

УДК 551.438.5

© 2018 г. Е.А. ЛЬВОВСКАЯ, Р.С. ЧАЛОВ*

**МОРФОДИНАМИКА РУСЕЛ БОЛЬШИХ РЕК СЕВЕРА ЕТР
И ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЙ**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия
E-mail: rschalov@mail.ru

Поступила в редакцию 06.12.2016

Дана оценка переформирования русел рек Северной Двины, Вычегды, Мезени и Печоры в их нижнем течении в прошлом, настоящем и будущем вследствие саморазвития русловых форм, периодических многолетних колебаний водности и возможных изменений при различных сценариях изменений водности рек в XXI в. (повышение/понижение). Русла рек Севера слабоустойчивые и преимущественно разветвленные, причем преобладают наиболее сложные их морфодинамические типы (параллельно-рукавные, пойменно-русовые разветвления). Роль антропогенного фактора в целом незначительна, особенно на Печоре и Мезени: дноуглубление и выправление русел для обеспечения водного пути приводит к их стабилизации, сопровождаемой упрощением морфологии. Полученные гидролого-морфологические зависимости для разветвлений позволили дать прогнозные оценки русловых переформирований при изменении водности рек в целом для их русел и основных рукавов в разветвлениях. При этом увеличение разветвленности русла может происходить как при увеличении водности рек благодаря активизации и развитию пойменных протоков, так и при уменьшении водности рек вследствие активизации зарастания осередков и их превращения в острова.

При повышении водности ожидается возникновение новых пойменно-русовых разветвлений и разветвленно-извилистого русла с последующим перераспределением расходов воды по основным рукавам. В одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных и пойменно-русовых разветвлениях в многоводные годы основной поток сосредоточится в относительно более прямолинейных или расположенных вдоль коренного берега рукавах. На участках относительно прямолинейного неразветвленного русла ожидается спрямление динамической оси потока за счет формирования побочневых протоков в тыловых частях побочней. Переформирования излучин Вычегды проявятся в активизации их продольного смещения за счет размыва вогнутых берегов в их нижних крыльях. Уменьшение стока выразится в сокращении водности вплоть до полного обмеления пойменных протоков и одного из рукавов пойменно-русовых разветвлений, объединения небольших островов и их присоединения к пойменным массивам, сведет к минимуму число случаев спрямления излучин. На излучинах русла и в рукавах пойменно-русовых разветвлений Вычегды следует ожидать распространения фронта размыва вогнутых берегов на всю привершинную их часть, а также образования излучин динамической оси потока или даже вторичных излучин на их крыльях. То же произойдет на участках относительно прямолинейного русла Мезени и нижней Вычегды из-за зарастания побочней. Значительное изменение ширины произойдет в главных рукавах всех типов разветвлений, причем сокращение водности приведет к большему изменению ширины рукавов, чем ее увеличение. Наименьшее изменение ширины рукавов ожидается в параллельно-рукавных разветвлениях. При увеличении их водности произойдет примерно одинаковое увеличение ширины основных рукавов, при уменьшении — ширина судоходных рукавов сократится сильнее.

Ключевые слова: русловые процессы, морфодинамика, разветвления русел, гидролого-морфологические зависимости, трансформация, прогнозные оценки, изменения водности, антропогенный фактор.

DOI: 10.7868/S043542811803001X

RIVER CHANNEL HYDROMORPHOLOGY IN THE NORTHERN PART OF THE EUROPEAN TERRITORY OF RUSSIA AND PROGNOSTIC EVALUATION OF THEIR CHANGES

E.A. LVOVSKAYA, R.S. CHALOV*

Lomonosov Moscow State University, Faculty of geography, Moscow, Russia

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

Summary

In paper we perform an assessment of channel dynamics in the lower courses of Rivers Severnaya Dvina, Mezen', Vychegda and Pechora in the past, present and future according to the development of channel forms, periodical long-term changes of water runoff and possible scenarios of hydroclimate trends in the XXI century. The study emphasized low channel stability of the northern rivers, prevalence of complex types of braided channel patterns. Fluvial response to human impacts have been evaluated, which is mostly related to channel dredging for navigation maintenance based on simplification of channel structure. Hydraulic geometry relationships have been used for predictive assessment of channel changes within braided reaches. Results indicate that the rise of braiding intensity will be related both to water flow increase through water delivery into floodplain branches and water flow decrease followed by modifications of bars to islands.

Keywords: channel processes, hydromorphology, channel deformations, braided channels, transformation, prognostic estimations, water runoff changes, human factor.

Введение

Большие реки Европейского Севера России (Сев. Двина и Вычегда, Мезень, Печора) в отношении изученности их руслового режима относятся к двум противоположным категориям: если первые две достаточно хорошо обеспечены разновременными картографическими и плановыми материалами, охватывающими период с конца XVIII и особенно с начала XX в., и на них проводились специальные русловые исследования, обобщенные в монографии [1], диссертациях и многочисленных статьях, то по Мезени и Печоре карты русел (лоцманские) имеются лишь с середины XX в., фиксируя их состояние через большие временные интервалы, а первые исследования русловых процессов на них выполнены только в начале XXI в. [2–5]. Вместе с тем происходящие климатические изменения (и, соответственно, водности рек) и снижение даже сравнительно небольшой антропогенной нагрузки на реки (резкое сокращение или полное прекращение, как на Мезени, дноуглубительных работ, обеспечивающих нормальные условия судоходства) требуют на основе закономерностей руслового режима разработки прогнозных оценок переформирования русел. Это необходимо из-за сопровождающей изменения активизации опасных проявлений русловых процессов, оптимизации путевых мероприятий в новых условиях и перспектив возрождения водных путей и вообще экономики Севера.

