

УДК 551.435.1, 556.537

Е.М. Кузьмина¹, Р.С. Чалов²

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ШИРОКОПОЙМЕННОГО РАЗВЕТВЛЕННОГО РУСЛА СРЕДНЕЙ ЛЕНЫ

В статье дан анализ распространения широкопойменного разветвленного русла разного морфодинамического типа на Средней Лене – на 40-км участке в пределах Березовской впадины (выше устья р. Олекмы) и на 400-км участке от выхода реки на Центрально-Якутскую низменность до Белой горы (ниже устья Алдана). Всего выделено шесть типов разветвлений, распределенных в процентном отношении примерно равномерно. Установлено соответствие каждого типа разветвлений определенным значениям критерия квазиоднородности И.Ф. Карасева. Получены гидролого-морфологические зависимости, связывающие ширину рукавов с величиной руслоформирующего расхода в них, относительную ширину островов (отнесенную к ширине неразветвленного русла) с удельным среднемаксимальным (отнесенным к ширине реки) расходом воды и показателем формы островов, образующих разветвление, которые дифференцируются по типам русла. Коэффициенты в уравнениях связи изменяются от простых к сложным по морфологии разветвлениям. Установлено оптимальное соотношение между длиной и шириной островов, при котором острова оказывают минимум гидравлических сопротивлений потоку. Оно соответствует значениям, полученным для других рек с разветвленным руслом. Причины различий в направленности изменений коэффициентов на разных реках из-за недостаточности данных пока остаются на уровне предположений (размеры рек, устойчивость русел, водный режим, сток наносов).

Ключевые слова: русловые разветвления, Лена, морфология русла, гидролого-морфологические зависимости

Введение. Изучение русел рек, разветвленных на рукава, началось в середине XX в. Впервые акцентировал на них внимание Н.И. Маккавеев [1955], показавший специфику условий формирования, структуры потока и особенности режима их деформаций. Тогда же М.А. Великанов [1958] подчеркнул, что многорукавность – характерная черта больших и крупнейших рек. Однако в классификациях долгое время сохранялось выделение разветвлений (или многорукавных русел) в целом без учета их морфологического и динамического разнообразия [Россинский, Кузьмин, 1947, 1958; Попов, 1965; Кондратьев с соавт., 1982; Knighton, 1998]; подчеркивались лишь различия между осередковыми и островными разветвлениями [Mill, 1977] (направление, которое уже в начале XXI в. было развито Н.И. Алексеевским и С.Р. Чаловым [2009]) и формой островов, создающих разветвления, в зависимости от преобладающего вида оказываемых ими гидравлических сопротивлений [Baker, 1977; Komar, 1983]. Такое представление проблемы было связано с малой изученностью русловых процессов на больших и крупнейших реках, сложностью самих разветвлений, разнообразием условий распределения стока воды и наносов по рукавам и их переформирований.

Начиная с 1960-х гг., экономическое развитие регионов, основными водными артериями которых были большие и крупнейшие реки, привело к необ-

ходимости изучения их руслового режима и, соответственно, морфологии и динамики разветвленных русел. Их особенности определяют транспортное использование рек, решение проблем, связанных с освоением водных ресурсов, прокладкой коммуникаций через реки, предотвращением опасных и неблагоприятных последствий русловых деформаций. Результатом таких исследований на Северной Двине, Оби, Лене, других реках была разработка морфодинамической классификации русел, в первом варианте которой было выделено шесть [Чалов, 1979, 1980], а в последнем – уже одиннадцать типов разветвлений [Чалов, 2008, 2017; Эрозионно-русловые системы, 2017]. Однако, будучи обоснованной детальными описаниями морфологии, анализом переформирований и структуры потока, эта классификация нуждалась в подтверждении каждого типа русла гидролого-морфологическими зависимостями. Затруднения в их получении связаны с отсутствием для разветвленных русел (в отличие от меандрирующих) как факторных, так и морфологических показателей. Применение же первого предложенного показателя B_o/b_p (здесь B_o – ширина острова, образующего разветвление, b_p – ширина русла перед разветвлением) и его соотношения с удельным среднемаксимальным расходом воды выше узла развет-

вления $q_{\max} = \frac{Q_{\text{ср. макс}}}{b_p}$ [Чалов, 2001, 2011] и других

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, магистрант; e-mail: kate.kuzmina.m@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, гл. науч. с., докт. геогр. н., профессор; e-mail: rschalov@mail.ru

гидролого-морфологических зависимостей [Львовская, 2016] на разных реках показало, что они имеют региональный смысл из-за различий в водности, водном режиме и стоке наносов, устойчивости русел и т. д. Существенный вклад в гидролого-морфодинамическое обоснование разветвленных русел внесли С.Р. Чалов [2007; Алексеевский, Чалов, 2009], а затем Е.А. Львовская [2016], также выявившие их региональные различия. Поэтому, несмотря на определенный прогресс в изучении гидроморфологии разветвленных русел, остается актуальным получение зависимостей между показателями факторов формирования и морфологии разветвлений больших и крупнейших рек на основе все большего статистического материала. В этом отношении река Лена представляет собой благоприятный объект для гидролого-морфологического анализа. Ее русловой режим достаточно хорошо изучен. Широкопойменное русло, начиная с выхода в пределы Центрально-Якутской низменности, характеризуется практически сплошным распространением сложных разветвлений, получивших здесь местное название – «разбой».

Объект и методы исследования. В качестве исследования выбрана в основном Средняя Лена на участках выше впадения р. Олекмы (Кыллахский «разбой», около 50 км) и от п. Мохсоголоох (около 90 км выше г. Якутска) до слияния с р. Алданом (300 км), а также участок Нижней Лены (Белогорский «разбой», 55 км) между устьями Алдана и Вилюя. Исследования на них выполнялись с разной повторяемостью, начиная с 1969 г., включая подробные съемки и промеры русла, гидрологические измерения во всех рукавах. Для руслового анализа использованы лоцманские карты разных лет издания (с 1920-х гг.) и космические снимки.

