообразии и типизации русел рек, разветвленных на рукава // Геоморфология. 2019. № 3. С. 3–18.
5. Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. М.: Транспорт, 1964. 262 с.
6. Чернышов Ф.М. Повышение эффективности путевых работ на многорукавных участках судоходных рек. Новосибирск: Изд. НИИВТ, 1979. 324 с.
7. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
8. Чалов Р.С. Сложноразветвленные русла равнинных рек: условия формирования, морфология и деформации // Водные ресурсы. 2001. Т. 23. № 1. С. 166–171.
9. 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.
10. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
11. Алексеевский Н.И., Чалов С.Р. Гидрологические функции разветвленного русла. М.: Изд-во МГУ, 2009. 240 с.
12. Чалов Р.С., Чалов С.Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 259–271.
13. Чалов Р.С. Типы русловых процессов и принципы морфодинамической классификации речных русел // Геоморфология. 1996. № 1. С. 25–36.
14. Чалов С.Р. Формирование структуры русловых разветвлений // Геоморфология. 2006. № 1. С. 92–102.
15. Чалов Р.С. Эффективность прогноза перестроений сложноразветвленного русла и его практическое значение // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1981. № 4. С. 36–40.
16. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенное воздействие, опасные проявления и управления русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.
17. Ботвинков В.М., Дегтярев В.В., Седых В.А. Гидроэкология на внутренних водных путях. Новосибирск: Сибирское соглашение, 2002. 180 с.
18. Цатурян Г.Г. Совершенствование методов улучшения судоходных условий на многорукавных участ-

- ках рек. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГАВТ, 2003. 25 с.
19. *Ржаницын Н.А.* Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 240 с.
 20. *Carling P., Jansen J., and Meshkov L.* Multichannel rivers: their definition and classification // *Earth Surf. Process. Landforms.* John Wiley Sons, Ltd. 2013. P. 26–37.
 21. *Lehotsky M., Rusnak M., Kidova A., and Dudzak J.* Multitemporal assessment of coarse sediment connectivity along a braided-wandering river // *L Degrad Dev.* 2018. P. 1249–1261.
 22. *Knighton A.D.* Fluvial and processes. London. Arnold Publ. 1998. 383 p.
 23. *Latrubesse E.M.* Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers // *Geomorphology.* Elsevier. 2008. P. 130–145.
 24. *Nanson G.C. and Knighton A.D.* Anabranching rivers: their cause, character and classification // *Earth surface processes and landforms.* 1996. No. 21. P. 217–239.
 25. *Eaton B.C., Millar R.G., and Davids S.* Channel patterns: Braided, anabranching, and single-thread // *Geomorphology.* Elsevier. 2010. No. 120. P. 353–364.
 26. *Leopold L.B. and Wolman M.G.* River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight. Prof. Pap. 282-B.U.S. Geological Survey, Washington, Dc. 1957. 85 p.
 27. *Чалов Р.С., Жмыхова Т.В.* Прирусловые отмели на верхней Оби: типизация, морфология и гидролого-морфологический анализ // *География и природные ресурсы.* 2014. № 4. С. 63–72.
 28. *Komar P.D.* Shapes of streamlined island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum-drag form // *Geology.* 1983. No. 11. P. 651–654.
 29. *Baker V.R.* Stream-channel response to floods, with example from Central Texas // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1977. Vol. 88. No. 8. P. 1057–1077.
 30. *Голубцов Г.Б., Чалов Р.С.* Сравнительный гидролого-морфологический анализ островов сложноразветвленных русел верхней Оби и средней Лены // *Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле.* 2020. Т. 30. Вып. 2. С. 164–174.
 31. *Смирнова В.Г.* Гидролого-морфологический анализ разветвленных русел рек Алтайского региона. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: ИГ СО РАН, 2002. 26 с.
 32. Селенга — Байкал. Эколого-географический атлас-монография / Гл. ред. Н.С. Касимов. М.: Геофак МГУ, 2019. 288 с.
 33. *Завадский А.С., Зима Ю.В.* Естественное и антропогенное изменение русла реки Аргуни (в свете ее пограничного положения) // *Водное хозяйство России.* 2011. № 6. С. 83–95.
 34. *Назаров Н.Н., Диарра Б., Дремин Д.А.* Морфологические разновидности русла и условия их формирования на р. Нигер (Западная Африка) // *Геоморфология.* 2021. Т. 52. № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0435428121020085>
 35. *Никитина Н.А.* Русловые процессы в узлах слияния рек. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 1989. 20 с.
 36. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н.* Параллельно-рукавные разветвления речных русел: условия формирования морфология и динамика // *Водные ресурсы.* 2008. Т. 35. № 2. С. 166–174.
 37. *Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулева С.Н., Завадский А.С., Головлев П.П., Голубцов Г.Б.* Формирование, эволюция и временная трансформация параллельно-рукавных разветвлений речных русел // *Географический вестник.* 2020. № 4 (55). С. 110–125.
 38. *Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
 39. *Чалов Р.С.* Временная трансформация разветвленных русел; факторы, условия, причины // *Геоморфология.* 2020. № 4. С. 15–33.
 40. *Кузьмина Е.М., Чалов Р.С.* Гидролого-морфологическая характеристика широкопойменного разветвленного русла средней Лены // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География.* 2020. № 1. С. 87–96.
 41. *Львовская Е.А.* Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках Севера ЕТР. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 2016. 20 с.

