

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

ГИДРОЛОГИЯ

УДК 551.435.1

DOI: 10.17072/2079-7877-2020-4-110-125

ФОРМИРОВАНИЕ, ЭВОЛЮЦИЯ И ВРЕМЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО-РУКАВНЫХ РАЗВЕТВЛЕНИЙ РЕЧНЫХ РУСЕЛ**Роман Сергеевич Чалов**Scopus ID: 7003283104, AuthorID: 58839, ResearcherID: L-8754-2015, IstinaresearcherID (IRID): 429939
e-mail: rschalov@mail.ru*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва***Константин Михайлович Беркович**Scopus ID: 6601927306, AuthorID: 62590, ResearcherID: M-3158-2015,
IstinaresearcherID (IRID): 449408

e-mail: berkovich@yandex.ru

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва***Светлана Николаевна Рулёва**

AuthorID: 62586, IstinaresearcherID (IRID): 1082281

e-mail: mnks1@yandex.ru

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва***Александр Сергеевич Завадский**РИНЦ AuthorID: 62589, ResearcherID: M-3089-2015, IstinaresearcherID (IRID): 1078849
e-mail: az200611@rambler.ru*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва***Павел Петрович Головлёв**

РИНЦ AuthorID: 828422, ResearcherID: L-9838-2015, IstinaresearcherID (IRID): 578059

e-mail: pavel_golovlev@list.ru

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва***Георгий Борисович Голубцов**

IstinaresearcherID (IRID): 11246613

e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

В статье даются разносторонняя оценка условий формирования, гидролого-морфологическая характеристика, рассматриваются особенности режима деформаций и трансформации самых сложных и разнообразных по морфодинамике параллельно-рукавных русловых разветвлений. Общим условием их развития является большая ширина русел (соответственно, максимальное значение критерия квазиоднородности потока И.Ф. Карасев). В таких руслах поток разделяется на две ветви течения, между которыми посередине русла аккумулируются наносы и происходит образование осередков и островов. Наряду с этим параллельно-рукавные русла представляют собой результат трансформации русел других типов (немеандрирующих) вследствие изменения определяющих факторов: увеличения водности и стока наносов, зарастаемости прирусловых отмелей, в результате чего осередки превращаются в острова, вызывая техногенные воздействия на реки. На песчаных широкопойменных реках параллельно-рукавные разветвления характерны для слабо- и неустойчивых русел при отсутствии направляющего влияния на поток коренных берегов и при прохождении руслоформирующего расхода воды в условиях затопленной поймы. Острова в них преимущественно элементарные и малые. На реках с врезанным руслом они либо аналогичны по морфологии и режиму деформаций широкопойменным неустойчивым руслам, отличаясь от них большими островами, имеющими удлинённую форму, либо формируют скульптурные острова и очень устойчивы. При любых разновидностях параллельно-рукавные разветвления по режиму деформаций очень индивидуальны и для них не существует универсальных схем регулирования.

Ключевые слова: русловые процессы, русло, параллельно-рукавные и сопряжённые разветвления, переформирования, рукава, острова, деформации.



Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

FORMATION AND EVOLUTION OF PARALLEL-BRAIDED CHANNEL REACHES**Roman S. Chalov**

Scopus ID: 7003283104, РИНЦ AuthorID: 58839, ResearcherID: L-8754-2015,

IstinaResearcherID (IRID): 429939

e-mail: rschalov@mail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Konstantin M. Berkovitch

Scopus ID: 6601927306, РИНЦ AuthorID: 62590, ResearcherID: M-3158-2015,

IstinaResearcherID (IRID): 449408

e-mail: berkovitch@yandex.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Svetlana N. Ruleva

РИНЦ AuthorID: 62586, IstinaResearcherID (IRID): 1082281

e-mail: mnksl@yandex.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Aleksandr S. Zavadskiy

РИНЦ AuthorID: 62589, ResearcherID: M-3089-2015, IstinaResearcherID (IRID): 1078849

e-mail: az200611@rambler.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Pavel P. Golovlev

РИНЦ AuthorID: 828422, ResearcherID: L-9838-2015, IstinaResearcherID (IRID): 578059

e-mail: pavel_golovlev@list.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Georgiy B. Golubcov

IstinaResearcherID (IRID): 11246613

e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow

The paper provides a comprehensive assessment of channel formation conditions and hydrological-morphological characteristics, and also considers the features of the channel changes regime of parallel-braided channel reaches, being the most complex and diverse in morphodynamics. The general condition for their development is a large width of channels (respectively, the maximum value of the criterion of the flow quasi-uniformity suggested by I.F. Karasev). In such channels, the flow is divided into two branches, between which, in the middle of the channel, occurs accumulation of sediments and formation of mid-channel bars and islands. At the same time, parallel-braided channels are the result of other channel types (non-meandering) development due to certain changes in determining factors: increased water content and sediment runoff, overgrowth of channel bars, as a result of which mid-channel bars turn into islands, and anthropogenic impacts on rivers. On sandy floodplain rivers, parallel-braided reaches are typical for low-stable and unstable channels in the absence of the directed influence from bedrock banks on the flow and when effective water discharge passes over the floodplain edge. The islands in such braided reaches are mostly small. On rivers with incised channels, they are either similar in morphology and the channel changes regime to wide floodplain unstable channels, differing from the latter in large islands with elongated shape, or form sculptural islands and are very stable. In any variety, parallel-braided channels are very individual in their channel changes regime and there are no universal channel control schemes for them.

Key words: channel processes, river channel, parallel-braided and conjugated braided reaches, channel branches, channel changes, islands, channel development.

Введение

Параллельно-рукавные разветвления (далее – ПРР) – одна из наиболее сложных по морфологии и режиму деформаций разновидностей русел больших и крупнейших рек. Отличительной их особенностью является разделение руслового потока островами на две соизмеримые по водности ветви течения, создающие двухпотокую систему в едином русле. Это определяет серьёзные затруднения при эксплуатации рек как водных путей сообщения, прокладки коммуникаций, работы водозаборов и т.д.

Само словосочетание «параллельно-рукавные разветвления» появилось сравнительно недавно [17], хотя описания двухпотковых систем в едином русле уже встречались [16], но не увязывались с морфологией разветвлений и русловыми преформированиями. Характерно, что в обоих случаях [16; 17]

*Гидрология**Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.*

эти представления основывались на исследованиях верхней Оби непосредственно ниже слияния рек Бии и Катунь. Несколько позднее [24; 28] ПРР были введены как самостоятельная ячейка в морфодинамическую классификацию речных русел, дана их гидролого-морфологическая характеристика, получены обосновывающие этот тип русла критерии [25]. Тогда же и в последующие годы в ряде публикаций были рассмотрены ПРР, их морфология и динамика на конкретных реках (Северной Двине, Лене, Мезени, Амуре, Печоре), в том числе там, где раньше эти разветвления трактовались, с рядом оговорок, как сложносопряженные, односторонние или разбросанные. Последнее название уже само отражало отсутствие представлений о морфологии, специфике и закономерностях развития русла, не отвечающих выделяемым в классификации. Это связано, по существу, с тем, что до 2-й половины XX в. русловой режим больших и тем более крупнейших рек с разветвленным руслом оставался практически неизученным. Несовременными были и имеющиеся в то время классификации (типизации русловых процессов), в первую очередь, для русел рек, разветвленных на рукава. Лишь с появлением и развитием новейших технологий исследований – измерений, позволяющих получить детальные планы русел, сведения о рассредоточении стока и скоростных полях потока, особенно в узлах разветвления и слияния рукавов, в том числе в разные фазы водного режима, распределения стока наносов по рукавам, и применения данных дистанционного зондирования Земли, появилась возможность разработать подробную и объективную морфодинамическую классификацию разветвленных русел, уточнить ее по мере накопления материалов исследований, выделить и дать гидролого-морфологическое обоснование параллельно-рукавным (а также разбросанным, пойменно-русловым и др.) руслам [29].

Задача настоящей статьи – обобщить имеющиеся сведения о параллельно-рукавных разветвлениях, обосновать подходы к их типизации по условиям формирования, морфологии и режиму деформаций, выявить факторы и причины трансформации в них разветвлений других типов (сопряженных, односторонних и пр.) и переформирования самих ПРР.