Река Лена в среднем течении относится к рекам с восточносибирским типом водного режима, имеет преимущественно снеговое питание с высокой долей дождевого. Среднегодовой расход выше устья р. Олекмы (г. п. Солянка) равен 5530 м³/с, на участке от п. Мохсоголоох до устья р. Алдана (г. п. Табага) – 7980 м³/с. Слияние с р. Алданом увеличивает сток Нижней Лены на 35%, и здесь он составляет в среднем 13 860 м³/с. Максимальные значения расходов воды наблюдаются либо во время половодья, либо во время прохождения дождевых паводков. Средний многолетний сток взвешенных наносов (г. п. Табага) равен 8,99 млн т, в половодье – 7,62 млн т, в межень – 1,37 млн т. Сток влекомых наносов на Средней и Нижней Лене составляет соответственно 37,6 и 43% от стока взвешенных. В межень на г. п. Табага он равен 0,85 млн тонн, в половодье или паводочный период – 4,58 млн тонн. Среднегодовой сток влекомых наносов – 5,43 млн тонн [Чалов с соавт., 2000].

Условия формирования и морфология русла. Широкопойменное разветвленное русло Лены в районе Кыллахского «разбоя» формируется при пересечении рекой Березовской впадины, а ниже п. Мохсоголоох – по восточной окраине Центрально-Якут-

ской низменности – в рыхлых отложениях, обеспечивающих свободные условия развития русловых деформаций. Лишь у Табагинского утеса и Кангаласского камня к реке подходят сложенные полускальными породами мысы Приленского плато, вызывающие местные сужения днища долины. Руслообразующие наносы, в основном, представлены среднезернистыми, но в Кыллахском и Белогорском «разбоях» крупнозернистыми песками, а в правых рукавах Белогорского встречаются галечники. В последнем случае это связано с выносами галечного материала в Лену из Алдана, в первом – с поступлением наносов большой крупности из расположенного выше врезанного русла, формирующегося в скальных породах. Соответственно русло здесь является слабоустойчивым, тогда как от п. Мохсоголооха до устья Алдана – преимущественно неустойчивым [Водные пути ..., 1995].

Широкопойменное русло Средней и Нижней Лены представлено разветвлениями различного морфодинамического типа, причем все они относятся к категории сложных, т. к. образованы многочисленными островами и зарастающими прирусловыми отмелями посередине русла (осередками). В процентном отношении они распространены почти равномерно (табл. 1). На рис. 1 показаны наиболее характерные разновидности ленских разветвлений; подробное описание их морфологии дано в специальных публикациях [Водные пути ..., 1995; Чалов, Кирик, 2015].

Неразветвленное прямолинейное широкопойменное русло на Средней Лене встречается лишь на коротком 8-км участке ниже сужения русла Табагинским утесом, где во время половодья формируется кривая спада уровня и уклоны возрастают на 0,05‰, обуславливая рост скоростей и местный разрыв русла.

Результаты и обсуждение. Гидролого-морфологические и гидрометрические зависимости. И.Ф. Карасев [1975] для оценки квазигомогенности потока (четкое выделение в нем динамической оси, стрежневой зоны или разбиение его на две или больше осей или стрежневые зоны) предложил критерий

$$\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\frac{2g}{c^2}},$$

где h – глубина потока $\lambda = \sqrt{\frac{2g}{c^2}}$ – коэффициент гидравлических сопротивлений, c – коэффициент Шези. Для разветвленных русел значение критерия Q , по И.Ф. Карасеву, больше 9,5. Для широкопойменных разветвлений русла Средней Лены и Белогорского «разбоя» он был определен для 73 створов, которые равномерно распределены по участкам с различными морфодинамическими типами (рис. 2). Наибольшее значение критерия Карасева (95) соответствует параллельно-рукавным разветвлениям – «разбоям» Рассолода и Якутскому, которые формируются в неустойчивые русла. Для сопряженных разветвлений, характеризующихся боль-

Таблица 1

Морфодинамические типы разветвлений в широкопойменном русле Средней и Нижней Лены

Тип разветвления, название	Км судового хода	% длины участка
Выше устья Олекмы		
Сложное одиночное, Кыллахское	2300–2266	100
От п. Мохсоголлох до устья р. Алдан		
Относительно прямолинейное, неразветвленное русло	1745–1785	6,6
Сложное одиночное, Покровское	1725–1707	5,9
Параллельно-рукавное, Рассолода	1707–1685	7,3
Относительно прямолинейное, неразветвленное русло	1685–1677	2,6
Параллельно-рукавное, Якутское	1677–1630	15,4
Чередующиеся односторонние	1630–1553	25,2
Одностороннее, Намское	1553–1530	7,5
Сопряженное, Приалданское	1530–1440	29,5
Ниже устья р. Алдан		
Односторонние разветвления	1440–1406	36,2
Пойменно-русловое, Белогорское	1406–1346	63,8

шей морфологической упорядоченностью, и имеет наименьшие значения – 64. Промежуточное положение занимают последовательно односторонние ($\Theta=88$), одиночные ($\Theta<80$) и Белогорское пойменно-русловое разветвление ($\Theta=64$). Соответственно в этом же направлении повышается устойчивость русла.

Важной характеристикой разветвлений является рассредоточенность потока по рукавам, которая усугубляется отвлечением части стока в пойменные протоки, ответвления, по Н.И. Маккавееву [1955], формированием в рукавах островов 2-го и 3-го порядков, наличием межостровных протоков, по которым осуществляется гидравлическая связь между рукавами, и прибрежных протоков [Чалов, 2011]. В одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных и пойменно-русловых разветвлениях обычно выделяется два (реже три) основных рукава, относительная водность которых составляет от 50–70%; остальная часть расходов воды распределяется первыми процентами по второстепенным протокам и рукавам. При наличии в рукавах островов 2–3-го порядков водность протоков возле них соответственно сокращается. Временная изменчивость водности основных рукавов, которая связана как с сезонными и многолетними ее колебаниями, так и с переформированиями русла [Маккавеев, 1955; Чалов, 1979, 2011], обеспечивает периодичность их развития. Пример такой периодичности дает Омулаганское звено сопряженных разветвлений, в котором большая часть расхода воды сосредотачивается то в левом, то в правом рукавах (рис. 3). Соответственно, такие же изменения происходят в разветвлениях выше и ниже по течению. Периодичность в распределении стока и развития рукавов осложняется перемещением водных масс между островами по межостровным протокам, впадением в тот или иной рукав или отходом от них пойменных протоков, а в

многоводную фазу режима – сливом воды из рукава на пойму или поступлением в рукав с затопленной поймы осветленных вод. В узлах слияния реки с крупными притоками важную роль в развитии рукавов, пойменных и межостровных протоков в «архипелагах» островов играет возникающий в половодье или при дождевых паводках подпор со стороны притока. В нижнем звене Приалданских «разбоев» сток воды сосредотачивается в левом рукаве Турый взвоз, когда Лена находится в подпоре от Алдана. В годы, когда в подпоре находится Алдан, на Лене формируется кривая спада и развивается правый рукав – Арбынская протока, образующая «короткое слияние» с притоком (вдоль стрелки в узле слияния).

