

УДК 551.435.1 556.53.537 (470.1/25)

Е.А. Львовская¹, Р.С. Чалов²

ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВЕТВЛЕННОГО РУСЛА Р. ПЕЧОРА³

Выявлены особенности распространения морфодинамических типов русла на средней и нижней Печоре — крупнейшей реке Европейского Севера, русловые процессы которой до сих пор не изучались. Показано, что более 80% длины реки занимают разветвления (в том числе 2-го порядка), представленные всеми известными типами. Впервые проведен гидролого-морфологический анализ для разветвленного русла Печоры. Установлены закономерности между относительной шириной островов и шириной рукавов, с одной стороны, и характеристиками потока — руслоформирующими и удельными среднемаксимальными расходами воды — с другой; получены тесные гидролого-морфологические зависимости для излучин в рукавах пойменно-русловых, сопряженных и одиночных разветвлений. Показано, что зависимости различаются по типам разветвлений и значимости рукавов, а значения коэффициентов в уравнениях зависимости носят региональный характер. Впервые обосновано выделение рукавов по их значимости: основных, среди которых один является главным, и второстепенных.

Ключевые слова: русловые процессы, морфодинамические типы русла, разветвления, рукава, острова, морфометрия, гидролого-морфологические зависимости.

Введение. В последние десятилетия все больше внимания уделяется анализу условий формирования, морфологии и русловому режиму рек в разных природных условиях, появились многочисленные статьи и монографии о русловых процессах. Однако некоторые реки практически не рассмотрены в научной литературе. К таковым относится р. Печора, русловые процессы на которой до сих пор не изучались, — одна из крупнейших рек европейской части России (ЕТР), протекающая на северо-востоке и представляющая собой основную путь сообщения в регионе. В ее устье находится морской порт Нарьян-Мар, а пересечение реки железной дорогой Котлас–Воркута делает ее важнейшей составляющей транспортного комплекса Севера ЕТР. И хотя перевозки грузов и пассажиров в современных условиях резко сократились, грядущее возрождение экономики страны, учитывая ресурсный потенциал региона и то внимание, которое сейчас вновь уделяется Крайнему Северу, неизбежно приведет к восстановлению и развитию судоходства и водных путей на Печоре, а следовательно, сведения о русловых процессах на реке будут востребованы в качестве основы регулирования русла.

Значимость изучения русла Печоры возрастает в связи с тем, что в ее среднем и нижнем течении преобладают разветвления — тип русла, характеризующийся наиболее сложным режимом формирования. В последнее время к ним проявля-

ется повышенный интерес [Алексеевский, Чалов, 2009; Чалов, 2011; Чалов и др., 1998], но охват исследованных рек, разветвленных на рукава и соответственно их региональные гидролого-морфологические оценки остаются недостаточными; для Печоры они вообще отсутствуют.

Постановка проблемы. Основная задача исследования — охарактеризовать формы проявления русловых процессов в среднем и нижнем течении Печоры и выполнить гидролого-морфологический анализ разветвленного русла, которое абсолютно доминирует на всем протяжении реки от г. Печора (пересечение реки железной дорогой Котлас–Воркута) до ее устья, что, по существу, может закрыть “белое пятно” в географии русловых процессов и создаст условия для разработки приемов управления русловыми процессами при водно-транспортном и других видах использования речных ресурсов.

Материалы и методы исследований. В основу работы положен географический подход к изучению русловых процессов, разработанный в МГУ имени М.В. Ломоносова. При исследованиях использованы лоцманские карты разных лет издания, материалы регулярных съемок и промеров русла, выполняемых изыскательскими партиями и предоставленные Администрацией Печорского бассейна внутренних водных путей, крупномасштабные топографические карты и космические снимки. В июле 2009 г. было проведено рекогносцировочное об-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, аспирантка; *e-mail:* elizaveta.lvovskaya@gmail.com

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

³ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 12-05-00348, 15-05-03752) и программы Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-1010.2014.5), натурные исследования — при содействии Администрации Печорского бассейна внутренних водных путей.

следование русла р. Печора на служебном теплоходе “Печорводпути”, во время которого измеряли расход воды в рукавах, выполняли некоторые другие виды русловых исследований⁴. При обработке данных применяли методы построения гидролого-морфологических зависимостей и ретроспективного анализа, позволяющего устанавливать роль рукавов в многолетних переформированиях русла.

Общая характеристика реки. Печора берет начало на западном склоне Северного Урала и в основном протекает по равнинной территории Печерской низменности, занимающей обширное пространство между Уралом и Тиманским кряжем (рис. 1). На севере бассейн представлен Малоземельской и Большеземельской тундрой. Первая представляет собой слабоволнистую равнину, вторая — холмистую равнину, прорезанную густой речной сетью с многочисленными моренными холмами и грядами. Таежная растительность с юга на север бассейна постепенно сменяется лесотундрой и тундрой [Спиридонов, 1978].