Исходные материалы и методы исследования

Объектами исследований, результаты которых положены в основу статьи, явились многие большие и крупнейшие реки России, имеющие разветвленные на рукава русла. На Оби, Лене и Северной Двине исследования выполнялись с неоднократной повторностью в разные годы и в разные фазы водного режима по полной программе русловых изысканий; на этих реках, а также на Мезени, Печоре, Амуре, где широко распространены ПРР, применение современных технологий (доплеровских измерителей течений, турбидиметров и др.) позволило выявить закономерности рассредоточения стока воды и наносов, установить основные гидролого-морфологические особенности русел, состав и распределение руслообразующих наносов, условия затопления поймы, распространение и темпы размыва берегов, изменения уклонов. Русловой анализ выполнялся на основе сопоставления разновременных космических снимков, карт русел (лоцманских карт) разных лет издания и планов русла, получаемых изыскательскими партиями районов водных путей. Натурные исследования и русловой анализ обеспечили необходимыми данными характеристики переформирования и трансформаций разветвлений в «увязке» с многолетними колебаниями и изменениями водности рек, в том числе вследствие происходящих глобальных изменений климата и природной среды.

Условия формирования и общая характеристика ПРР

ПРР обычно свойственны слабо- и неустойчивым как широкопойменным (Лена, Обь, Северная Двина, Печора, средний Амур), так и врезанным (Северная Двина, Мезень) руслам больших и крупнейших рек, но при определенных условиях они встречаются в очень устойчивых галечно-валунных врезанных руслах со скальным основанием и скульптурными высокоцокольными незатопляемыми островами (Ангара) (рис.1).

Условия их формирования, морфологические и динамические характеристики определяются: 1) большой шириной русла в бровках поймы или между коренными берегами, обуславливающими распластанность потока и разделение его на две самостоятельные (автономные) ветви течения; 2) соизмеримостью по водности (распределению расходов воды) основных рукавов, соответствующих ветвям течения, особенно в многоводную фазу водного режима (половодье, высокий паводок); 3) существованием границы раздела между обеими ветвями потока (ее гидродинамическое обоснование дал Г.П. Кумсиашвили [13]) и возникновением вдоль нее области относительно пониженных скоростей

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

течения и, как следствие, аккумуляции наносов, образования осередков, которые, обсыхая в межень, со временем покрываются растительностью и превращаются в острова; 4) наличием протоков или межостровных акваторий, расчленяющих цепочку островов посередине реки на отдельные звенья – по ним осуществляется частичный обмен (перемещение) водных масс между обоими рукавами; 5) вторичной разветвленностью основных рукавов элементарными и малыми островами или извилистостью в них динамической оси потока, обуславливающими сближение стрежневых зон потоков обоих рукавов в межостровных акваториях; 6) сравнительной мелководностью основных рукавов – лишь в отдельных плесовых лощинах глубины в межень достигают 10–15 м, составляя на перекатах 90 см на Мезени, 130 см на верхней Оби, 150 см на Северной Двине, 260–280 см на Лене.

Длина участков рек с ПРР и количество звеньев, их составляющих (островов или осередков) – от первых десятков километров и двух–трех звеньев до первых сотен километров и 10–15 звеньев. На верхней Оби, средней и нижней Лене Северной Двине, среднем Амуре они образуют морфологически однородные участки, на Печоре, средней и нижней Оби встречаются на отдельных, сравнительно коротких отрезках рек среди разветвлений других типов, не определяя их морфологический облик. На нижней Лене (от устья Вилюя до с. Жиганска) ПРР занимают 75% длины участка (360 км) при максимальной (суммарной, вместе с островами) ширине русла 28 км. По-видимому, это – самый протяженный морфологически однородный участок среди рек России с таким типом русла [Водные пути ..., 1995; Чалов, Кирик, 2015]. В среднем течении (г. Покровск – устье Алдана) таковыми являются «разбой» (местное название сложных разветвлений) Рассолода, Якутский и Приалданские протяженностью 28, 45 и 90 км при ширине русла около 5 км. Выше г. Покровска параллельно-рукавным является врезанное русло на участке длиной более 160 км.

На верхней Оби [21; 22] длина такого русла – около 60 км (максимальная ширина реки – 3 км). Располагаясь непосредственно ниже слияния Бии и Катунь, двухпотоковая система в нем подчеркивается 10-кратной разницей в мутности воды в левых и правых рукавах, в которых концентрируются, не смешиваясь, потоки Катунь (в межень мутность до 300 г/м³) и Бии (30 г/м³).

На Северной Двине между устьями Вычегды и Ваги (300 км) доля ПРР, охватывающих как широкопойменное, так и врезанное русло, – 32%, начинаясь ниже Толоконной горы – размываемого уступа песчаной террасы, при максимальной ширине реки около 2 км, между устьями Ваги и Пинегы – 4%, занимая часть короткого широкопойменного участка [31]. На Мезени в нижнем течении (ниже слияния с Вашкой) [31] параллельно-рукавное русло – врезанное, занимает почти все днище долины (ширина – 0,8-2 км), составляя 46% длины участка (60% длины всех разветвлений). Это отличает их от северодвинских, где врезанное русло имеет почти повсеместно узкую береговую пойму, являясь выше устья Ваги по существу адаптированным.

На среднем Амуре [9] параллельно-рукавное русло занимает 13% протяженности реки на участках длиной 51 и 78 км выше и ниже пересечения рекой горного массива Малый Хинган. На Ангаре [34] врезанное, с островами, поднимающимися над рекой на 40–50 м, параллельно-рукавное русло (его ширина от 3,5 почти до 8 км) в настоящее время затоплено водохранилищами. Возможно, что его аналогом можно считать скульптурные разветвления на Сухоне, образованные цепочкой высококощольных островов Дедов и Бабий [18].

Для оценки условий формирования разветвленного русла разного морфодинамического типа используется критерий квазиоднородности потока, предложенный И.Ф. Карасёвым [11]

$$\theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\lambda},$$

где b_p – ширина русла, h – его глубина, $\lambda = \frac{c^2}{2g}$ – коэффициент гидравлических сопротивлений, C – коэффициент Шези, g – ускорение силы тяжести. Его расчеты для верхней и средней Оби [10] и широкопойменного русла средней и нижней Лены [12] показали, что ПРР отличаются наибольшими его значениями: на Оби $\theta = 72$, на Лене $\theta = 95$. Для сравнения: у односторонних разветвлений, соответственно, 56 и 58, одиночных – 53 и 58, сопряженных (на Лене) – 64.