В Кыллахском «разбое» регулярный подпор от р. Олекмы и ледовых заторов перед ее устьем способствует сохранению стабильной водности (20–25%) левого рукава, по которому поток стремится «обойти» возникшую преграду.

В Белогорском пойменно-русловом разветвлении водность левого основного рукава относительно постоянна и составляет 55–60%, второго основного, исток которого расположен за плечом правого коренного берега, – около 20%. Остальной сток воды рассредоточен по многочисленным межостровным протокам, устья многих из которых располагаются в нижней части разветвления в левом основном рукаве.

В односторонних разветвлениях всегда имеется один основной рукав, забирающий до 90% расхода воды; остальная его часть распределяется по второстепенным протокам и рукавам, проходящим в противоположной ему, обычно вдоль односторонней поймы, стороне русла.

Основной для гидролого-морфологического анализа разветвлений широкопойменного русла Средней Лены принята зависимость средней шири-

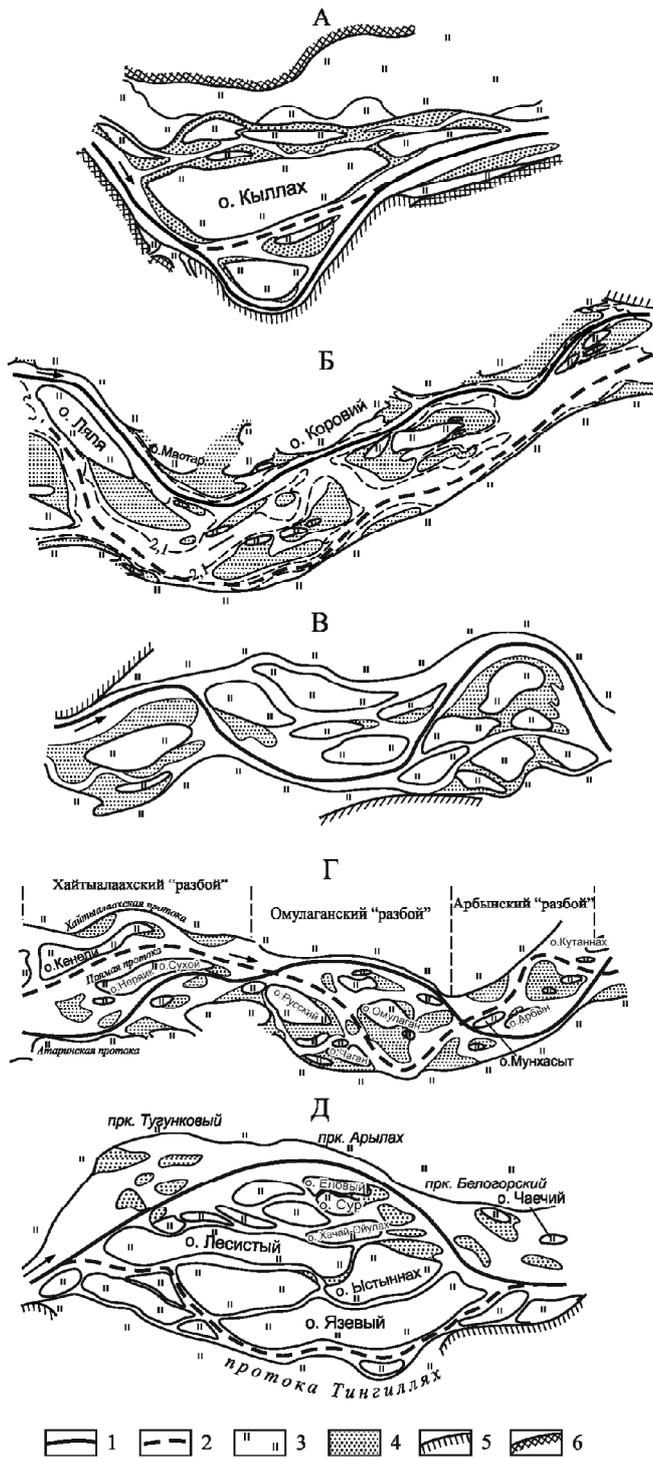


Рис. 1. Основные разновидности разветвленного русла Средней Лены: А – сложное одиночное (Кыллахский «разбой»); Б – параллельно-рукавное («разбой» Рассолода); В – чередующиеся односторонние (Кангаласский камень – с. Намцы); Г – сопряженные (приалданские «разбой»); Д – сложное пойменно-руслуное (Белогорский «разбой»)

Fig. 1. Principal types of braided channel for the Middle Lena River: А – complex single (the Kyllah branching); Б – parallel-arm (the Rassoloda branching); В – alternating one-sided (from the Kanglassky Kamen to the Namtsy settlement); Г – combined (near-Aldan branchings); Д – complex floodplain-channel (the Belaya Gora branching)

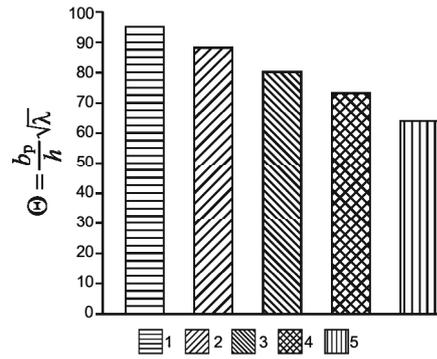


Рис. 2. Распределение значений критерия И.Ф. Карасева по типам разветвленного русла: 1 – параллельно-рукавное, 2 – одностороннее, 3 – одиночное, 4 – пойменно-руслуное, 5 – сопряженное

Fig. 2. I.F. Karasev's criterion values by the types of braided channel: 1 – parallel-arm, 2 – one-sided, 3 – single, 4 – floodplain-channel, 5 – combined