Печора — самая многоводная река Севера европейской части России, ее длина 1809 км, площадь водосбора 322 тыс. км², средний годовой расход воды (г.п. Оксино) — 4060 м³/с, средний максимальный — 39 200 м³/с, средний за период летне-осенней межени — 3310 м³/с. В питании реки доля снегового питания составляет 60%; 20–30% приходится на дождевой сток. Половодье на Печоре характеризуется быстрым подъемом уровня, начинается в первых числах мая и достигает пика к его середине, в среднем течении, как правило, два-три пика, ниже по течению их обычно два. В многоводные годы весеннее половодье проходит чаще всего одной волной почти по всей реке. Спад половодья продолжается до середины июля, прерываясь дождевыми паводками на правобережных притоках. Летне-осенняя межень неустойчивая, часто прерывается паводками, с которыми часто связан подъем уровня в конце августа. Минимальный уровень приходится на период с декабря по апрель. Для Печоры, текущей с юга на север, в период весеннего подъема характерны заторы.

По составу руслообразующих наносов на Печоре можно выделить три участка: от истока до устья р. Илыч русло валунно-галечное и галечное; второй участок отделен от первого двумя короткими, следующими один за другим отрезками с преобладанием песчаных и валунно-галечных наносов, которые сменяются почти до впадения р. Лыжа; от устья р. Лыжа до устьевой области руслообразующие наносы песчаные, с преобладанием средне- и крупнозернистых песков.

Результаты исследований и их обсуждение. Морфодинамические типы русел и условия их формирования.

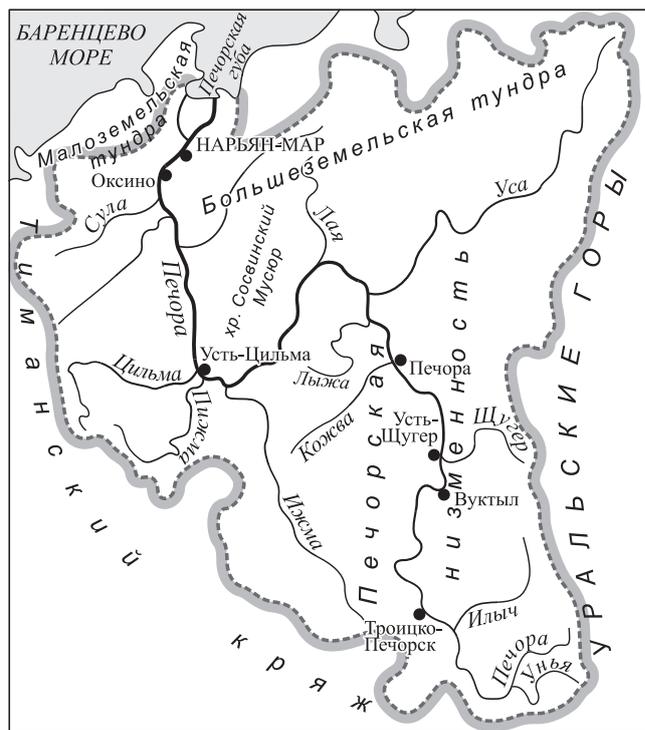


Рис. 1. Схема бассейна Печоры

ния. По условиям формирования русла на Печоре выделяются 5 морфологически однородных участков: верхняя Печора — от истока до устья р. Подчерье (1095 км от устья), средняя — от р. Подчерье до слияния с р. Уса (1095–757 км), нижняя (757–195 км), которая в свою очередь делится на два участка — от слияния с р. Уса до впадения р. Цильма и от впадения р. Цильма до вершины устьевой области (устье р. Сула); устьевая область реки (нижние 195 км). Эти участки примерно соответствуют распространению ограниченных, а также свободных условий формирования русел и их чередования и отличаются по составу руслообразующих наносов, распространению и преобладанию разных морфодинамических форм русла. Участки на средней и нижней Печоре (от г. Печора, 880 км до вершины устьевой области — впадения р. Сула), будут именоваться следующим образом: верхний — от г. Печора до слияния с р. Уса, средний — от устья р. Уса до впадения р. Цильма, нижний — от впадения р. Цильма до вершины устьевой области. Ограниченные условия развития русловых деформаций соответствуют пересечениям рекой возвышенностей, свободные — низменностям, сложенным мощными толщами четвертичных отложений. В среднем и нижнем течении Печоры преобладает широкопойменное русло. Исключение составляет 70-километровый участок врезанного русла на 490–423 км до впадения р. Цильма, где Печора протекает вдоль отрогов Тиманского кряжа.

⁴ В полевых работах участвовали сотрудники научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ А.С. Завадский, С.Н. Рулева и Б.В. Белый.

Наиболее широкое распространение на Печоре получило разветвленное русло (рис. 2), которое преобладает на всех участках как в свободных, так и в ограниченных условиях развития русловых деформаций (>50% протяженности русла в среднем и нижнем течении). Разветвленное русло представлено полным набором разновидностей (по классификации МГУ [Чалов, 1979, 2011]). Вниз по течению реки при увеличении мощности потока и уменьшении уклона русла более простые морфодинамические типы разветвлений сменяются более сложными. В основных рукавах (в их начале и в устье) формируются разветвления 2-го или 3-го порядка, представленные одиночными разветвлениями.

Руслоформирующий расход воды (2080 м³/с на г.п. Усть-Цильма) проходит при затопленной пойме, что отражено в морфологии разветвлений и формировании пойменной много рукавности (наличии ответвлений, расчленяющих пойму на отдельные массивы). В широкопойменном русле от

г. Печора до слияния с Усой преобладают сопряженные разветвления (34% длины участка), образующие единый участок, состоящий из 5 звеньев (рис. 2); этот тип русла также встречается в нижнем течении (11% длины участка), где представлен 2 звеньями, каждое из которых состоит из нескольких островов.