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

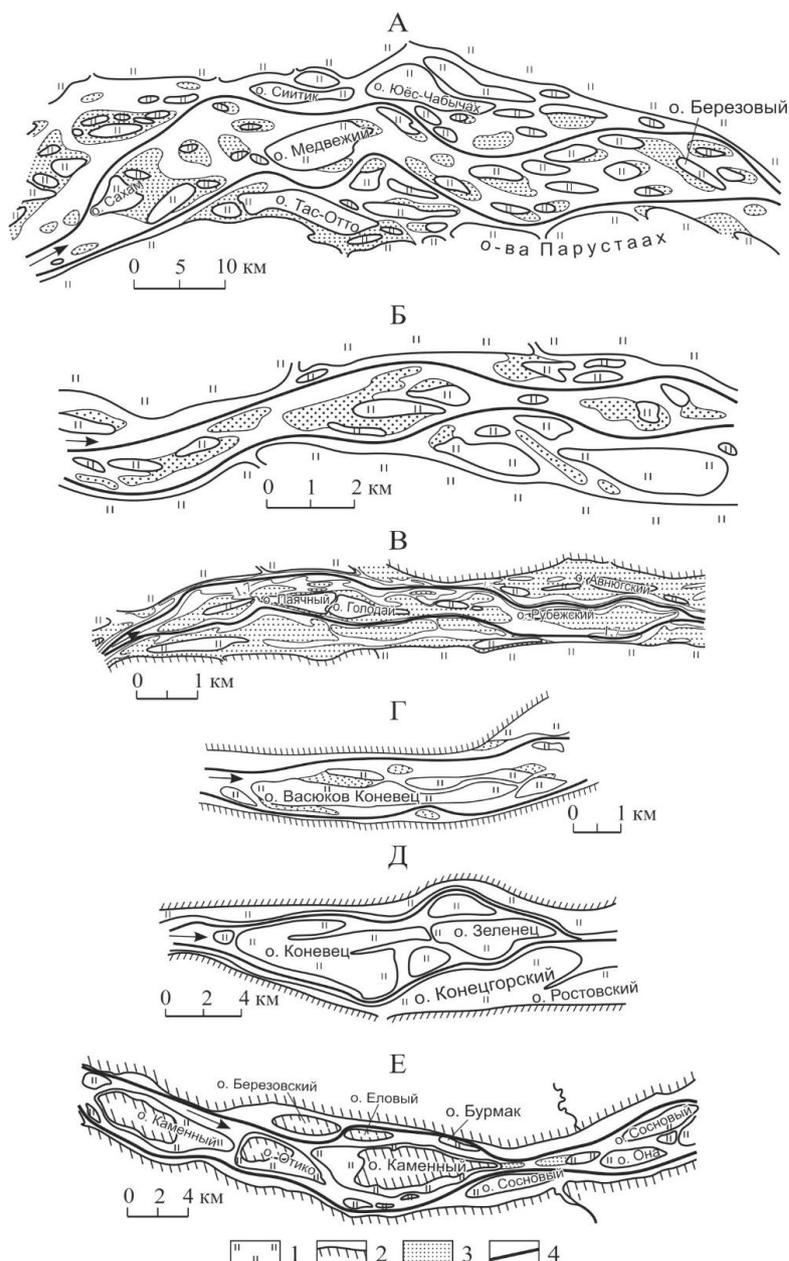


Рис. 1. Примеры пойменно-русловых разветвлений на больших и крупнейших реках России с широкопойменным (А – р. Лена, нижнее течение; Б – р. Обь, ниже слияния Бии и Катун; В – Северная Двина, Паячное-Ягрышское), врезанным и адаптированным руслом (Г – р. Мезень, нижнее течение; Д – Северная Двина, Конецгорское, выше устья Ваги; Е – Ангара, ниже Усть-Илимского гидроузла); 1 – пойма, 2 – коренные берега, 3 – прирусловые отмели, 4 – положения стрежневых зон потока в основных ветвях течения

Fig. 1. Examples of floodplain-channel branching on large and largest rivers of Russia with a wide-floodplain channel (A – Lena River, lower course; Б – Ob River, below the confluence of the Biya and Katun; В – Northern Dvina River, Payachnoe-Yagryshskoe), incised and adapted channel (Г – Mezen River, lower course; Д – Northern Dvina River, Konetsgorskoe, above the mouth of the Vaga; Е – Angara River, below the Ust-Ilimsk hydroelectric complex) 1 – floodplain, 2 – bedrock banks, 3 – channel bars, 4 – the position of the core flow zones in the main flow branches

Особенностью островов, образующих ПРР и располагающихся цепочкой посередине реки, является их удлиненная форма L_o/B_o (L_o – длина, B_o – ширина острова). Известно, что оптимальной является величина $L_o/B_o = 3\div 4$ [23, 26, 36, 37], обеспечивающая минимум гидравлических сопротивлений, оказываемых островом. В ПРР обычно $L_o/B_o > 4$, составляя на Северной Двине 5,7, Мезени – 5,8, Печоре – 8,1 [14], верхней Оби – 4,2 [7], средней Лене – 4,8–4,9, нижней Оби – 6–10, увеличиваясь по мере повышения устойчивости русла. Исключения составляют элементарные и малые острова в рукавах, образующие разветвления второго порядка и имеющие оптимальное соотношение, а также большие

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

острова (объединения элементарных и малых), находящиеся в периферийных частях русла, приобретающие изометрическую форму ($L_o/B_o < 2,5$) и не определяющие из-за своего расположения морфодинамику русла.

Сравнительный анализ островов в неустойчивых руслах верхней Оби и средней Лены, где абсолютно преобладают ПРР, показал, что морфометрические параметры островов, образующих разветвления, – соотношение L_o/B_o (рис. 2, А) и их количество – степень разветвленности русла n_o/x (n_o – количество островов на единицу длины русла x) (рис. 2,Б) зависят от его устойчивости K_c , но для n_o/x – с учетом поправочного коэффициента на размер реки $\alpha = Q_{Лена}/Q_{Обь} = 6,15$ (из-за его масштабного искажения K_c) [8]. На верхней Оби и на средней Лене ПРР формируются элементарные и малые острова удлиненной формы из-за аккумуляции наносов посередине русла, развития кос в ухвостьях и их зарастания. При этом удлинение кос происходит от 50–60 до 150–200 м/год, тогда как оголовки островов размываются до 20–25 м/год максимум.

Во врезанном скальном русле Ангары острова со скальным основанием, «обросшие» с оголовка и ухвостья поймой, имеют оптимальное соотношение $L_o/B_o = 3,1 \div 3,4$, причем оно сохраняется у тех частей островов, которые соответствуют скальным выступам. Ниже по течению, где распространены только аккумулятивные острова или скальное ядро очень невелико, форма их становится удлиненной – $L_o/B_o > 4$. Вместе с тем, несмотря на высокую устойчивость русла, разветвленность достаточно велика – при ширине русла до 6 км и ширине самых крупных островов 3,4 км и длине 12–15 км общее их количество 40 на участке длиной 100 км ниже Усть-Илимской ГЭС.

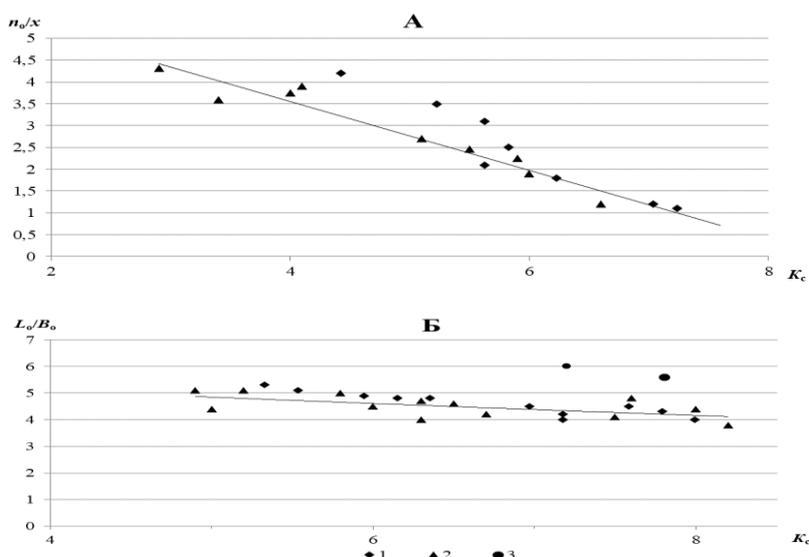


Рис. 2. Зависимость степени разветвленности русла n_o/x от его устойчивости (K_c) в параллельно-рукавных разветвлениях с учетом поправочного коэффициента α на размер рек (А) и зависимость соотношения длины и ширины островов (L_o/B_o) от показателя устойчивости русла (K_c) в параллельно-рукавных разветвлениях (Б): 1 – верхняя Обь, αK_c ; 2 – средняя Лена, K_c ; 3 – острова удлиненной формы при аналогичном морфодинамическом типе русла (исключительно на средней Лене)
 Fig. 2. А – dependence of the degree of the channel branching n_o/x on its stability (K_c) in parallel-braided reaches, taking into account the correction coefficient α for the size of rivers; Б – dependence of the ratio of the length and width of islands (L_o/B_o) on the channel stability index (K_c) in the parallel-braided reaches. 1 – Upper Ob, αK_c ; 2 – Middle Lena, K_c ; 3 – islands of an elongated shape with a similar morphodynamic type of channel (exclusively on the Middle Lena)

Типизация параллельно-рукавных разветвлений

При сравнительно редкой встречаемости ПРР разветвлений (выше были перечислены практически все зафиксированные на реках России) многообразии условий, в которых они формируются, огромный диапазон размеров (длины) соответствующих им морфологически однородных участков, различия в водности рек (верхняя Обь и средняя Лена – в 6,15 раза, Мезень и верхняя Обь – в 1,85 раза, нижняя и средняя Лена – почти в 2 раза) и т.д. определяют преимущественно индивидуальный подход к их гидролого-морфологической и морфодинамической характеристике. В то же время приведённые единые зависимости и соотношения для Оби и Лены – двух рек, различающихся по водности, свидетельствуют о возможности их типизации.