To the classification of braided channels of plain rivers

R. S. Chalov^{a, #}, A. S. Chalova^a, and G. B. Golubtsov^a

^a *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: rschalov@mail.ru*

Braided river channels are very diverse both morphologically (in terms of the number and water content of channel branches, size and shape of islands, their position, ratios, evolution, etc.), and in the mode of channel changes. Nevertheless, both in Russian and foreign literature, when describing them, there are different points of view on terms and classifications that define them, which make it difficult to analyze types of braided channels and regimes of channel changes, possible reactions of channels to changes in factors due to too much generalization. The classification of Moscow State University is considered to be an exception. It is constantly being improved as new data are obtained based on scientific research. Braided channel reaches are formed at several structural levels — point, midchannel bars, channel (island), floodplain-channel and floodplain (split channels). Each higher level of braided channels includes channel types of the previous levels. The main channel patterns that determine channel regime of braided rivers are island-braided channels, along which there are distinguished morphological homogeneous reaches or single patterns of channels or certain

channel branches. In turn, in island-braided channels each of their types has several varieties depending on the number and morphology of islands, channel stability, water content of channel branches and peculiarities of water and sediment runoff dispersion along them. Braided channel types and their varieties are characterized by certain values of the flow quasi-uniformity indicator of I.F. Karasev and special coefficients in hydrological and morphological relationships linking morphological parameters of channels with characteristics of determining factors. The article provides a detailed, most complete classification of braided channels and substantiates the use of terms and concepts that characterize each type or braided channel reaches and their elements.

Keywords: braided channels, islands, midchannel bars, channel branches, channel changes, channel regime

ACKNOWLEDGEMENTS

Present paper was carried out according to the plans of the state task at the Department of Hydrology and laboratory of soil erosion and fluvial processes named after N.I. Makkaveev, Lomonosov Moscow State University (source materials and their synthesis), and funded by the Russian Scientific Foundation (project 18-17-00086 – field research, hydrological and morphological analysis and classification development).