Односторонние разветвления представлены только на среднем участке, доля их велика (21% длины участка устье р. Уса — устье р. Цильма). В равной мере распространены параллельно-рукавные и пойменно-русловые разветвления (12 и 13% соответственно). Крупные острова в последних представлены обширными пойменными массивами или несколькими островами, разделенными длинными извилистыми протоками, по которым осуществляется гидравлическая связь между обоими основными рукавами. В среднем течении они развиваются во врезанном русле, в нижнем течении — в широкопойменном, где сопровождаются

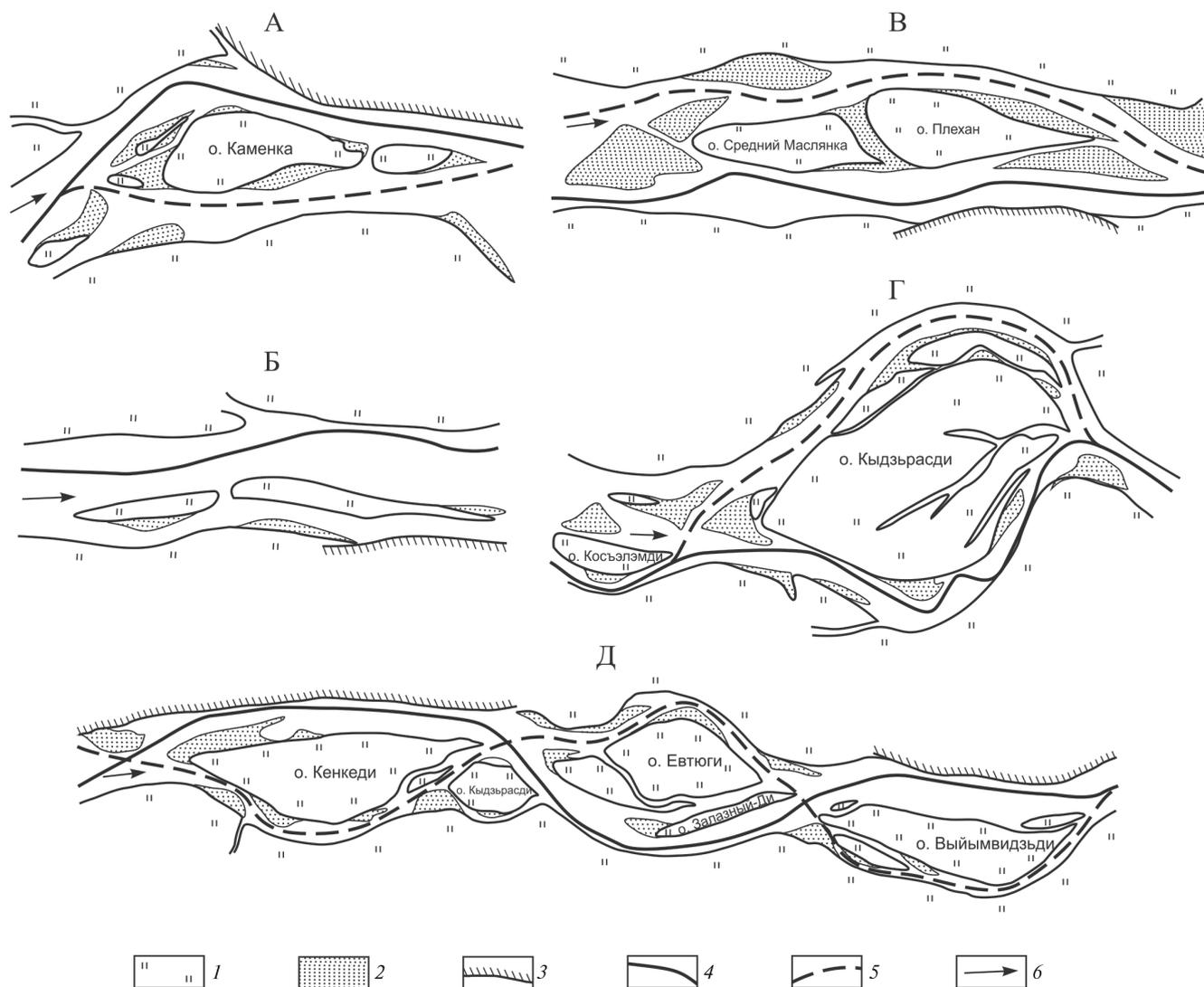


Рис. 2. Основные типы разветвлений на Печоре: А — одиночные, Б — односторонние, В — параллельно-рукавные, Г — пойменно-русловые, Д — сопряженные; 1 — пойма; 2 — песчаные отмели; 3 — коренной берег; 4 — стрежень потока главных рукавов; 5 — стрежень потока вторых рукавов; 6 — направление течения реки

пойменной многорукавностью. Доля пойменно-руслых разветвлений составляет на верхнем участке 8% (9 км), на среднем — 12% (41 км), на нижнем — 3% (18 км) от общей длины каждого участка. На одиночные разветвления приходится 3 (3 км), 7 (24 км) и 7% (16 км) соответственно. В нижнем течении реки, где уклон минимален, а мощность потока максимальна, преобладают параллельно-рукавные разветвления, они не встречаются выше устья р. Уса; общая протяженность разветвленного русла здесь составляет 53% длины.

На остальных участках распространены односторонние разветвления, в нижнем течении встречаются чередующиеся односторонние.