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

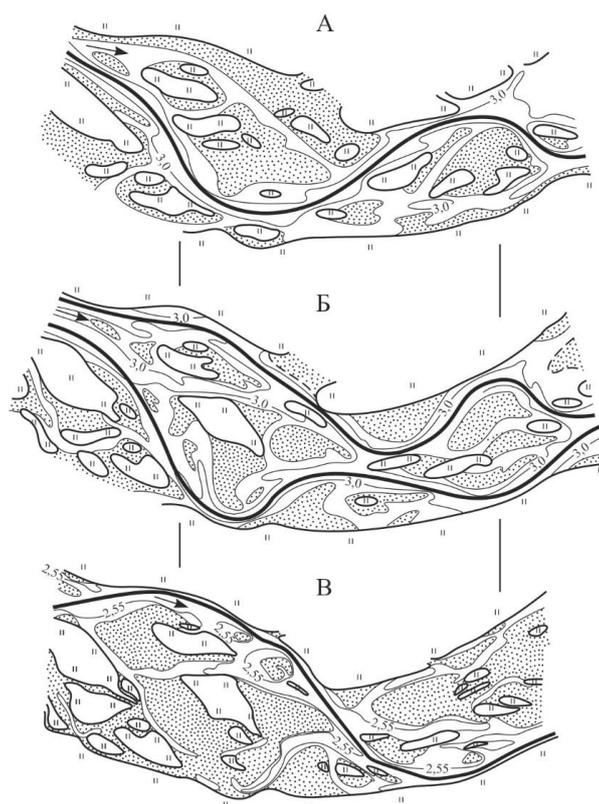


Рис. 3. Периодическая трансформация разветвленного русла средней Лены: сопряженное → параллельно-рукавное → сопряженное в зависимости от водности лет: А, В – маловодные периоды (60–70-е XX в. и 2010-е гг.); Б – многоводные периоды (конец XX – начало XXI вв.) [26, 27]. Условные обозначения – на рис. 1

Fig. 3. Periodic transformation of the branched channel of the Middle Lena River: conjugate → parallel-braided → conjugate depending on the water content of the years: A, B – dry periods (1960–70s and 2010s); Б – high-water periods (late 20th – early 21st centuries) [26, 27]. Legend – in Fig. 1

Первая разновидность ПРР, с которой началось их изучение, свойственна рекам с широкопойменным, слабо- и неустойчивым руслом, с многочисленными преимущественно элементарными и малыми островами, обилием обсыхающих в межень прирусловых отмелей. Таковы разветвления на верхней Оби ниже слияния Бии и Катуня, средней (г. Покровск – устье Алдана) и нижней (устье Вилюя – с. Жиганск) Лены, Северной Двины (Паячный–Ягрышский участок). Большинство из них достаточно протяжённые морфологически однородные участки, иногда лишь прерывающиеся короткими «вставками» (как на средней Лене «разбой» Рассолода и Якутский) с другими типами русла. На Лене и Северной Двине ширина поймы $B_{п}$ невелика (не более $3b_p$). На Оби она намного больше, но на Северной Двине руслоформирующим является расход воды $Q_{ф}$ при регулярно затопляемой во время половодья пойме, а на Оби – в пойменных бровках, когда затоплена лишь низкая и узкая ($\sim 2b_p$) ступень поймы. К ним же относятся сходные по морфологии, рассредоточению стока и другим показателям участки русел, в которых в зависимости от водности многолетних периодов происходит периодическая трансформация ПРР в сопряженные и наоборот. На средней Лене выше устья Алдана в многоводные годы отчетливо выражена двухпотоковая система с примерно одинаковыми водностью и развитостью левых и правых рукавов; в маловодные периоды, особенно продолжительные, большая часть расхода воды сосредотачивается последовательно в смежных звеньях в левом (или правом) – правом (или левом) и т.д. рукавах, образуя своеобразные излучины среди островов, и весь участок превращается в систему сопряженных разветвлений (рис. 3).

Вторую разновидность ПРР образуют сравнительно короткие морфологически однородные участки широкопойменного, относительно устойчивого русла, образованные обычно большими островами (они состоят из нескольких объединившихся элементарных или малых, существенно разросшихся вследствие причленения к ним заросших побочной и кос). Ширина поймы $B_{п} > 4b_p$, $Q_{ф}$ проходит при ее полном затоплении, но русло располагается вдоль или вблизи коренного берега реки, имеющего прямолинейную выровненную конфигурацию в плане и не оказывающего на поток

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

направляющего (отклоняющего) воздействия. Наличие ведущего коренного берега у реки при любом типе русла оказывает на него стабилизирующее воздействие вследствие формирования при затопленной пойме поперечного уклона и определяемой им гидравлической структуры потока [28]. Большая ширина русла и значения критерия И.Ф. Карасёва Θ обуславливают возникновение двухпоточковой системы, аккумуляцию наносов и образование островов посередине русла. Если ширина русла недостаточна, то русло будет прямолинейным неразветвленным, либо, ниже выступов ведущего берега, с одиночными разветвлениями. Таковы два участка на средней (в районе с. Александровского) Оби и нижней (между устьем Иртыша и с. Перегребным), в нижнем течении Печоры и на среднем Амуре.

При очень большой ширине поймы и прохождении Q_f при ее затоплении (широтный участок средней и нижняя Обь, нижний Амур) там, где река «отрывается» от коренного берега, параллельно-рукавное русло не формируется, уступая место разветвлениям более высокого структурного уровня [35] – раздвоенному руслу (на средней Оби это – ответвления Юганской Оби–Салманской–Неулевой проток, на нижней Оби – разделение ее на Малую и Горную–Большую Обь; на нижнем Амуре – ответвления проток Эмрон–Кафа и разделение его на Старый Амур и протоку Мариинскую) или пойменно-русловым разветвлениям (средняя Обь между устьями Томи и Ваха).

Среди ПРР *врезанных русел выделяется две их разновидности*, отличающиеся различными условиями формирования; *первая* – у слабо- или неустойчивых песчаных русел рек равнинных территорий, сложенных моренными суглинками или пермо-триасовыми мергелями, песчаниками, аргиллитами: Северная Двина выше устья Ваги, Мезень в нижнем течении. По морфологическому облику и режиму переформирования они напоминают широкопойменные (первая категория), но характеризуются меньшей разветвленностью (количеством островов) и сравнительно малой временной изменчивостью распределения потока по рукавам. На Мезени своеобразие ПРР заключается в продольном чередовании по преобладающей водности левых и правых рукавов, что обусловлено направляющим воздействием неровностей коренных берегов и поперечными перемещениями водных масс между островами посередине русла.

На Северной Двине выше устья Ваги участки с параллельно-рукавным руслом различны по морфологии и условиям развития. На верхнем из них (с. Ягрыш – с. Верх. Тойма) река разделяется узкими, вытянутыми в длину ($L_0/B_0 \sim 5-6$) островами на два рукава, из которых более многоводным (и судоходным) является левый. В Слудском–Липовецком разветвлении преобладают элементарные острова среди зарастающих обширных прирусловых отмелей, отличающихся большой подвижностью (скорость смещения – до 159–200 м/год) и постоянными переформированиями. Концецгорское разветвление образовано большими островами и, в зависимости от водности лет, попеременным преобладанием стока (на 15–20%) то в левом, то в правом рукавах, вторичной их разветвленностью и активными деформациями.

Вторая разновидность врезанных ПРР встречается на галечно-валунных реках, протекающих в горном обрамлении (средняя Лена выше г. Покровска, Ангара на меридиональном участке, ныне затопленном водохранилищами, отдельные участки Енисея). Занимая по длине рек участки очень большой протяженности (более 100 км), они отличаются стабильностью (абсолютно устойчивое русло) и постоянством распределения расходов воды с некоторым преобладанием по водности одного из них. На Ангаре острова в основном скульптурные, и лишь в нижней части участка – аккумулятивные [34]. На Лене некоторые острова имеют протяженность десятки километров при ширине до 7 км и больше (у самого крупного – $L_0/B_0 = 5$) при общей длине морфологически однородного участка свыше 160 км, являясь при этом аккумулятивными, песчаными. Правые рукава, галечно-валунные, проходят вдоль скальных вертикальных обрывов Приленского плато («Ленские столбы»), их водность меняется по длине от 49 до 87%. В них часты выходы скал, образующие в межень вместе с галечно-валунными перекатами водосливы, ограничивающие глубину и затрудняющие судоходство. Левые рукава, располагаясь вдоль Центрально-Якутской низменности, песчаные, но мощность песчаных отложений, образующих перекаты и отмели, незначительна, и песчаные гряды перемещаются по галечной отмостке, выстилающей дно плесовых лощин [4].

Таким образом, во врезанных руслах ПРР разных рек (при их редкой встречаемости) свойственны свои особенности и морфологии и по рассредоточению стока, и режиму переформирования. Это отличает их от более однородных в этом отношении широкопойменных русел, которые тем не менее тоже достаточно индивидуальны, и поэтому при решении практических задач (водохозяйственных, прокладке коммуникаций, эксплуатации в качестве водного пути) к ПРР всегда должен быть особый подход.