REFERENCES

1. Kondrat'ev N.E., Popov I.V., and Snishchenko B.F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii uslovogo protsesssa* (Fundamentals of the hydromorphological theory of the channel process). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1982. 272 p. (in Russ.)
2. Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee basseine* (River bed and erosion in its basin). Moscow: Izd-vo AN SSSR (Publ.), 1955. 348 p. (in Russ.)
3. Timofeev D.A. *Terminologiya flyuvial'noi geomorfologii* (Fluvial geomorphology terminology). Moscow: Nauka (Publ.), 1981. 268 p. (in Russ.)
4. Chalov R.S. *O morfologicheskom raznoobrazii i tipizatsii rusel rek, razvetvlenykh na rukava* (On the morphological diversity and typification of river channels branched into branches). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2019. No. 3. P. 3–18. (in Russ.)
5. *Proektirovanie sudovykh khodov na svobodnykh rekakh* (Design of transport passages on free rivers). *Tr. TsNIIIEVT. Vyp. 36*. M.: Transport (Publ.), 262 p. (in Russ.)
6. Chernyshov F.M. *Povyshenie effektivnosti putevykh rabot na mnogorukavnykh uchastkakh sudokhodnykh rek* (Increasing the efficiency of track work on multi-arm sections of navigable rivers). Novosibirsk: Izd-vo NIIVT (Publ.), 1979. 324 p. (in Russ.)
7. Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya uslovykh protsessov* (Geographic studies of channel processes). Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1979. 232 p. (in Russ.)
8. Chalov R.S. *Slozhnorazvetvlennye rusla ravninnykh rek: usloviya formirovaniya, morfologiya i deformatsii* (Complexly branched channels of lowland rivers: formation conditions, morphology and deformations). *Vodnye resursy*. 2001. Vol. 23. No. 1. P. 166–171. (in Russ.)
9. Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 1. Ruslovyie protsessy; faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* (Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 1: Riverbed processes, mechanism, forms of manifestations and conditions of formations of riverbeds). Moscow: LKI (Publ.), 2008. 608 p. (in Russ.)
10. Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnykh rusel* (Riverbed science: theory geography, practice. Vol. 2. Riverbed morphodynamics). Moscow: KRASAND (Publ.), 2011. 960 p. (in Russ.)
11. Alekseevskiy N.I. and Chalov S.R. *Gidrologicheskie funktsii razvetvlennoogo rusla* (Hydrological functions of a branched channel). Moscow: MGU (Publ.), 2009. 240 p. (in Russ.)
12. Chalov R.S. and Chalov S.R. *Strukturnye urovni i morfodinamicheskaya klassifikatsiya uslovykh razvetvleniy* (Structural levels and morphodynamic classification of channel ramifications). *Vodnye resursy*. 2020. Vol. 47. No. 3. P. 259–271. (in Russ.)
13. Chalov R.S. *Tipy uslovykh protsessov i printsipy morfodinamicheskoy klassifikatsii rechnykh rusel* (Types of channel processes and principles of the morphodynamic classification of river channels). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 1996. No. 1. P. 25–36. (in Russ.)
14. Chalov S.R. *Formirovanie struktury uslovykh razvetvleniy* (Formation of the structure of channel ramifications). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2006. No. 1. P. 92–102. (in Russ.)
15. Chalov R.S. *Effektivnost' prognoza pereformirovaniya slozhnorazvetvlennoogo rusla i ego prakticheskoe znachenie* (The efficiency of forecasting the reformation of a complexly branched channel and its practical significance). *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya*. 1981. No. 4. P. 36–40. (in Russ.)
16. Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 3. Antropogennoe vozdeystvie, opasnye proyavleniya i upravleniya uslovyimi protsessami* (Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 3. Anthropogenic impact, hazardous manifestations and management of channel processes). Moscow: KRASAND (Publ.), 2019. 640 p. (in Russ.)
17. Botvinkov V.M., Degtyarev V.V., and Sedych V.A. *Gidroekologiya na vnutrennykh vodnykh putyakh* (Hydroecology on inland waterways). Novosibirsk: Sibirskoe soglasenie (Publ.), 2002. 180 p. (in Russ.)
18. Tsaturyan G.G. *Sovershenstvovanie metodov uluchsheniya sudokhodnykh usloviy na mnogorukavnykh uchastkakh rek* (Improvement of methods for improving navigational conditions on multi-arm sections of rivers). *PhD Thesis*. Novosibirsk: NGAVT (Publ.), 2003. 25 p. (in Russ.)