Второе место по протяженности (38%) занимает относительно прямолинейное русло, которое представляет собой как короткие “вставки” между отдельными разветвлениями или участками разветвленного русла, так и участки, где река протекает вдоль коренного берега. Практически на всем протяжении (30% длины нижнего и среднего течения) относительно прямолинейное русло осложнено одиночными разветвлениями 2-го порядка (они образуются островами, для которых характерно соотношение $B_o < 0,4B_p$, где B_o — ширина острова, B_p — ширина русла перед узлом разветвления) [Иванов, 1989; Чалов, 2011]. Таким образом, разветвленное русло (включая разветвления 2-го порядка и пойменные ответвления) абсолютно преобладает и занимает >80% длины Печоры в среднем и нижнем течении.

Излучины на средней и нижней Печоре представлены единичными формами: свободной, вынужденной и двумя вписанными, одна из которых осложнена разветвлениями 2-го порядка. В месте впадения в Печору рек Пижма и Цильма находится своеобразная излучина, в пределах которой река обтекает выступ правого коренного берега, тогда как противоположный берег в вершине и на крыльях излучины — пойменный. Такие излучины отсутствуют во всех существующих классификациях, их можно выделить в особый тип — обтекающие излучины.

Морфометрические характеристики островов русловых разветвлений. Переформирования разветлений отражены в морфологии островов. Гидравлически выгодная форма острова, обеспечивающая наименьшие сопротивления потоку, — каплевидная при отношении длины к ширине $L_o/B_o = 3\div 4$ [Balker, 1977; Комар, 1983]. При больших значениях ($L_o/B_o > 3\div 4$) острова приобретают удлиненную форму и сложные очертания вследствие формирования в рукавах разветлений 2-го порядка либо их меандрирования. При меньших значениях ($L_o/B_o < 3\div 4$) ширина островов увеличивается, часто они приобретают сложную конфигурацию в плане (пойменно-руслые разветвления).

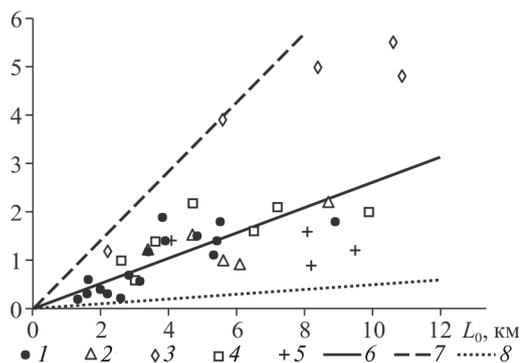


Рис. 3. Соотношение длины и ширины островов разветлений различных морфодинамических типов на р. Печора: 1 — одиночные, 2 — односторонние, 3 — пойменно-руслые, 4 — сопряженные, 5 — параллельно-рукавные; 6 — нормальное соотношение ($L_o/B_o = 3,8$); 7 — верхняя граница ($L_o/B_o = 1,4$); 8 — нижняя граница ($L_o/B_o = 20$)

Для островов Печоры зависимость между их длиной (L_o) и шириной (B_o) дифференцируется в зависимости от типа разветвления (рис. 3), для каждого из которых характерны свои пределы отношения L_o/B_o . За норму этого соотношения можно принять величину L_o/B_o , которой отвечают острова одиночных и сопряженных разветлений. Для них соотношение между параметрами L_o и B_o , равное 3,8 и 3,9 соответственно, довольно тесное. По мере увеличения соотношения L_o/B_o (табл. 1) и удлинения островов разветвления становятся односторонними или параллельно-рукавными. В этом направлении (одностороннее → параллельно-рукавное разветвление) величина L_o/B_o возрастает от 4,3 до 8,1 благодаря росту островов за счет кос в их ухвостьях и побочней у оголовков островов [Чалов, 2011]. Развитие пойменно-руслых разветлений обеспечивается развитием и зарастанием в рукавах побочней, причлененных к островам, что приводит к увеличению их размеров и формированию излучин рукавов разветлений [там же]. На Печоре острова таких разветлений имеют меньшую относительную длину и, как правило, более сложную форму при $L_o/B_o < 3$ (в среднем 1,9).

Таблица 1
Уравнения связи ширины (B_o) и длины (L_o) островов на р. Печора

| Тип разветвления | Уравнение связи | L_o/B_o | Коэффициент корреляции |
|----------------------|------------------|-----------|------------------------|
| Пойменно-руслые | $B_o = 0,524L_o$ | 1,9 | 0,90 |
| Сопряженные | $B_o = 0,257L_o$ | 3,9 | 0,81 |
| Одиночные | $B_o = 0,261L_o$ | 3,8 | 0,80 |
| Односторонние | $B_o = 0,234L_o$ | 4,3 | 0,54 |
| Параллельно-рукавные | $B_o = 0,124L_o$ | 8,1 | 0,53 |

Подобное исследование, но для меньшего разнообразия разветвлений, выполнено А.М. Тарбее-

вой [2004] для Оби (от Новосибирска до устья р. Томь), где распространены только одиночные и сопряженные разветвления, остальные встречаются в виде единичных образований. Для сопряженных разветвлений ею получена “норма” $L_o/B_o = 3,4$, близкая к значению для Печоры и с высоким коэффициентом корреляции (0,99); для одиночных разветвлений $L_o/B_o = 7,2$, т.е. они на Оби имеют удлиненную форму при большом разбросе точек на графике. По-видимому, это объясняется тем, что одиночные острова на Оби обычно формируются ниже крупных выступов коренных берегов или изгибов долины реки в целом либо в условиях, когда один рукав отмирающий, вследствие чего остров разрастается как с оголовка (к нему причленяются зарастающие отмели), так и с ухвостья, где вытягивается коса. На Печоре одиночные острова расположены посередине русла и, даже будучи составленными из нескольких объединившихся элементарных (образовавшихся на основе осередков) островов, сохраняют оптимальное соотношение L_o/B_o , разрастаясь как в длину, так и по ширине реки.