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

Переформирования и трансформация ПРР

Ретроспективный русловой анализ за XX–начало XXI в. и регулярные, с неоднократной повторностью натурные исследования с 50–60 гг. (на Северной Двине, Оби, Лене) позволили выявить историю формирования, эволюции природной и природно-антропогенной трансформации ПРР, условия и причины преобразования в них разветвлений других типов. Лишь на реках с врезанным галечно-валунным устойчивым руслом каких-либо существенных изменений в морфологии, связанных с естественными (природными) факторами, не произошло. На крупнейших реках с неустойчивым руслом, отмечаемым увеличением среднегодового стока воды (на нижней Лене – на 6,8 % [15]), не привело к заметным изменениям в их гидроморфологии из-за относительной незначительности этого увеличения и самой высокой степени разветвленности [27]. В ряде случаев (на средней Лене) направленные трансформации вуалируются периодической трансформацией разветвлений, обусловленных многолетними колебаниями стока.

На средней Лене в XX в. произошла смена сопряженных разветвлений от г. Покровска до Кангаласского камня на ПРР, образовавшая два морфологически однородных участка – «разбой» Рассолода и Якутский [30], причем этот процесс, начавшись еще в 1930–1940-е гг., завершился только в 90-е гг., а в «разбое» Рассолода – еще не до конца. Это видно при сравнении скоростных полей в обоих «разбоях»: в «разбое «Рассолода» в межень правая ветвь потока в нижней его части слабо выражена, прерываясь массивным побочнем (рис. 4).

По-видимому, такая растянутость трансформации и развития параллельно рукавного разветвления обусловлена мерзлотными условиями русла. Переместившись в правые широкие (до 3 км) рукава бывших звеньев сопряженных разветвлений, поток «столкнулся» с прирусловыми отмелями и мелководьями, сцементированными мерзлотой, и для их оттаивания и последующего размыва потребовалось время. Этому способствовали повышение, наряду с водностью, теплового стока [15] и деградация мерзлоты в русле [38]. Во вновь сформировавшееся ПРР в Якутском «разбое» вошел большой о. Пономарёв, составлявший ранее звено сопряженных разветвлений и по размерам не свойственный новому типу русла. В «разбое» Рассолода произошло включение в параллельно-рукавное разветвление одного из верхних, образовывавших ранее звено в сопряженной системе, также большого о. Ляля, но здесь это явилось следствием трансгрессивного смещения всей группы островов бывшего звена и превращения межостровной протоки в рукав. Такое же смещение островов, ранее составлявших звено сопряженной системы, наблюдается в Якутском «разбое». Здесь продукты размыва оголовков островов, составляющих сейчас проточно-островную пойму, поступают к ее низовьям, формируя отмель, надвигающуюся на заход в левый рукав у о. Пономарева (Адамовскую протоку) и направляющую поток на его оголовок, который размывается до 20–25 м в год (отмель смещается со скоростью 100–150 м/год). Со временем это может вызвать обмеление Адамовской протоки, соответственно, и перестройку нижней части ПРР в Якутском «разбое»: основной сток перейдет в правый широкий рукав – Буорьларскую протоку, в котором можно ожидать отторжения правобережной отмели, частично зарастающей, по побочным протокам и разделению течения в ней на две ветви.

Но если на Лене ПРР сформировались в бывших рукавах сопряженной системы (вторые рукава превратились в пойменные протоки), то на Печоре произошло преобразование одного типа русла в другой [27; 32], также на фоне общего повышения водности реки [6]. С этим же связана трансформация сопряженных и чередующихся односторонних разветвлений на средней Лене между Кангаласским камнем и устьем Алдана, где ещё в 1970-гг. четко фиксировались сопряженные разветвления [2; 19], но, по данным последних исследований (2019 г.), большая часть этого участка представлена ПРР с почти равным распределением расходов воды в межень по обеим ветвям течения.

Во второй половине XX в. сформировалось параллельно-рукавное русло на участке нижней Оби длиной 20 км на бывших осередковых разветвлениях (острова Низямский и безымянный) (рис. 5, А) и на Северной Двине на прямолинейном участке русла с побочными, расположенными в шахматном порядке и развитыми побочными протоками (Слудское–Липовецкое длиной около 30 км (рис. 5, Б). Причина – активное зарастание осередков и побочней, которое началось в это время, было отмечено на реках России, обусловленное увеличением длительности их обсыхания в межень [27]. По этой же причине на многих реках произошло образование новых элементарных островов, что способствовало увеличению степени разветвленности и появлению новых островов.

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

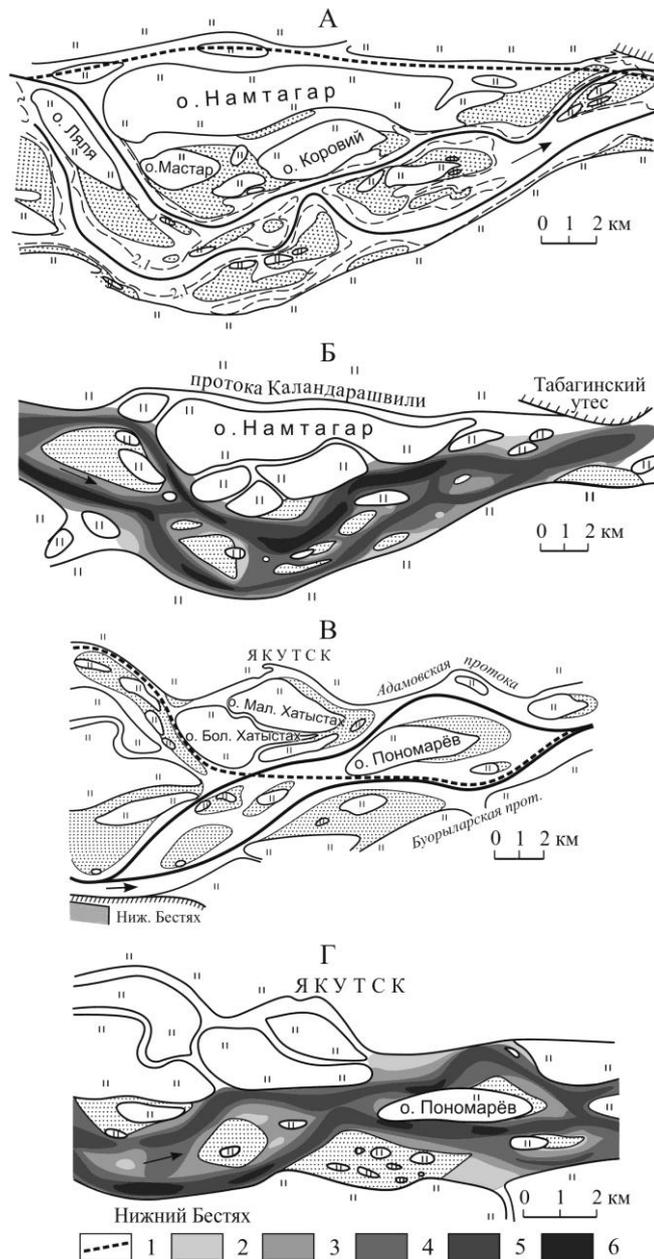


Рис. 4. Планы русла (А, В) и скоростных полей потока (Б, Г) в «разбоях» Рассолода (А, Б) и Якутском (В, Г) на средней Лене и положение главного течения реки в начале XX в. (1) в звеньях бывших сопряженных разветвлений. Скорости течения: 2 – 0,1–0,4; 3 – 0,4–0,7; 4 – 0,7–1,0; 5 – 1,0–1,3; 6 – 1,3–1,6.

(остальные обозначения – на рис. 1)

Fig. 4. Plans of the channel (A, B) and flow velocity fields (B, G) in the branchings of Rassoloda (A, B) and Yakutsk (B, G) on the Middle Lena River, and the position of the main course of the river at the beginning of the 20th century (1) in the links of former conjugate branchings. Flow rates: 2 – 0.1–0.4; 3 – 0.4–0.7; 4 – 0.7–1.0; 5 – 1.0–1.3; 6 – 1.3–1.6. (The rest of the designations are shown in Fig. 1)

На верхней Оби одной из причин развития ПРР является слияние равных по водности, но на порядок различающихся по мутности Бии и Катунь. Образование этого типа русла началось в 1940-е гг, когда оформился верхний по течению Фоминский узел. До этого здесь и ниже, судя по [1], было относительно-прямолинейное, неразветвленное русло, включая левый рукав на Песчанском–Усть-Ануйском участке (уже не рубеже XIX–XX вв. произошло отмирание правого рукава, водность которого в середине века составляла 10% [3], а в начале XXI в. сократилась до первых процентов). Следующие два узла (Песчанский и Усть-Ануйский) сформировались к 60-м гг., к 80-м гг. – Ровный–Дмитриевский [22]. К началу XXI в. оно распространилось на расстояние более 70 км от слияния благодаря превращению второстепенных проток в чередующихся односторонних разветвлениях в многоводные рукава.