19. Rzhantsyn N.A. *Rusloformiruyushchie protsessy rek* (River bed-forming processes). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1985. 240 p. (in Russ.)
20. Carling P., Jansen J., and Meshkov L. Multichannel rivers: their definition and classification. *Earth Surf. Process. Landforms. John Wiley Sons, Ltd.* 2013. P. 26–37.
21. Lehotsky M., Rusnak M., Kidova A., and Dudzak J. Multitemporal assessment of coarse sediment connectivity along a braided-wandering river. *L Degrad Dev.* 2018. P. 1249–1261.
22. Knighton A.D. *Fluvial and processes*. London. Arnold Publ. 1998. 383 p.
23. Latrubesse E.M. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. *Geomorphology. Elsevier.* 2008. P. 130–145.
24. Nanson G.C. and Knighton A.D. Anabranching rivers: their cause, character and classification. *Earth surface processes and landforms.* 21. 1996. P. 217–239.
25. Eaton B.C., Millar R.G., and Davids S. Channel patterns: Braided, anabranching, and single-thread. *Geomorphology. Elsevier.* 2010. P. 353–364.
26. Leopold L.B. and Wolman M.G. *River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight.* Prof. Pap. 282-B.U.S. Geological Survey, Washington, Dc. 1957. 85 p.
27. Chalov R.S. and Zhmykhova T.V. *Prirusslovye otmeli na verkhney Obi: tipizatsiya, morfologiya i gidrologo-morfologicheskii analiz* (Riverbanks on the upper Ob: typification, morphology, and hydrological-morphological analysis). *Geografiya i prirodnye resursy.* 2014. No. 4. P. 63–72. (in Russ.)
28. Komar R.D. Shapes of streamlined island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum-drag form. *Geology.* 1983. No. 11. P. 651–654.
29. Baker V.R. Stream-channel response to floods, with example from Central Texas. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1977. Vol. 88. No. 8. P. 1057–1077.
30. Golubtsov G.B. and Chalov R.S. *Sravnitel'nyy gidrologo-morfologicheskii analiz ostrovov slozhnorazvetvlennykh rusel verkhney Obi i sredney Leny* (Comparative hydrological and morphological analysis of the islands of the complexly branched channels of the upper Ob and the middle Lena). *Vest. Udmurt. un-ta. Ser. Biologiya. Nauki o Zemle.* 2020. Vol. 30. Iss. 2. P. 164–174. (in Russ.)
31. Smirnova V.G. *Gidrologo-morfologicheskii analiz razvetvlennykh rusel rek Altayskogo regiona* (Hydrological and morphological analysis of branched river channels in the Altai region). *PhD Thesis.* Irkutsk: IG SO RAN (Publ.), 2002. 26 p. (in Russ.)
32. *Selenga – Baykal. Ekologo-geograficheskii atlas-monografiya* (Ecological and geographical atlas-monography). Moscow: Geograf. f-t MGU (Publ.), 2019. 288 p. (in Russ.)
33. Zavadskiy A.S. and Zima Yu.V. *Estestvennoe i antropogennoe izmenenie rusla reki Arguni (v svete ee pogranichnogo polozheniya)* (Natural and anthropogenic changes in the channel of the Argun River in the light of its border position). *Vodnoe khozyaystvo Rossii.* 2011. No. 6. P. 83–95. (in Russ.)
34. Nazarov N.N., Diarora B., and Dremine D.A. *Morfologicheskie raznovidnosti rusla i usloviya ikh formirovaniya na r. Niger (Zapadnaya Afrika)* (Morphological varieties of the channel and the conditions of their formation on the river Niger (West Africa)). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS).* 2021. Vol. 52. No. 2. P. 3–13. (in Russ.)
35. Nikitina N.A. *Ruslovye protsessy v uzлах sliyaniya rek* (Channel processes at the junctions of rivers). *PhD Thesis.* Moscow: MGU (Publ.), 1989. 20 p. (in Russ.)
36. Chalov R.S., Zavadskiy A.S., and Ruleva S.N. *Parallelnorukavnyye razvetvleniya rechnykh rusel: usloviya formirovaniya morfologiya i dinamika* (Parallel arm branching of river channels: conditions of formation morphology and dynamics). *Vodnye resursy.* 2008. Vol. 35. No. 2. P. 166–174. (in Russ.)
37. Chalov R.S., Berkovich K.M., Ruleva S.N., Zavadskiy A.S., Golovlev P.P., and Golubtsov G.B. *Formirovanie, evolyutsiya i vremennaya transformatsiya parallelnorukavnykh razvetvleniy rechnykh rusel* (Formation, evolution and temporal transformation of parallel arm branching of river channels). *Geograficheskii vestnik.* 2020. No. 4 (55). P. 110–125. (in Russ.)
38. Karasev I.F. *Ruslovye protsessy pri perebroske stoka* (Channel processes during flow transfer). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1975. 288 p. (in Russ.)
39. Chalov R.S. *Vremennaya transformatsiya razvetvlennykh rusel; faktory, usloviya, prichiny* (Time transformation of branched channels; factors, conditions, reasons). *Geomorfologiya (Geomorphology RAS).* 2020. No. 4. P. 15–33. (in Russ.)
40. Kuz'mina E.M., and Chalov R.S. *Gidrologo-morfologicheskaya kharakteristika shirokopoymennogo razvetvlennoy rusla sredney Leny* (Hydrological and morphological characteristics of the wide-floodplain branched channel of the middle Lena). *Vest. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya.* 2020. No. 1. P. 87–96. (in Russ.)
41. L'vovskaya E.A. *Retrospektivnyi analiz, sovremennoe sostoyanie i otsenka vozmozhnykh izmeneniy usloviy protsessov na bol'shykh rekakh Severa ETR* (Retrospective analysis, current state and assessment of possible changes in channel processes on the large rivers of the North of the ETR). *PhD Thesis.* Moscow: MGU (Publ.), 2016. 20 p. (in Russ.)