Относительная ширина островов B_o/b_p , где B_o — ширина острова, b_p ширина русла выше узла разветвления, зависит от удельного среднмаксимального расхода воды $q_{\text{макс}} = \frac{Q_{\text{ср.макс}}}{b_p}$, м²/с:

$$\frac{B_o}{b_p} = \pm kq \pm Y. \quad (1)$$

Значение коэффициента k в (1) закономерно увеличивается от пойменно-русловых к сопряженным разветвлениям (табл. 2). Аналогичные зависимости установлены для широкопойменного разветвленного русла средней и нижней Лены [Чалов, 2011]. Однако здесь они имеют обратный порядок увеличения k (простое сопряженное → параллельно-рукавное → односторонние чередующиеся → сложное сопряженное) и большую величину. Очевидно, это связано, во-первых, с большей водностью Лены (ее среднегодовой расход в 7 раз больше, чем у Печоры), меньшей устойчивостью ее русла, с одной стороны, и с различным числом островов, образующих разветвления каждого типа, — с другой (на Лене это, как правило, сложнопостроенные архипелаги, тогда как на Печоре — консолидированные островные массивы). Последняя характеристика достаточно индивидуальна и в свою очередь зависит от устойчивости русла и местных геолого-геоморфологических условий его формирования. Примечательно, что разветвления 2-го порядка (в том числе разветвления самих рукавов), будучи в основном одиночными, образуют единую связь с такими же разветвлениями самого русла (1-го порядка), что, очевидно, свидетельствует о едином механизме образования разветвлений (зарастание осередков и превращение их в острова).

Таблица 2

Значения коэффициента уравнений связи в зависимости (1) относительной ширины островов (B_o/b_p) от удельного среднмаксимального расхода в узлах разветвлений ($q_{\text{макс}}$) для р. Печора

| Тип разветвления | k | Y | Коэффициент корреляции |
|-------------------------------------|------|-------|------------------------|
| Пойменно-русловые | 0,09 | 1,78 | 0,92 |
| Односторонние | 0,10 | -0,30 | 1,00 |
| Параллельно-рукавные | 0,15 | -0,78 | 0,61 |
| Одиночные, в том числе 2-го порядка | 0,17 | -1,21 | 0,93 |
| Сопряженные | 0,32 | -0,70 | 0,95 |

Гидролого-морфологические зависимости. Связи между характеристиками потока и показателями формы русла для разных морфодинамических типов русел представляют собой важную составляющую гидролого-морфологического анализа. Обычно они устанавливаются для меандрирующих русел, характеристики которых (радиус кривизны, шаг и др.) зависят от водности реки [Чалов и др., 2004]. Для разветвленных русел получение гидролого-морфологических зависимостей осложняется рассредоточением потока по рукавам, неодинаковым в разные фазы водного режима, и ограничивается оценкой ширины и глубины русла в рукавах как функций их водности [Чалов и др., 1998], хотя зависимости и доведены до прогностического применения (по ним оцениваются, в частности, тенденции развития или отмирания рукавов [5]). Тип разветвления при этом не учитывается.

Разделение рукавов по их значимости в рассредоточении стока и русловом режиме реки достаточно часто встречается в специальной литературе. Как правило, речь идет о главном, основном и второстепенных, многоводных и маловодных рукавах, выделяются рукава, протоки и ответвления [Алабян, 1991; Маккавеев, 1955; Чалов, 1979, 2011; Чалов и др., 1998], рукава (или водотоки) разных порядков [Алексеевский, Чалов, 2009], на больших реках — судоходные и несудоходные рукава и т.д. За исключением порядковой структуры разветвлений, характеристика рукавов дается на качественном уровне, главным (или основным) рукавом считается самый многоводный, остальные — второстепенными. При этом на больших реках с очень сложными разветвлениями относительная водность “главного” рукава (в разные фазы водного режима) может составлять <50% стока воды в реке, снижаясь иногда до 20–25%; остальная часть стока рассредоточивается по многочисленным рукавам с относительной водностью от нескольких процентов до 15–20%, изменяясь в разные фазы водного режима в ту и другую сторону [Проектирование судовых..., 1964].

В большинстве разветвлений (кроме односторонних) выделяются два, реже три рукава, близких по водности (при этом один из них более многоводный, чем другие), или периодически, в ходе переформирования русла, развивающихся и забирающих большую часть расхода воды, затем мелеющих, теряющих водность, а затем вновь превращающихся в многоводные. Такие рукава следует считать основными; по ним определяется морфодинамический тип разветвлений [Чалов, 2011]. Остальные рукава второстепенные. Среди основных рукавов следует выделять в каждом разветвлении главный рукав, характеризующийся на данном временном отрезке наибольшей водностью, и второй основной рукав, который может быть самым многоводным в половодье (паводки) или становится таковым со временем в ходе переформирований русла [Чалов, 1979, 2011]. К второстепенным рукавам относятся маловодные и не составляющие “конкуренцию” по водности основным рукавам. В односторонних разветвлениях может быть только один основной рукав — главный, остальные рукава второстепенные.