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

Очевидно, что такая трансформация русла и формирование морфологически самого сложного разветвления вызваны выносом наносов из Катунь и Бии и их последовательным распространением по Оби. Наряду с этим произошли резкое снижение уклонов при слиянии рек (от 0,45‰ в низовьях Катунь до 0,15–0,17‰ на Оби) и соответствующее изменение формы транспорта наносов: песчаные, переносимые притоками во взвешенном состоянии, попадая на Обь, становятся влекаемыми, образуя многочисленные побочки и осередки.

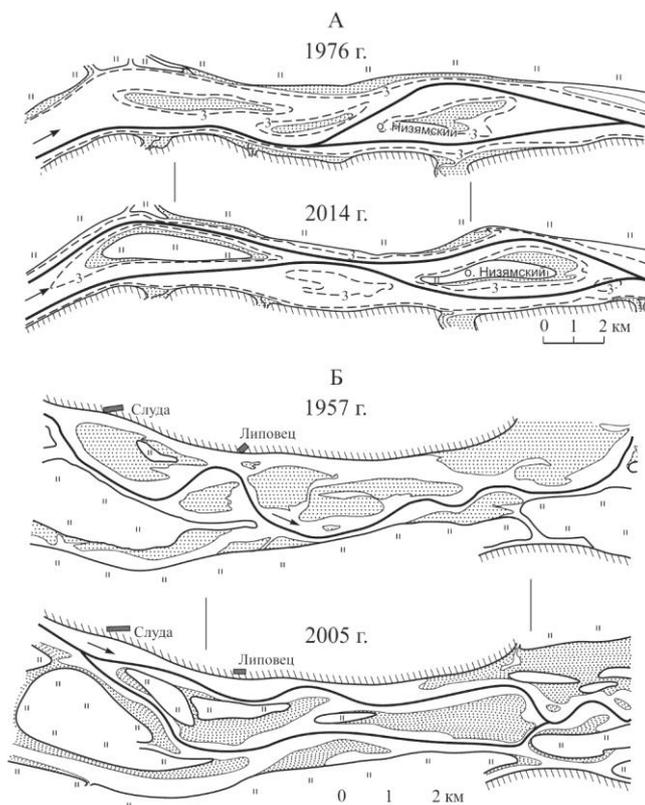


Рис. 5. Трансформация прямолинейного русла с осередковыми разветвлениями в параллельно-рукавное на нижней Оби (А – Низямское) и Северной Двине (Б – Слудское–Липовецкое). Условные обозначения – на рис. 1
 Fig. 5. Transformation of the linear channel with sandbank branchings into a parallel-braided channel on the Lower Ob River (A – Nizyamskoe) and the Northern Dvina River (B – Sludskoe – Lipovetskoe). Legend – in Fig. 1

На Северной Двине Паячное–Ягрышское параллельно-рукавное разветвление стало формироваться в начале XX в., когда выше по течению начал интенсивно размываться песчаный уступ 30–40-метровой террасы: при длине фронта размыва около 3 км в русло ежегодно поступает около 1 млн м³ песка. Влияние этого поступления наносов в реку сказалось вплоть до устья Ваги, способствуя трансформации Конецгорского сопряженного разветвления в параллельно-рукавное и развитию отмелей, превратившихся затем в острова и образовавших Слудское–Липовецкое разветвление этого типа.

Естественные трансформации русел и переформирования ПРП осуществляются в течение многих лет – десятилетиями. При антропогенном (техногенном) вмешательстве при решении водохозяйственных и транспортных задач это происходит очень быстро, приводя к изменению морфологии или режима деформаций русла. На Северной Двине в Паячном–Ягрышском разветвлении правые рукава, в которые поступают, в первую очередь, продукты размыва Толоконной горы, перекрыты рядом полузапруд и дамб, в левом судоходном разработаны прорезы, в том числе врезанные в подстилающие русло плотные моренные отложения. Это привело к общей стабилизации русла и улучшению условий судоходства кроме нижней части участка, где на сегодняшний день происходит периодическое развитие левого и правого рукавов. Ниже по течению (с. Ягрыш–с. Верхняя Тойма) правый рукав перекрыт сверху и отгорожен от реки дамбой, превратившей его в запань для формирования плотов. На верхней Оби крупные выправительные работы (перекрытие дамбами правых, а затем левых рукавов) вызвали расчленение верхней части (около 40 км) параллельно-рукавного русла на три части: одиночное разветвление

*Гидрология**Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.*

(Фоминский узел) перед первой дамбой – параллельно рукавное разветвление в бывшем левом рукаве (Печанский–Усть-Ануйский узел) – односторонние разветвления ниже второй дамбы (Ровный–Дмитриевский узел). Ниже по течению, где капитальные выправительные работы не проводились, сохранилось ПРР. Более того, сюда стали поступать наносы, проходящие транзитом участок выправления, способствуя активизации трансформации русла в параллельно-рукавное [27].

На многих других реках с этим типом русла выполнялись только дноуглубительные, чисто эксплуатационные работы на перекатах или разрабатывались прорези в рукавах и протоках, уже получивших естественную тенденцию к развитию. Эти работы, будучи ориентированными на использование работы самого водного потока, не изменяли морфологии русла либо ускоряли или замедляли его деформации. Пример попытки воспрепятствовать естественному ходу переформирований ПРР даёт Якутский «разбой» на Лене, в котором описанные выше процессы приводят к «уходу» реки от г. Якутска, выводу из строя городского водозабора, удлинению подходов к порту, причалам предприятий и трассы паромной переправы. Здесь регулярно разрабатываются прорези, проводится их восстановление для подвода воды к водозабору, существует проектное предложение по укреплению оголовка о. Пономарева для предотвращения его дальнейшего смещения [30]. Эти мероприятия позволяют задерживать естественный ход переформирований, однако не смогут их изменить.

Заключение

Таким образом, самые сложные и разнообразные по морфологии, режиму переформирований и условиям образования ПРР – параллельно-рукавные разветвления свойственны в основном большим и крупнейшим рекам, имеющим большую ширину русел (и наибольшее значение критерия квазиоднородности потока И.Ф. Карасева), вследствие чего в потоке возникают две стрежневые зоны, между которыми посередине русла, где скорости относительно понижены, аккумулируются наносы и формируется цепочка осередков и островов. В результате поток разделяется на ветви течения, каждая из которых соответствует рукавам параллельно-рукавного русла. Русла этого типа нередко представляют собой результат трансформации сопряженных или односторонних разветвлений при изменении определяющих их развитие факторов. К таковым относятся: увеличение стока рек, поступление в реки избыточного количества наносов, активная зарастаемость растительностью прирусловых отмелей и техногенные воздействия при решении задач освоения речных ресурсов.

На реках с песчаным широкопойменным руслом параллельно-рукавные разветвления встречаются там, где русло слабо- или неустойчивое, отсутствует влияние на поток коренных берегов, а пойма (руслоформирующий расход проходит при ее затоплении) имеет сравнительно небольшую ширину ($B_p \approx 2-4b_p$) или регулярно затапливаемую только низкую ступень с таким же соотношением ее ширины с руслом. В противном случае они не возникают или замещаются разветвлениями другого типа. На реках с врезанным руслом параллельно-рукавные разветвления либо аналогичны по морфологии и режиму деформаций широкопойменным неустойчивым, отличаясь от них большими размерами и удлинённостью островов, либо, встречаясь в скальных грунтах, формируя скульптурные и скульптурно-аккумулятивные острова и имея галечно-валунные руслообразующие наносы, являются очень устойчивыми.

Но даже при такой типизации параллельно-рукавные разветвления практически на каждой реке по своему русловому режиму индивидуальны. Поэтому не существуют универсальные подходы к управлению русловыми процессами, и методы и приёмы регулирования русел при решении практических задач разрабатываются с учетом особенностей данного участка.