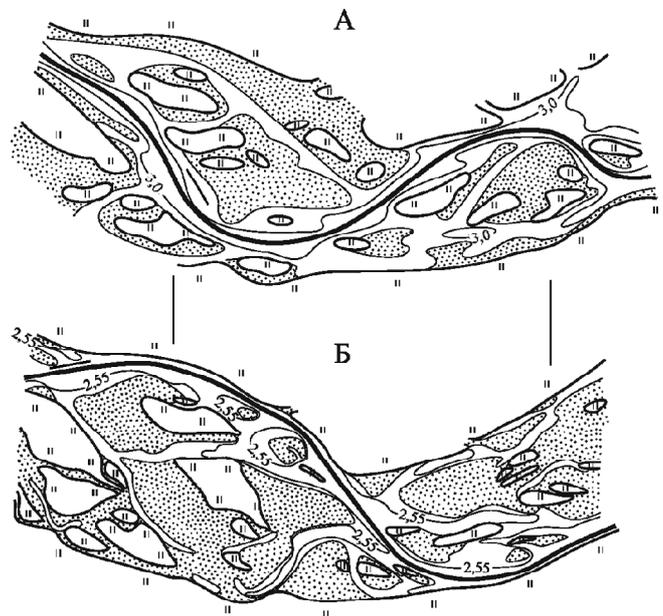


Рис. 3. Многолетние переформирования русла в Омугаланском сопряженном разветвлении: А – 1960–80-е гг., Б – 2000-е гг.

Fig. 3. Long-term channel transformations within the Omulagan combined branching: А – during the 1960-s to 1980-s; Б – during the 2000-s

ны главных рукавов в половодье, а в некоторых случаях (в Кыллахском и Приалданских «разбоях») также проток в разветвлениях 2-го порядка и крупных, значимых по водности пойменных ответвлений, от руслоформирующего расхода в каждом из них. Средняя ширина русел рукавов $b_{рук}$ определялась как частное от деления площади рукава в пойменных бровках на его длину; руслоформирующие расходы воды в рукавах $Q_{ф.рук}$ принимались пропорционально рассредоточению стока по ним от $Q_{ф}$ по г.п. Солянка и Табага, проходящего при уровнях затопленной поймы и соответствующего формированию на Лене разветвлений [Чалов, 1979, 2008; Чалов с соавт., 1998].

Для каждого разветвления была получена зависимость ширины рукава $b_{рук}$ от руслоформирующего расхода воды в нем $Q_{ф.рук}$ (рис. 4)

$$b_{рук} = kQ_{ф.рук} + a, \quad (1)$$

где коэффициенты k и a в уравнениях связи (табл. 2) дифференцируются по типам разветвлений. При использовании меженных расходов воды зависимости проявляются лишь в виде общих тенденций и могут служить для определения значимости рукавов в рассредоточении стока по основным из них. При этом усложнение морфологии разветвлений и увеличение рассредоточенности стока по рукавам от сопряженных разветвлений к параллельно-рукавным и пойменно-русловым сопровождается снижением значений коэффициента k . Особое место занимает одиночное Кыллахское разветвление (см. рис. 1, А), где, во-первых, водность Лены почти в 1,5 раза меньше, чем перед устьем Алдана; во-вторых, оно находится в изолированном местном расширении дна долины (Березовская впадина). Правый основной рукав образует крутую вписанную излучину (остальные – относительные прямолинейные) и характеризуется сочетанием разных гидравлических условий, связанных как с этой излучиной, так и с формированием кривых спада в его начале, подпором от слияния с Олекмой и ледовых заторов в конце. Эти условия определили обратную связь $b = f(Q)^{-0.7}$ для основных рукавов и «нормальную» прямую для второстепенных (2-го порядка).

Коэффициент a (свободный член) в (1) уменьшается в иной последовательности: одиночное трехрукавное Кыллахское → сложное одиночное Покровское → пойменно-русловое Белогорское → параллельно-рукавное Рассолода и Якутское → сопряженные Приалданские. Такая же последовательность изменения значений коэффициентов k и a в зависимости ширины рукавов от $Q_{ф.рук}$ была обнаружена для нижней Печоры [Чалов с соавт., 2015], хотя здесь абсолютные значения k на порядок величины меньше, тогда как a практически совпадают.

Наибольший разброс точек в (1) и низкий коэффициент корреляции характерен для параллельно-рукавных разветвлений Рассолода и Якутского (см. рис. 1, Б, см. табл. 2) как для основных рукавов, так и для рукавов 2-го порядка. По-видимому, это связано с тем, что формирование этого типа русла началось только во второй половине XX в. [Чалов с соавт., 2016], и окончательное превращение осередков в острова здесь еще не завершено.

Деформации рукавов в разветвлениях и перестроения разветвлений в целом определили морфологию образующих их островов. Гидравлически выгодная форма острова, обеспечивающая наименьшее сопротивление потоку, соответствует ее каплевидной форме при отношении длины островов к ширине $L_o/B_o = 3 \div 4$ [Baker, 1977; Komar, 1983]. Большие значения соотношения соответствуют удлиненной форме островов, возникающей благодаря их трансгрессивному (вверх от оголовка) и регрессив-