Полученные для р. Печора связи ширины рукавов с их водностью при руслоформирующем расходе воды $b_{рук} = f(Q_{рф})$ неодинаковы как для разветвлений разных типов, так и для рукавов, различающихся по их значимости в перераспределении стока воды, наносов и переформированиях русла в разные отрезки времени. Для Печоры при оценке значимости рукавов в рассредоточении стока было принято, что главным считается рукав с относительной водностью в межень $>50\%$ суммарного расхода воды в разветвлении, тогда как водность второго основного рукава составляет $\leq 50\%$, а в большинстве случаев — $<35\%$. Кроме того, главные и вторые основные рукава нередко разделены небольшими островами, размеры которых определяются водностью рукава, на разветвления 2-го порядка. На Печоре они, как правило, встречаются в узлах разветвления русла или слияния основных рукавов, а при их удлинении ($L_o/B_o > 4$) и в средней их части.

Зависимость ширины рукавов от их водности неодинакова в разветвлениях разного типа (ширина определена для руслоформирующего расхода воды, соответствующего половодью), т.е.

$$b_{рук.ф} = kQ_{ф.рук} + a, \tag{2}$$

где $b_{рук.ф}$ — ширина рукавов при руслоформирующем расходе воды; $Q_{ф.рук}$ — руслоформирующий расход воды, приведенный к основным рукавам; k, a — коэффициенты (табл. 3). Для меженных (измеренных) расходов воды эта зависимость проявляется лишь в виде общей тенденции. Поэтому эти расходы использованы только для определения значимости рукавов и контроля при расчетах распределения $Q_{ф}$ по основным рукавам.

Таблица 3

Значения коэффициентов в уравнениях зависимости ширины рукавов $b_{рук.ф}$ от руслоформирующего расхода воды в них ($Q_{ф}$) для р. Печора

| Тип разветвления | k | a | Коэффициент корреляции |
|-----------------------|-------|-------|------------------------|
| Параллельно-рукавные | 0,046 | 555,9 | 0,86 |
| Пойменно-русловые | 0,055 | 406,6 | 0,83 |
| Одиночные | 0,062 | 232,4 | 0,88 |
| Сопряженные (вторые) | 0,075 | 271,2 | 0,79 |
| Сопряженные (главные) | 0,078 | 308,3 | 0,91 |

В многоводную фазу водного режима (при $Q_{ф}$) водность главных рукавов некоторых разветвлений, в основном одиночных, становится меньше, чем вторых основных. Так, на графике (рис. 4) главные рукава расположены в области водности $<50\%$, хотя рассредоточение стока воды по второстепенным рукавам в этих разветвлениях отсутствует. Ширина рукавов увеличивается с увеличением расходов воды в разветвлениях всех типов. Разветвления 2-го порядка в прямолинейном русле также отвечают полученной закономерности. Особняком стоит зависимость для главных рукавов сопряженных разветвлений, в которых ширина русла меньше, чем в рукавах других типов при тех же значениях расхода воды, в том числе вторых основных рукавов сопряженных разветвлений (водность $<50\%$). Очевидно, это связано с тем, что главные рукава в следующих одно за другим разветвлениях образуют серии излучин с присущим им скоростным полем потока, шпоры которых представлены островами.

Самой большой шириной русла характеризуются основные рукава параллельно-рукавных разветвлений, отличающиеся относительной прямоли-

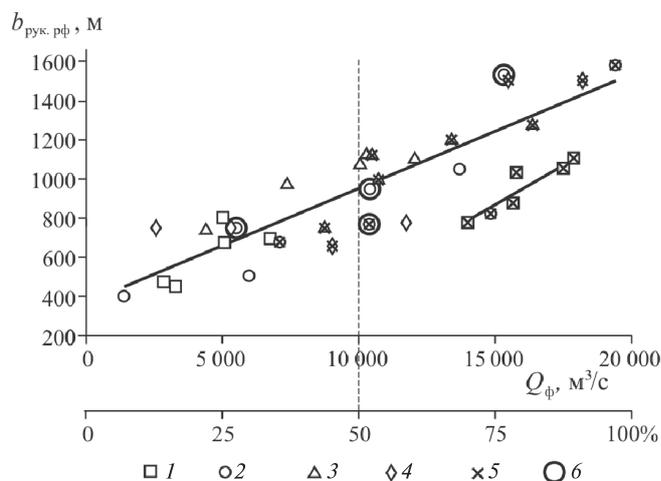


Рис. 4. Зависимость между шириной рукавов $b_{рук.ф}$ и водностью рукавов при руслоформирующем расходе воды $Q_{ф}$ в рукавах в зависимости от их значимости (главных и вторых) и типа разветвления: 1 — сопряженные; 2 — одиночные; 3 — параллельно-рукавные; 4 — пойменно-русловые; 5 — главные рукава; 6 — разветвления 2-го порядка

нейностью. В то же время значения коэффициента k в зависимости (2) закономерно увеличиваются от параллельно-рукавных разветвлений к главным рукавам сопряженных разветвлений (табл. 3), т.е. по мере упрощения их морфологии и упорядочения структуры потока. Однако при достаточно высокой тесноте связь самая низкая у вторых основных рукавов сопряженных разветвлений, что, очевидно, объясняется разной степенью их временного обмеления, разными причинами, вызвавшими перераспределение стока, другими различиями условий их формирования.