Благодарности. *Выполнено по госзаданию Научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова, проект № ААА-АА16-116032810084-0 (исходные материалы, анализ русел Северной Двины, Мезени, Печоры, Амура) при финансовой поддержке РФФ, проект № 18-17-00086 (полевые исследования и русловой анализ на Лене и Оби, типизация и переформирования параллельно-рукавных разветвлений) и частично РФФИ, проект № 18-05-00487 (специфические деформации разветвлений).*

Acknowledgments. *Completed under the state assignment of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes of Lomonosov Moscow State University, project No. AAA-AA16-116032810084-0 (source materials, analysis of the channels of the Northern Dvina, Mezen, Pechora, Amur) with financial support from the Russian Science Foundation, project No. 18-17-00086 (field research and channel analysis on the Lena and Ob Rivers, typing and reshaping of parallel-sleeve branches) and partially RFBR, project No. 18-05-00487 (specific branch deformations).*

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

Библиографический список

1. Атлас реки Оби от г. Бийска до юрт Тягловых. 1987. 89 с. По работам 1897–1899г. Лит. Фонд 1331, Опись 3, Ед.Хр.106
2. Беркович К.М., Борсук О.А., Гаррисон Л.М., Кирик О.М., Лодина Р.В., Рулева С.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Руслевой режим и регулирование русла Средней и Нижней Лены // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 8. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1981. С. 125–156.
3. Беркович К.М., Гаррисон Л.М., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Морфология русла и русловые деформации Верхней Оби // Земельные и водные ресурсы: противоэрозионная защита и регулирование русел. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1990. С. 95–120.
4. Борсук О.А., Зайцев А.А., Кирик О.М., Лодина Р.В., Чалов Р.С. Руслевые процессы на средней Лене от Витима до Покровска // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 13. М.: Изд-во Моск.ун-та, 2001. С. 203–228.
5. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКМС, 1995. 600 с.
6. Водные ресурсы России и их использование. СПб: Изд-во ГГИ, 2008. 600 с.
7. Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Острова верхней Оби: морфометрическая характеристика, эволюция и динамика // Геоморфология. 2019. № 1. С. 80–90.
8. Голубцов Г.Б., Чалов Р.С. Сравнительный гидролого-морфологический анализ островов сложноразветвленных русел верхней Оби и средней Лены // Вестник Удмуртского государственного университета. Сер. Биология. Науки о Земле. 2020. № 2. С.164–174.
9. Завадский А.С. Махинов А.Н., Чалов Р.С. Формирование русла Среднего Амура и его морфодинамические типы // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 2. С.133–140.
10. Камышев А.А. Особенности морфодинамики русла верхней и средней Оби и ее связь с критерием квазиоднородности потока // Тридцать третье пленар. межвуз. координац. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Нижневартовск, 2018. С.114–116.
11. Карасев И.Ф. Руслевые процессы при переброске стока Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
12. 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.
13. Кумсиашвили Г.П. Гидроэкологический потенциал водных ресурсов. М.: Академкнига, 2005. 271 с.
14. Львовская Е.А., Чалов Р.С. Морфодинамика русел больших рек севера ЕТР и прогнозные оценки ее изменений // Геоморфология, 2018. № 3. С.3–23.
15. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты нижней Лены и Вилкоя // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 6. С.85–95.
16. Мальберт И.Э. К вопросу о русловых процессах рек Сибири // Тр. Трансп.-энергетич. ин-та Зап.-Сиб. филиала АН СССР. Гидрология. 1952. Вып. 3. С.73–85.
17. Рулева С.Н. Морфология и динамика русла Верхней и Средней Оби и влияние них гидротехнических мероприятий: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во Моск.ун-та, 1988. 30 с.
18. Рулева С.Н., Завадский А.С., Кичигин А.Н., Чалов С.Р. Условия формирования и морфология русла реки Сухоны // Эрозионные и русловые процессы. М.: МАКС пресс. 2010. Вып. 5. С.421–438.
19. Руслевой режим средней и нижней Лены. М.: Деп. ВИНТИ № 2224-76, 1976. 184с.
20. Руслевые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: ООО «Журнал “РТ”», 2012. 491 с.
21. Руслевые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.
22. Руслевые процессы на реках Алтайского региона. М.; МГУ. 1996. 243 с.
23. Тарбеева А.М. Морфология и эволюция островов в русле Оби // эрозионные и русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: Изд-во Моск.ун-та, 2004. С. 202–208.
24. Чалов Р.С. Типы русловых процессов и принципы морфодинамической классификации речных русел // Геоморфология. 1996. № 4. С. 13–18.
25. Чалов Р.С. Руслведение: теория, география, практика. Т.1. Руслевые процессы, факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
26. Чалов Р.С. Руслведение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
27. Чалов Р.С. Временная трансформация морфодинамических типов русел больших равнинных рек // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 3. С. 3–13.
28. Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288с.
29. 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.
30. Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлёв П.П., Морозова Е.А., Сурков В.В. Покровско-Якутский водный узел на р. лене: современные деформации и управление русловыми процессами // Известия РАН. Сер. География, 2019. № 6. С. 83–96.

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

31. Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулёва С.Н., Чалов С.Р. Морфология, переформирования русла и перекатов р. Мезени (нижнее течение) // Географический вестник. 2010. № 3(14). С. 11–23.
32. Чалов Р.С., Львовская Е.А., Рулёва 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. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2015. Вып.19. С. 2011–235.
33. Чалов Р.С., Кирик О.М. Ленские «разбои»: ретроспективный анализ переформирований, прогнозные оценки и регулирование русла // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2015. Вып.19. С. 294–338.
34. Чалов Р.С., Чалов С.Р. Морфология скального русла реки Ангары на участках Богучанского и Мотыгинского водохранилищ // География и природные ресурсы. 2009. № 1. С. 103–110.
35. Чалов Р.С. Чалов С.Р. Структурные уровни и морфодинамическая классификация русловых разветвлений // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 3. С. 259–271.
36. Baker V.R. Stream-channel response to floods, with examples from Central Texas // Geol. Soc. Am. Bull. 1977. Vol. 88. No 8. P. 1057–1071.
37. 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.
38. Yang D., Rane D., Hinzman L., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena river hydrologic regime and recent change // J. of Geophys. Res. 2002. V. 107 (D 23). P. 4694–4703.