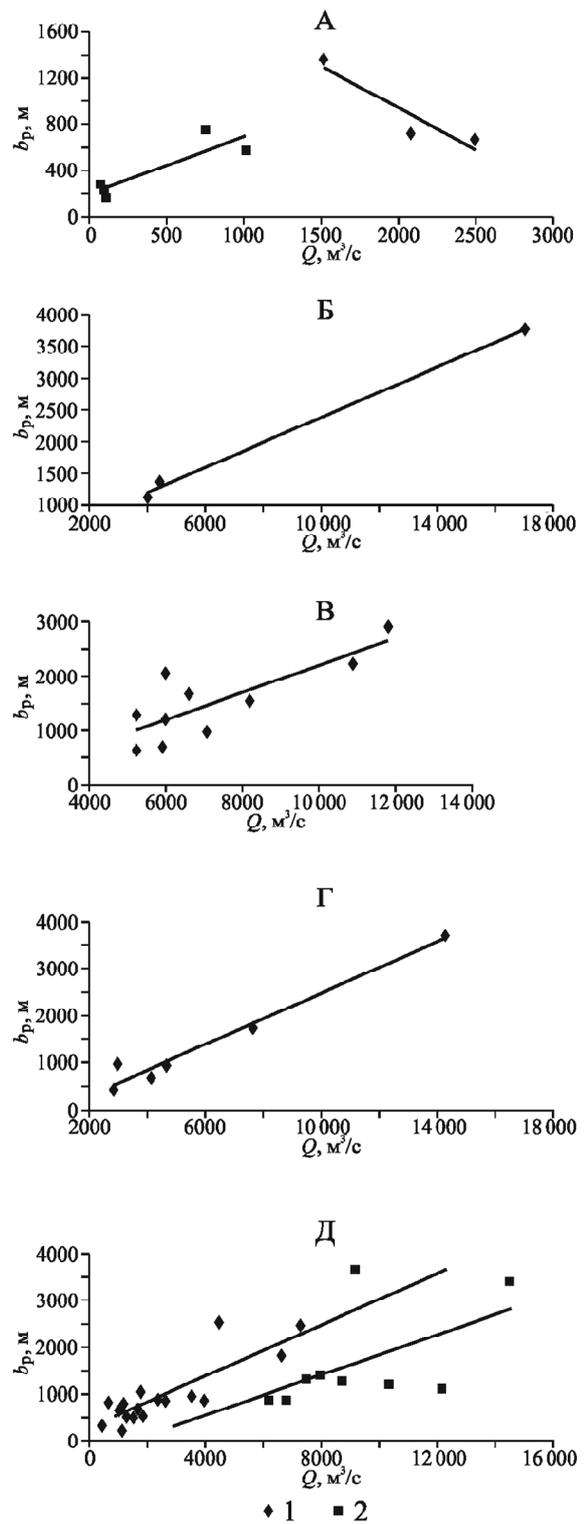


Рис. 4. Зависимости $b_{рук} = f(Q_{ф.рук})$ для разветвлений: А – одиночного трехрукавного Кыллахского; Б – параллельно-руслового Белогорского; В – параллельно-рукавных Рассолода и Якутского; Г – сложного одиночного Покровского; Д – сопряженных Приалданских

Fig. 4. Values of $b_{рук} = f(Q_{ф.рук})$ for the branchings: А – the Kyllah single three-arm; Б – the Belaya Gora parallel-channel; В – the Rassoloda and Yakutsk parallel-arm; Г – the Pokrovsk complex single; Д – the near-Aldan combined

Таблица 2

Коэффициенты в уравнении связи ширины рукава ($b_{\text{рук.}}$) и руслоформирующего расхода воды ($Q_{\text{ф.рук.}}$)

Тип разветвления	k	a	Коэффициент корреляции
Одинокое трехрукавное Кыллахское	0,747	2420	—*
Пойменно-русловое	0,196	419,4	—*
Параллельно-рукавное	0,244	257,4	0,64
Сложное одинокое Покровское	0,292	488,4	0,87
Сопряженное	0,326	187,2	0,84

* Коэффициенты корреляции не подсчитывались из-за малого количества данных.

ному (от ухвостья) смещению; меньшие – поперечному развитию и расширению островов. Для оценки этого показателя на Средней Лене были определены морфометрические характеристики 236 островов (рис. 5). Соотношение $L_0 \sim B_0$ для них дифференцируется в зависимости от типа разветвления (табл. 3). Оно равно 3,8 и 3,6 для сложных одиноких и параллельно-рукавных разветвлений соответственно; среднее значение 3,7 можно принять за норму, отклонение от которой приводит к формированию островов овальной или удлинённой (вытянутой вдоль реки) формы. Для Белогорского пойменно-руслового и сложного одинокого Кыллахского разветвления соотношение равно 4,1 и 4,5. При увеличении ширины островов формируются сопряженные и односторонние разветвления, для которых соотношение равно 3,2 и 2,9, что связано, в первую очередь, с образованием возле них побочной и развитием излучин рукавов, огибающих острова.

Е.А. Львовской [2016] была определена практически такая же «норма» для формы островов на реках севера ЕТР – 3,8. Но здесь она характерна для островов одиноких и сопряженных разветвлений (кроме Мезени). В односторонних разветвлениях и параллельно-рукавных она больше «нормы», тогда как в пойменно-русловых – меньше. На Лене острова в пойменно-русловом разветвлении имеют удлинённую форму, что связано с большей водностью реки (среднегодовой расход воды р. Печоры в 3,5 раза меньше, чем у Средней Лены перед слиянием с Алданом, и в 7 раз меньше, чем у Лены в низовьях) и с меньшей устойчивостью. На р. Оби [Тарбеева, 2004] $L_0/B_0 = 3,4$ в сопряженных разветвлениях, что близко к значениям, полученным для

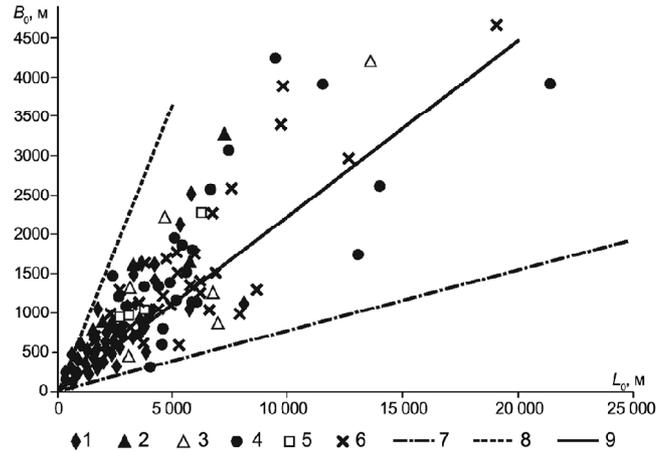


Рис. 5. Соотношение ширины B_0 и длины L_0 островов разветвлений различных морфодинамических типов русла на р. Лене: 1 – сопряженное, 2 – одинокое Покровское, 3 – одинокое Кыллахское, 4 – пойменно-русловое, 5 – одностороннее, 6 – параллельно-рукавное, 7 – верхняя огибающая ($L_0/B_0=1,6$); 8 – нижняя огибающая ($L_0/B_0=12,4$); 9 – нормальное соотношение ($L_0/B_0=3,7$)

Fig. 5. Ratio of island width B_0 and length L_0 for different morphodynamic types of the Lena River channel branching: 1 – combined, 2 – the Pokrovsk single, 3 – the Kyllah single, 4 – floodplain-channel, 5 – one-sided, 6 – parallel-arm, 7 – upper envelope ($L_0/B_0=1,6$); 8 – low envelop ($L_0/B_0=12,4$); 9 – standard ratio ($L_0/B_0=3,7$)

сопряженных разветвлений Лены. Для одиноких разветвлений Оби $L_0/B_0 = 7,2$, что почти в два раза превышает значение, полученное для одинокого Кыллахского разветвления на Лене.

Таблица 3

Соотношение между шириной B_0 и длиной островов L_0 на Средней Лене

Тип разветвления	Уравнение связи	L_0/B_0	Коэффициент корреляции
Одинокое (Кыллахское)	$B_0=0,288L_0+117,4$	4,5	0,87
Пойменно-русловое	$B_0=0,193L_0+425,9$	4,1	0,78
Одинокое (Покровское)	$B_0=0,382L_0+190,1$	3,8	0,88
Параллельно-рукавное	$B_0=0,257L_0+75,58$	3,6	0,92
Сопряженное	$B_0=0,266L_0+68,34$	3,2	0,83
Одностороннее	$B_0=0,302L_0+204,6$	2,9	0,66

Приведенное сопоставление зависимостей $b_{рук.} = f(Q_{ф.рук.})$ с полученными для других рек с разветвленным руслом (рекам ЕТР, Оби) подтверждает ее региональный характер как в отношении значения коэффициентов, так и в последовательности их изменения по типам разветвлений. Такой же региональный смысл имеет зависимость относительной ширины островов (островных массивов) B_o/b_p (здесь b_p – ширина русла перед узлом разветвления) от удельного среднемаксимального расхода воды q_{max} (m^2/c), определенного для неразветвленного русла (рис. 6)

$$\frac{B_o}{b_p} = \pm kq \pm Y, \quad (3)$$

т.е. коэффициенты в уравнениях связи также дифференцируются в зависимости от типа разветвления (табл. 4), увеличиваясь от сложносопряженных к односторонним разветвлениям.

Для р. Печоры коэффициент k в уравнении связи увеличивается от пойменно-русловых к сопряженным разветвлениям [Чалов с соавт., 2016], а для Нижней Лены [Чалов, 2001, 2011] эта зависимость обратная с возрастающими коэффициентами в ряду: простые сопряжения → параллельно-рукавные → односторонние чередующиеся → сложные сопряженные разветвления. Такие различия связаны с тем, что водоносность Печоры меньше, чем Лены, в 1,5–3,5 раза, устойчивость русла выше, а разветвления представлены консолидированными островными массивами. На Нижней Лене, водоносность которой возрастет после слияния с Алданом в 1,5 раза, устойчивость русла меньше, а разветвления каждого типа – это сложно построенные архипелаги островов, разделенные многочисленными протоками.

Несмотря на большую протяженность, сложность разветвлений Средней Лены практически всех морфодинамических типов, количество составляющих их узлов невелико. Впрочем, это характерно для всех рек с разветвленным широкопойменным руслом. Наименьшее количество узлов разветвлений в одностороннем Намском и сложном одиночном Покровском разветвлениях. В сопряженных и параллельно-рукавных разветвлениях – четыре–пять узлов, соответственно. Это не позволяет, с одной стороны, провести углубленный статистический анализ

Таблица 4

Значение коэффициентов в уравнении связи относительной ширины островов (B_o/b_p) с удельным среднемаксимальным расходом воды в реке (q_{max})

Тип разветвления	K	Y
Одностороннее	0,097	0,712
Сложное одиночное (Покровское)	0,066	0,633
Параллельно-рукавное	0,022	0,045
Сопряженное	0,006	0,120

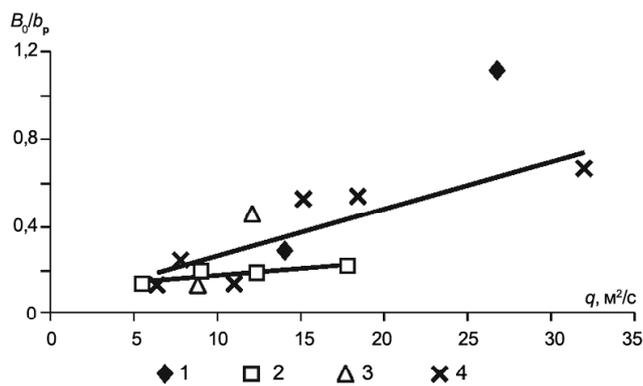


Рис. 6. График зависимости относительной ширины островов (B_o/b_p) от удельного среднемаксимального расхода воды в узлах разветвлений различных морфодинамических типов (q_{max} , m^3/c): 1 – сложное одиночное, 2 – сопряженное, 3 – одностороннее, 4 – параллельно-рукавное

Fig. 6. Dependency graph of specific island width (B_o/b_p) on the average maximum water discharge (q_{max} , m^3/s) in the branching points of different morphodynamic types: 1 – complex single, 2 – combined, 3 – one-sided, 4 – parallel-arm

данных по морфологии и морфометрии разветвлений, а с другой – ограничивает возможности интерпретации различий коэффициентов связи в гидролого-морфологических зависимостях для разных рек, отличающихся по размерам, устойчивости русел, водному режиму и стоку наносов.

Выводы:

– в широкопойменном → разветвленном русле Средней Лены (и частично Нижней – от устья Алдана до Белой горы) разветвления представлены шестью морфодинамическими типами, которые распространены в процентном отношении по длине 400 км участка примерно равномерно. Лишь изолированное 45-км Кыллахское разветвление (выше устья Олекмы) представлено одним типом;

– для Лены определено оптимальное соотношение длины и ширины островов («норма») – 3,8, соответствующее гидравлически наиболее выгодной форме островов. Такое соотношение характерно для одиночных и параллельно-рукавных разветвлений. В разветвлениях других типов оно больше или меньше, являясь следствием преимущественно продольного или поперечного смещения островов. Для пойменно-руслового Белогорского, сложного одиночного Кыллахского разветвлений оно равно 4,1 и 4,5, соответственно, отражая развитие, зарастание и превращение в пойму кос в ухвостьях островов. При увеличении ширины островов формируются сопряженные и односторонние разветвления с соотношением $L_o/B_o = 3,2 \times 2,9$;

– разветвления каждого типа характеризуются своими значениями критерия квазиоднородности потока И.Ф. Карасева. Его значение увеличивается от пойменно-русловых к сложным одиночным разветвлениям;

– относительная ширина островов зависит от удельного среднемаксимального расхода воды; зна-

чение коэффициента в уравнении связи увеличивается от сопряженных к односторонним разветвлениям;

– ширина рукавов определяется их водностью при руслоформирующем расходе воды и зависит от морфодинамического типа разветвлений и морфологии самих рукавов. Однако связи $b_{рук} = f(Q_{ф})$ не одинаковы для разветвлений разных типов, а также для основных рукавов и рукавов 2-го порядка;

– при значительной протяженности разветвленного русла, которое занимает практически всю длину Средней и участок Нижней Лены до Белой горы количество узлов разветвлений с разным морфодинамическим типом невелико. Это ограничива-

ет возможности статистического анализа морфологических и морфометрических характеристик разветвлений. Поскольку такая же ситуация характерна для других сравнительно хорошо изученных больших рек с разветвленным руслом, установить на данном этапе изученности разветвлений причины различий коэффициентов в гидролого-морфологических зависимостях (как это сделано, например, для меандрирующих рек [Чалов и др., 2004]) пока невозможно. Однако изложенные результаты исследований широкой пойменного русла Средней и частично Нижней Лены следует рассматривать как важный шаг в понимании процессов, формирующих разветвления, и получении необходимой для этого информации.

Благодарности. Выполнено по планам НИР кафедры гидрологии суши и научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, при поддержке РФФ (проекты № 14-17-00155 – параметризация разветвленных русел и 18-17-00086 – гидролого-морфологический и морфометрический анализ разветвлений Средней Лены).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Чалов С.Р.* Гидрологические функции русловых разветвлений. М.: Географический ф-т МГУ, 2009. 240 с.
- Великанов М.А.* Русловой процесс. М.: Госфизматиздат, 1958. 395 с.
- Водные пути бассейна Лены. М.: Микис, 1995. 600 с.
- Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 288 с.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Сницченко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 272 с.
- Львовская Е.А.* Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках севера ЕТР. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2016. 30 с.
- Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 247 с.
- Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 328 с.
- Россинский К.И., Кузьмин И.А.* Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел // Проблемы регулирования речного стока. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. С. 58–129.
- Россинский К.И., Кузьмин И.А.* Закономерности формирования речных русел // Русловые процессы. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 5–14.
- Тарбеева А.М.* Формирование и эволюция островов в русле Оби // Эрозионные, русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: МГУ, 2004. С. 202–208.
- Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
- Чалов Р.С.* О классификации речных русел // Геоморфология. 1980. № 1. С. 18–24.
- Чалов Р.С.* Сложно разветвленные русла равнинных рек: условия формирования, морфология и деформации // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 2. С. 166–171.
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Чалов Р.С.* Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2017. 569 с.
- Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В.* Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В.* Речные излучины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 271 с.
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Кирик О.М., Проконьев В.П., Андросов И.М., Сахаров А.И.* Морфология, деформации, временное изменение русла р. Лены и их влияние на хозяйственную инфраструктуру в районе г. Якутска // Геоморфология. 2016. № 3. С. 22–35.
- Чалов Р.С., Кирик О.М.* Ленские «разбой»: ретроспективный анализ переформирования, прогнозные оценки и регулирование русла // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 19. М.: Географ. ф-т МГУ, 2015. С. 294–338.
- Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И.* Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во МГУ, 2000. 216 с.
- Чалов Р.С., Львовская Е.А., Рулева С.Н., Завадский А.С.* Морфодинамика русла р. Печоры (от г. Печоры до устья) на фоне характеристики русла по всей длине // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 19. М.: Географ. ф-т МГУ, 2015. С. 211–235.
- Чалов С.Р.* Гидрологические функции разветвлений русла. М.: Географ. ф-т МГУ, 2009. 240 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.
- Knighton A.D.* Fluvial forms and processes: a new perspective. London: Arnold. 1998. 398 p.
- Komar P.D.* Shaper of streamlined island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum-drag form // Geology. 1983. № 11. P. 651–654.
- Mill A.D.* A review of the braided-river depositional environment // Earth Sci. Rev. 1977. Vol. 13. P. 1–62.

Поступила в редакцию 12.07.2019

После доработки 25.08.2019

Принята к публикации 12.09.2019

E.M. Kuz'mina¹, R.S. Chalov²

**HYDROLOGICAL AND MORPHOLOGICAL OUTLINE
OF THE WIDE-FLOODPLAIN BRAIDED CHANNEL
OF THE MIDDLE LENA RIVER**

The paper presents the analysis of the occurrence of different morphodynamic types of wide-floodplain braided channel within the middle reaches of the Lena River, i. e. a 40-kilometer long section within the Berezovskaya Depression (upstream the mouth of the Olekma River) and a 400-kilometer long section from the river outlet to the Central Yakut Lowland to the Belaya Gora (downstream the Aldan River mouth). Six types of branching were identified with approximately the same percentage of occurrence. It was found that each type of branching corresponds to certain values of I.F. Karasev's quasihomogeneity criterion. Hydrological-morphological dependences are obtained, which relate the width of the arms to the channel-forming flow in them, and the relative width of the islands (taken relative to the width of unbraided channel) to specific average maximum discharge (taken relative to the width to the river) and the shape of the islands, forming the branch. The dependencies differ according to the channel types. The coefficients in the constraint equations change from simpler to more morphologically complex branchings. An optimal ratio (relation) between the length and width of the islands is established, which corresponds to a minimum hydraulic resistance of the islands to the flow. The ratio is similar to those obtained for other rivers with braided channel. Because of insufficient data the reasons for different trends of coefficient modifications for different rivers (river size, bed stability, water regime, sediment runoff etc.) are just hypothetical so far.

Key words: channel braids, the Lena River, channel morphology, hydrological-morphological relations

Acknowledgements. The study was carried out under the research plans of the Department of Land Hydrology and the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes and financially supported by the Russian Science Foundation (projects № 14-17-00155 – parametrization of braided channels and 18-17-00086 – hydrological-morphological and morphometric analysis of braided channels of the Middle Lena River)

REFERENCES

- Alekseevskiy N.I., Chalov S.R.* Hidrologicheskie funkicii ruslovykh razvetyvleniy [Hydrological impacts of braided channel]. M.: Geograf. f-t MGU, 2009. 240 p. (In Russian)
- 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 R.S.* Geograficheskie issledovaniya ruslovykh processov [Geographic research of channel processes]. M.: Izd-vo MGU, 1979. 232 p. (In Russian)
- Chalov R.S.* O klassifikacii rechnykh rusel [About classification of river channels] // *Geomorfologiya*. 1980. № 1. P. 18–24 (in Russia).
- Chalov R.S.* Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 1 Ruslovye process: teoriya, mehanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rusel [Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and channel-forming conditions]. M.: Izd-vo LKI, 2008. 608 p. (In Russian)
- Chalov R.S.* Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnykh rusel [Riverbed science: theory, geography, practice. Vol. 2. Morphodynamics of river channels]. M.: KRASAND, 2011. 960 p. (In Russian)
- Chalov R.S.* Ruslovye processy (ruslovedenie). [Channel processes (riverbed science)]. M.: INFRA-M, 2017. 569 p. (In Russian)
- Chalov R.S.* Slozhno razvetyvlyonnyye rusla ravninnykh rek: usloviya formirovaniya, morfologiya i deformacii [Complicatedly braided channels of lowland rivers: conditions of formation, morphology and deformations] // *Vodnye resursy*. 2001. T. 28. № 2. P. 166–171. (In Russian)
- Chalov R.S., Zawadskiy A.S., Panin A.V.* Rechnye izluchiny [River meanders]. M.: Izd-vo MGU, 2004. 371 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Alabyan A.M., Ivanov V.V., Lodina R.V., Panin A.V.* Morfodinamika rusel ravninykh rek [Channel morphodynamics of lowland rivers]. M.: GEOS, 1998. 288 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Kirik O.M.* Lenskie «razboi»: retrospektivnyy analiz pereformirovaniy, prognoznye ocenki i regulirovaniye rusla [The Lena River braided reaches: retrospective analysis of channel changes, prognoses and channel regulation] // *Erozia pochv i ruslovye processy*. M.: Geogr. f-t. MGU, 2015. Vol. 19. P. 294–338. (In Russian)
- Chalov R.S., L'vovskaya E.M., Ruleva S.N., Zavadskiy A.S.* Morfodinamika rusla r. Pechory (ot g. Pechory do ustiya na fone harakteristiki rusla po vsej dline) [Morphodynamics of the riverbed of the Pechora River (from Pechora town to the mouth) against the background of the channel characteristics along the entire length of the river] // *Erozia pochv i ruslovye processy*. Vol. 19. M.: Geogr. fak. MGU, 2015. P. 211–235 (in Russia).
- Chalov R.S., Lij Shuguan, Alexeevskiy N.I.* Stok nanosov i ruslovye processy na bolschikh rekah Rossii i Kitaya [Sediment runoff and channel processes on the great rivers of Russia and China]. M.: Izd-vo MGU, 2000. 216 p. (In Russian)
- Chalov R.S., Zawadskiy A.S., Ruleva S.N., Kirik O.M., Prokopen V.P., Androssov I.M., Saharov A.I.* Morfologiya, deformacii, vremennyye izmeneniya rusla r. Leny i ih vliyaniye na hozyaistvennyy infrastrukturu v rajone g. Yakutsk [Morphology, deformations and temporary modifications of the Lena River channel and their influence on the Yakutsk economic infrastructure] // *Geomorfologiya*. 2016. № 3. P. 22–35. (In Russian)

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, master's student; e-mail: kate.kuzmina.m@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor; N.I.Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography; e-mail: rschalov@mail.ru

- Chalov S.R.* Hidrologicheskie funktsii razvetvlenii rusel [Hydrological function of braided channels]. M.: Geogr. fak. MGU, 2009. 240 p. (In Russian).
- Eroziionno-ruslovye sistemy [Erosion fluvial systems]. M.: INFRA-M, 2017. 702 p. (In Russian)
- Karasev I.F.* Ruslovye processy pri perebroske stoka [Channel processes during water transfer]. L.: Gidrometeoizdat, 1975. 288 p. (In Russian)
- Knighton A.D.* Fluvial forms and processes: a new perspective. London: Arnold, 1998. 398 p.
- Komar P.D.* Shaper of streamlined island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum-drag form // Geology. 1983. № 11. P. 651–654.
- Kondratiev N.E., Popov I.V., Snishenko B.F.* Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo processa [Basics of the hydromorphological theory of channel processes]. L.: Gidrometeoizdat, 272 p. (In Russian)
- Lvovskaya E.A.* Retrospektivnyi analiz, sovremennoe sostoyanie i ocenka vozmozhnykh izmeneniy ruslovykh processov na bolshih rekah severa ETR [Retrospective analysis, present-day state and assessment of possible changes of channel processes on large rivers of the North of the European territory of Russia]. Avtoref. dis. ... kand. geogr. n. M.: MGU, 2016. 30 p. (In Russian)
- Makkaveev N.I.* Ruslo reki i erosiya v ego basseine [River channel and erosion in its basin]. M.: Jzd-wo AN SSSR, 1955. 247 p. (In Russian)
- Mill A.D.* A review of the braided-river depositional environment // Earth Sci. Rev. 1977. Vol. 13. P. 1–62.
- Popov I.V.* Deformacii rechnyh rusel i gidrotehnicheskoe stroitelstvo [Deformations of the riverbeds and hydrotechnical construction]. L.: Gidrometeoizdat, 1965. 328 p. (In Russian)
- Rossinskiy K.I., Kuzmin I.A.* Nekotorye voprosy prikladnoy teorii formirovaniya rechnyh rusel [Some issues of the applied theory of river channel formation] // Problemy Regulirovaniya rechnogo stoka. M.-L.: Izd-wo AH SSSR, 1947. P. 88–129. (In Russian)
- Rossinsky K.I., Kuzmin I.A.* Zakonomernosti formirovaniya rechnyh rusel [Patterns of river channel formation] // Ruslovye processy. M.: Izd-wo AH SSSR, 1958. P. 5–14. (In Russian)
- Tarbeeva A.M.* Formirovanie i evolyciya ostrovov v rusle Obi [Island formation and evolution in the Ob River channel] // Eroziionnye, ruslovye processy i problmy gidroekologii. M.: Izd-wo MGU, 2004. P. 202–208. (In Russian)
- Velikanov M.A.* Ruslovoi process [Channel process]. M.: Gosfizmatizdat, 1958. 395 p. (In Russian)
- Vodnye puti bassejna Leny [Waterways of the Lena River basin]. M.: MIKIS, 1995. 600 p. (In Russian)

Received 12.07.2019

Revised 25.08.2019

Accepted 12.09.2019