Для разветвлений с развитыми излучинами рукавов получены зависимости их основных параметров — радиуса кривизны (r) и шага (L) излучин от водности, которые также дифференцируются по типам разветвлений. Наиболее тесные связи характерны для сопряженных разветвлений (коэффициент корреляции 0,98); для пойменно-руслowych разветвлений они менее тесные (0,85 и 0,76). Параметры излучин одиночных разветвлений в целом отвечают зависимости, полученной для пойменно-руслowych разветвлений, однако имеют больший разброс. Радиусы кривизны излучин в разветвлениях 2-го порядка, образованных в рукавах сопряженных разветвлений, отвечают зависимости для сопряженных разветвлений. В сопряженных и одиночных разветвлениях рукава образуют по одной излучине (в главном и втором основном рукавах вершины излучин направлены в противоположные стороны, а сами излучины в плане имеют зеркальное отражение), тогда как в пойменно-руслowych каждый рукав, как правило, образует серию излучин, уступающих по величине параметров первым (рис. 5). Рукава параллельно-рукавных и односторонних разветвлений практически не образуют излучин.

Выводы:

— существенно уточнены представления о распределении морфодинамических типов русла, главным образом разветвлений, на средней и нижней Печоре по сравнению с предыдущими данными [Русловой режим..., 1994];

— установлено, что при преобладании разветвленного русла наиболее распространены сопряженные, одиночные, пойменно-руслowe и параллельно-рукавные разветвления, причем первые в основном характерны для среднего течения (выше слияния с р. Уса), последние — для нижнего течения; остальные встречаются в виде единичных образований;

— обосновано выделение главного рукава, относительная водность которого в меженьный период составляет >50%, среди основных рукавов, между которыми происходит рассредоточение стока и его перераспределение во времени в разные фазы водного режима и в ходе многолетних переформирований русла;

— определено оптимальное соотношение длины и ширины островов ($L_o/B_o = 3,8 \div 3,9$) разветвлений, которое обеспечивает гидравлическую выгоду их формы и характерно для одиночных и сопряженных разветвлений; для пойменно-руслowych разветвлений оно меньше (1,9), для остальных больше оптимального, что обеспечивает удлинение первых и развитие островов в ширину вторых;

— выявлено закономерное изменение относительной ширины островов (B_o/b_p) в зависимости от удельного среднемаксимального расхода воды от пойменно-руслowych разветвлений к сопряженным;

— показано, что ширина рукавов определяется их водностью при руслоформирующем расходе воды, причем полученные зависимости, дифференцируясь по типам русла, в то же время едины как для основных рукавов, так и для разветвлений 2-го порядка;

— получены зависимости радиуса кривизны и шага излучин основных рукавов сопряженных и пойменно-руслowych разветвлений от расходов воды в них. Выявленные зависимости для Печоры позволяют устанавливать изменения характеристик разветвлений при перераспределении стока между рукавами и при увеличении/уменьшении водности реки вследствие общих гидроклиматических изменений.