References

1. Atlas reki Obi ot g. Biiska do yurt Tyaglovykh (1987), 89 p.
2. Berkovich, K.M., Borsuk, O.A., Garrison, L.M., Kirik, O.M., Lodina, R.V., Ruleva, S.N., Chalov, R.S., Chernov, A.V. (1981), “Ruslovoi rezhim i regulirovanie rusla Srednei i Nizhnei Leny”, *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy*. Vol. 8. Izd-vo MGU, Moscow, pp. 125–156.
3. Berkovich, K.M., Garrison, L.M., Ruleva, S.N., Chalov, R.S. (1990), “Morfologiya rusla i ruslovyie deformatsii Verkhnei Obi”, *Zemel'nye i vodnye resursy: protiverozionnaya zashchita i regulirovanie rusel*. Izd-vo MGU, Moscow. pp. 95–120.
4. Borsuk, O.A., Zaitsev, A.A., Kirik, O.M., Lodina, R.V., Chalov, R.S.(2001), “Ruslovyie protsessy na srednei Lene ot Vitima do Pokrovska”, *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy*. Vol. 13. Izd-vo MGU, Moscow. pp. 203–228.
5. *Vodnye puti basseina Leny* (1995), MIKIS, Moscow. 600 p.
6. *Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* (2008), Izd-vo GGI, St. Petersburg. 600 p.
7. Golubtsov, G.B. and Chalov, R.S. (2019) “Ostrova verkhnei Obi: morfometricheskaya kharakteristika, evolyutsiya i dinamika”, *Geomorfologiya*. no 1. pp. 80–90.
8. Golubtsov, G.B. and Chalov, R.S. (2020), “Comparative hydro-morphological analysis of the islands of differently branched upper ob and middle Lena river channels” [Srvnitel'nyi gidrologo-morfologicheskii analiz ostrovov slozhnorazvetvlennykh rusel verkhnei Obi i srednei Leny], *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. No 2. pp. 164–174.
9. Zavadskii, A.S., Makhinov, A.N., Chalov, R.S. (2000), “Formirovanie rusla Srednego Amura i ego morfodinamicheskie tipy”, *Vodnye resursy*. Vol. 27, no 2, pp. 133–140.
10. Kamyshev, A.A. (2018), “Osobnosti morfodinamiki rusla verkhnei i srednei Obi i ee svyaz' s kriteriem kvaziodnorodnosti potoka”, *Tridtsat' tret'e plenar. mezhvuz. koordinats. soveshch. po probleme erozionnykh, ruslovykh i ust'evykh protsessov*. Nizhnevartovsk, pp. 114–116.
11. Karasev, I.F. (1975), *Ruslovyie protsessy pri perebrozke stoka*. Gidrometeoizdat, Leningrad, 288 p.
12. Kuz'mina, E.M. and Chalov, R.S. (2020), “Gidrologo-morfologicheskaya kharakteristika shirokopoimennogo razvetvlennoogo rusla srednei Leny”, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, no 1. pp. 87–96.
13. Kumsiashvili, G.P. (2005), *Gidroekologicheskii potentsial vodnykh resursov*, Akademkniga. Moscow, 271 p.
14. L'vovskaya, E.A. and Chalov, R.S. (2018), “Morfodinamika rusel bol'shikh rek severa ETR i prognoznye otsenki ee izmenenii”, *Geomorfologiya*, no 3, pp. 3–23.
15. Magritskii, D.V.(2015), “Faktory i zakonomernosti mnogoletnikh izmenenii stoka vody, vzheshennykh nanosov i teploty nizhnei Leny i Vilyuya”, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, no 6, pp. 85–95.
16. Mal'bert, I.E. (1952), “K voprosu o ruslovykh protsessakh rek Sibiri”, *Tr. Transp.-energetich. in-ta Zap.-Sib. filiala AN SSSR*, vol. 3. Gidrologiya, pp. 73–85.
17. Ruleva, S.N. (1988), *Morfologiya i dinamika rusla Verkhnei i Srednei Obi i vliyanie nikh gidrotekhnicheskikh meropriyatii*. Abstract of Ph.D. dissertation, Geographical Sciences, Moscow State University, Moscow, 30 p.
18. Ruleva, S.N., Zavadskii, A.S., Kichigin, A.N., Chalov, S.R. (2010), “Usloviya formirovaniya i morfologiya rusla reki Sukhony”, *Eroziionnye i ruslovyie protsessy*. Vol. 5, MAKS press, Moscow, pp. 421–438.
19. Ruslovoi rezhim srednei i nizhnei Leny (1976), M.: Dep. VINITI № 2224-76. 184 p.
20. Ruslovyie protsessy i vodnye puti na rekakh basseina Severnoi Dviny (2012), ООО «Zhurnal “RT”», Moscow, 491 p.
21. Ruslovyie protsessy i vodnye puti na rekakh Obskogo basseina (2001), RIPEL plyus, Novosibirsk, 300 p.
22. Ruslovyie protsessy na rekakh Altaiskogo regiona (1996), Moscow State University, Moscow, 243 p.

Гидрология

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Б.Г.

23. Tarbeeva, A.M. (2004), "Morfologiya i evolyutsiya ostrovov v rusle Obi", *Eroziionnye i ruslovyie protsessy i problemy gidroekologii*. Izd-vo MGU, Moscow, pp. 202–208.
24. Chalov, R.S. (1996), "Tipy ruslovykh protsessov i printsipy morfodinamicheskoi klassifikatsii rechnykh rusel", *Geomorfologiya*, no 4, pp. 13–18.
25. Chalov, R.S. (2008) *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T.1. Ruslovyie protsessy, faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel*. Izd-vo LKI, Moscow, 608 p.
26. Chalov, R.S. (2011), *Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnykh rusel*. KRASAND, Moscow, 960 p.
27. Chalov, R.S. (2018), "Vremennaya transformatsiya morfodinamicheskikh tipov rusel bol'shikh ravninnykh rek", *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, no 3, pp. 3–13.
28. Chalov, R.S., Alabyan, A.M., Ivanov, V.V., Lodina, R.V., Panin, A.V. (1998), *Morfodinamika rusel ravninnykh rek*. GEOS, Moscow, 288 p.
29. Chalov, R.S., Zavadskii, A.S., Ruleva, S.N. (2008), "Parallel'no-rukavnye razvetvleniya rechnykh rusel; usloviya formirovaniya, morfologiya i dinamika", *Vodnye resursy*. Vol. 35, no 2, pp. 166–174.
30. Chalov, R.S., Zavadskii, A.S., Botavin, D.V., Golovlev, P.P., Morozova, E.A., Surkov, V.V. (2019), "Pokrovsko-Yakutskii vodnyi uzel na r. Lene: sovremennye deformatsii i upravlenie ruslovymi protsessami", *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, no 6, pp. 83–96.
31. Chalov, R.S., Zavadskii, A.S., Ruleva, S.N., Chalov, S.R. (2010), "Morfologiya, pereformirovaniya rusla i perekatov r. Mezeni (nizhnee techenie)", *Geographical Bulletin*, no 3(14), pp. 11–23.
32. Chalov, R.S., L'vovskaya, E.A., Ruleva, S.N., Zavadskii, A.S. (2015), "Morfodinamika rusla r. Pechory (ot g. Pechory do ust'ya na fone kharakteristiki rusla po vsei dline)", *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy*, vol. 19, Izd-vo MGU, Moscow, pp. 211–235.
33. Chalov, R.S. and Kirik, O.M. (2015), "Lenskie «razboi»: retrospektivnyi analiz pereformirovaniya, prognoznnye otsenki i regulirovanie rusla" *Eroziya pochv i ruslovyie protsessy*, vol. 19, Izd-vo MGU, Moscow pp. 294–338.
34. Chalov, R.S. and Chalov, S.R. (2009), "Morfologiya skal'nogo rusla reki Angary na uchastkakh Boguchanskogo i Motygin'skogo vodokhranilishch", *Geografiya i prirodnye resursy*, no 1, pp. 103–110.
35. Chalov, R.S. and Chalov, S.R. (2020), "Strukturnye urovni i morfodinamicheskaya klassifikatsiya ruslovykh razvetvlenii", *Vodnye resursy*, vol. 47, no 3, pp. 259–271.
36. Baker, V.R. (1977), "Stream-channel response to floods, with examples from Central Texas", *Geol. Soc. Am. Bull.* vol. 88, no 8, pp. 1057–1071.
37. Komar, P.D. (1983), "Shapes of streamlined island on the Earth and Marth: Experiments and analyses of the minimum-drag form", *Geology*, no 11, pp. 651–654.
38. Yang, D., Rane, D., Hinzman, L., Zhang, X., Zhang, T., Ye, H. (2002), "Siberian Lena river hydrologic regime and recent change", *Journal of Geophysical Research*. Vol. 107, no D23, pp. 4694–4703.

Поступила в редакцию: 17.06.2020

Сведение об авторах**Роман Сергеевич Чалов**

доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: rschalov@mail.ru

Константин Михайлович Беркович

доктор географических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: berkovich@yandex.ru

Светлана Николаевна Рулёва

кандидат географических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: mnks1@yandex.ru

About the authors**Roman S. Chalov**

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Department of Land Hydrology, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Konstantin M. Berkovitch

Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Svetlana N. Ruleva

Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Гидрология

Лепихин А.П., Возняк А.А.

Александр Сергеевич Завадский

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: az200611@rambler.ru

Aleksandr S. Zavadskiy

Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Павел Петрович Головлёв

младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: pavel_golovlev@list.ru

Pavel P. Golovlev

Junior Researcher, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Георгий Борисович Голубцов

младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: georgy1995golubcov@yandex.ru

Georgiy B. Golubcov

Postgraduate Student, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University; 1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулёва С.Н., Завадский А.С., Головлёв П.П., Голубцов Г.Б. Формирование, эволюция и временная трансформация параллельно-рукавных разветвлений речных русел // Географический вестник = Geographical bulletin. 2020. №4(55). С. 110–125. doi 10.17072/2079-7877-2020-4-110-125.

Please cite this article in English as:

Chalov, R.S., Berkovitch, K.M., Ruleva, S.N., Zavadskiy, A.S., Golovlev, P.P., Golubcov, G.B. (2020). Formation and evolution of parallel-braided channel reaches. *Geographical bulletin*. No 4(55). P. 110–125. doi 10.17072/2079-7877-2020-4-110-125.

УДК 532.543.5

DOI: 10.17072/2079-7877-2020-4-125-136

К ПРОБЛЕМЕ ОЦЕНКИ ТРАНСПОРТА НАНОСОВ**Анатолий Павлович Лепихин**

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2770-6890>, Author ID: 147950, Scopus ID: 6603322084, SPIN-код: 761-8001.

e-mail: lepihin49@mail.ru

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Пермь

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

Анна Анатольевна Возняк

Author ID: 289675, Scopus ID: 57211202546, SPIN-код: 2436-8281.

e-mail: aavoznyak@gmail.com

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Пермь

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь