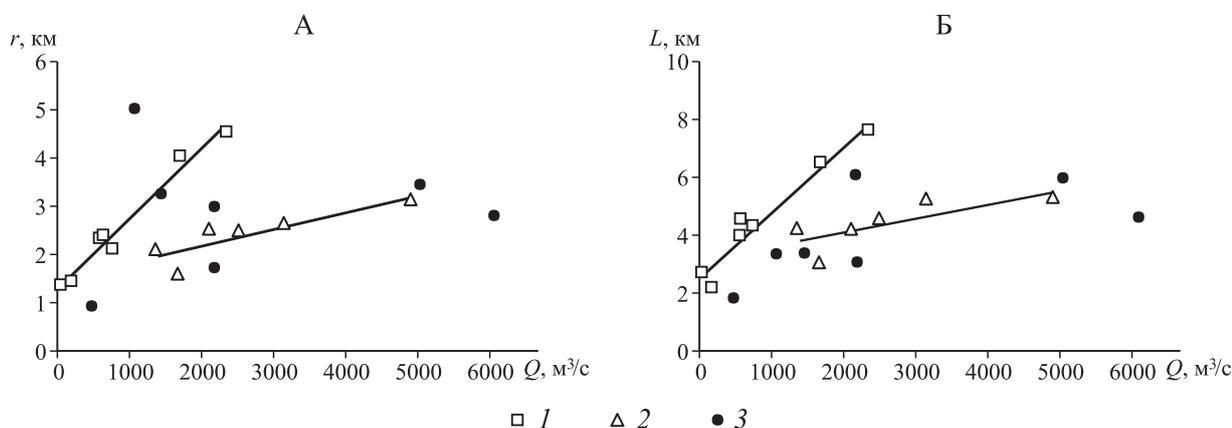


Рис. 5. Зависимости радиуса кривизны r (А) и шага излучин L (Б) от расхода воды в рукавах разветвлений Печоры: 1 — в сопряженных; 2 — в пойменно-руслowych; 3 — в одиночных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Алабян А.М.* Динамика потока и русла равнинных рек, разветвленных на рукава: Автореф. канд. дисс. М., 1991. 19 с.
- Alabyan A.M. Dynamika potoka i rusla ravninnykh rek, razvetvlennykh na rukava [Stream and lowland branched rivers dynamics], Avtoreferat kandidatskoy dissertatsii, Moscow, 1991, 19 p. (in Russian).
- Алексеевский Н.И., Чалов С.Р.* Гидрологические функции разветвленного русла. М., 2009. 240 с.
- Alekseevskiy N.I., Chalov S.R. Hidrologicheskie funktsii razvetvlennoy rusla [Hydrological functions of branched channels], Moscow, 2009, 240 p. (in Russian).
- Иванов В.В.* Условия формирования, гидролого-морфометрические зависимости и деформации относительно прямолинейных, неразветвленных русел: Автореф. канд. дисс. М., 1989. 23 с.
- Ivanov V.V. Usloviya formirovaniya, gidrologo-morfometricheskie zavisimosti i deformatsii otnositelno pryamolinykh, nerazvetvlennykh rusel [Formation conditions, hydrological-morphological relations and deformation of relatively straight non-branched channels]: Avtoreferat kandidatskoy dissertatsii, Moscow, MGU, 1989, 23 p. (in Russian).
- Маккавеев Н.И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
- Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v eyo basseine [Riverbed and erosion in the river basin], Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR, 1955, 347 p. (in Russian).
- Михайлов В.Н.* Динамика потока и русла в непривливаемых устьях рек // Тр. ГОИН. Вып. 102. 1971. 260 с.
- Mikhailov V.N. Dinamika potoka i rusla v neprilivnykh ustyakh rek [Stream and channel dynamics in non-tidal estuaries], Trudy GOIN, no 102, 1971, 260 p. (in Russian).
- Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. Вып. 36. 1964. 262 с.
- Proektirovanie sudovykh hodov na svobodnykh reках [Designing ship moves on the broad rivers], Trudy TsNIIÉVT, no 36, 1964, 262 p. (in Russian).
- Русловой режим рек Северной Евразии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 336 с.
- Ruslovy rezhim rek Severnoy Evrazii [Riverbed regime of rivers of Northern Eurasia], Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1994, 336 p. (in Russian).
- Спирidonов А.И.* Геоморфология европейской части СССР. М.: Высшая школа, 1978. 331 с.
- Spiridonov A.I. Geomorfologiya evropeyskoy chasti SSSR [Geomorphology of the european part of the USSR], Moscow, Vysshaya shkola, 1978, 331 p. (in Russian).
- Тарбеева А.М.* Формирование и эволюция островов в русле Оби // Эрозионные и русловые процессы и проблемы гидроэкологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. С. 202–208.
- Tarbeeveva A.M. Formirovanie i evolutsiya ostrovov v rusle Obi [Formation and evolution of islands in Ob riverbed], Eroziionnye i ruslovye processy i problemy gidroekologii, Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2004, pp. 202–208 (in Russian).
- Тарбеева А.М.* Formirovanie i evolutsiya ostrovov v rusle Obi [Formation and evolution of islands in Ob riverbed], Eroziionnye i ruslovye processy i problemy gidroekologii, Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2004, pp. 202–208 (in Russian).
- Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.
- Chalov R.S. Geograficheskie issledovaniya ruslovykh processov [Geographical studies of the channel processes], Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1979, 232 p. (in Russian).
- Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
- Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. V. 2. Morfodinamika rechnykh rusel [Science of the riverbed processes: theory, geography, praxis. V. 2. Morphodynamics of the riverbeds], Moscow, KRASAND, 2011, 960 p. (in Russian).
- Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В. и др.* Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.
- Chalov R.S., Alabyan A.M., Ivanov V.V. i dr. Morfodinamika rusel ravninnykh rek [Morphodynamics of channels of lowland rivers], Moscow, GEOS, 1998, 288 p. (in Russian).
- Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В.* Речные излучины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 371 с.
- Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Panin A.V. Rechnye izluchiny [River meanders], Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2004, 371 p. (in Russian).
- Baker V.R.* Stream-channel response to floods with examples from central Texas, Geol. Soc. Am. Bull., 1977, V. 88, no 8, pp. 1057–1071.
- Komar P.D.* Shape of streamlined island on Earth and Mars: Experiments and analyses of the minimum-drag form, Geology, 1983, no 11, pp. 651–654.

Поступила в редакцию
24.03.2014

E.A. Lvovskaya, R.S. Chalov

HYDROLOGIC-MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF DIVIDED CHANNEL OF THE PECHORA RIVER

Distribution of the morphodynamic types of channel is analyzed for the middle and lower courses of the Pechora River, a largest river of the European North, for which the channel processes were not yet studied. Channel braids of all known types, including those of 2-nd order, account for more than 80% of the river's length. Hydrologic-morphological analysis of divided channel of the Pechora River was carried out for the first time. Interrelations between the relative width of islands and branches and the flow characteristics (channel-forming and specific mean maximum water discharge) were established. Close hydrologic-morphological correlations were obtained for meanders in the branches of floodplain-channel, singular and joint braids. It was demonstrated that correlations depend on the type of braids and the order of branches, while the values of coefficients are of regional character. The branches were for the first time ever classified according to their importance into main ones (with the principal one among them) and secondary.

Key words: channel processes, morphodynamic types of channel, braids, branches, islands, morphometrics, hydrologic-morphological correlations.