Реки Севера в отличие от рек других регионов ЕТР, находятся практически в естественном состоянии. Антропогенная нагрузка на них заключалась почти исключительно в выполнении работ по улучшению условий судоходства, причем лишь на Сев. Двине и Вычегде дноуглубительные работы (землечерпательные прорезы и выправительные сооружения) выполнялись в сравнительно больших объемах и оказывали влияние, иногда даже существенное, на морфологию русла и его переформирования. На Мезени и Печоре они заметной роли в русловом режиме не играли. Но во всех случаях эти работы приводились в соответствии с естественными тенденциями развития русел и поэтому не приводили к необратимым изменениям, повышая их устойчивость, сохраняя природный облик рек и обеспечивая гидроэкологическую безопасность.

Общая характеристика рек

В настоящей статье изложены результаты исследований Сев. Двины от г. Котласа (слияние с р. Вычегдой) до устья р. Пинеги, Вычегды от г. Сыктывкара (слияние с р. Сысолой) до устья, Мезени от слияния с р. Вашкой до устья р. Пезы и Печоры от г. Печоры

Характеристика водности больших рек Севера ЕТР

Пост	Расстояние от устья, км	$Q_{\text{ср}}$	$Q_{\text{ср.макс}}$	$Q_{30\text{-л-о}}^{**}$	$Q_{30\text{-з}}^{**}$
		м ³ /с			
<i>Северная Двина</i>					
Абрамково	472	1899	11848	1020	431
Звоз	233	2595	15699	1380	570
Усть-Пинега*	94	3237	21341	1740	694
<i>Вычегда</i>					
Сыктывкар	414	576	4718	284	130
Федяково	73	1018	6829	476	234
<i>Мезень</i>					
Малонисогорская	147	645	5913	324	129
<i>Печора</i>					
Усть-Шугор	1036	1073	9552	581	158
Усть-Цильма	425	3477	23406	1980	422
Оксино	141	4662	26058	3310	639

Примечание. * – пост находится ниже устья р. Пинеги – вершины устьевой области реки; ** – л-о – лето-осень, з – зима.

до устья р. Сулы, т.е. до верхней границы устьевых областей рек. Все реки характеризуются восточно-европейским типом водного режима с весенним половодьем продолжительностью от 1.5–2 месяцев на Сев. Двине, Вычегде и Мезени до 2.5–3 месяцев на Печоре, на которые приходится большая доля годового стока и проходят максимальные расходы воды (табл. 1), близкие по величине к верхнему интервалу руслоформирующих. Последние соответствуют затопленной пойме и имеют обеспеченность в пределах 1.3 (Вычегда) – 3.5% (Сев. Двина). Обеспеченность руслоформирующих расходов $Q_{\text{ф}}$, проходящих в бровках поймы, составляет от 4.1 (Вычегда) до 28% (Печора). На участках Мезени с врезанным руслом и поймой, представленной в основном островами, обеспеченность верхнего и среднего интервалов $Q_{\text{ф}}$ равна 0.8 и 2.0%. $Q_{\text{ф}}$ нижнего интервала (межень) на Печоре отсутствует, но на остальных реках характеризуется повышенной обеспеченностью – 23.9% на Вычегде, 34% на Мезени и 35.1–56.1% на Сев. Двине [6, 7], что обеспечивает интенсивные переформирования перекатов в межень.

Согласно существующим оценкам [8] значительных изменений стока рек в XX – начале XXI в. не наблюдалось, и лишь на Печоре отмечен слабый тренд к постепенному увеличению водности. На всех реках чередуются периоды повышенной и пониженной водности разной продолжительности.

По длине всех рек закономерно увеличивается сток наносов и его составляющих, причем доля стока влекомых наносов достаточно велика, колеблясь в пределах 17–35% и уменьшаясь вниз по течению, как и сама величина стока влекомых наносов из-за аккумулятивной направленности вертикальных деформаций. Исключение составляет р. Вычегда, русло которой врезается (табл. 2) [6, 9]. Вместе с тем при одинаковой водности сток взвешенных наносов больше на участках рек с широкопойменным руслом.

Северная Двина, Мезень и Печора, текущие на север, характеризуются сложным ледовым режимом и регулярным заторообразованием, сопровождающимся наводнениями. На рубеже XX–XXI вв. этот процесс активизировался, что связано, в том числе, с прекращением дноуглубительных работ [11]. Последние в известной мере нейтрализовали направленную аккумуляцию наносов, которая теперь восстановилась, глубина на перекатах и пропускная способность русла для ледохода уменьшилась.

Характеристика стока наносов рек Севера ЕТР [6, 9]

Пост	$N_{ш}^*$	Взвешенные наносы		Влекомые наносы**		Соотношение W_R и $W_G, \%$	
		$R, \text{ кг/с}$	$W_R, \text{ тыс. т}$	$G, \text{ кг/с}$	$W_{cp}, \text{ кг/с}$	W_G/W_R	W_G/W_{R+G}
Северная Двина							
Абрамово	10.6	42.5	1320	22.5	710	53	35
Звоз	11.0	56.5	1793	19.4	610	34	25
Вычегда							
Сыктывкар	9.3	30.0	946	14.3	450	48	32
Федяково	9.7	32.0	1000	17.1	540	65	35
Мезень							
Малонисогорская	9.0	19.8	627	4.1	129	20	17
Печора							
Усть-Шугор	9.1	—	—	146	4616	—	—
Усть-Цильма	10.9	253.7	802.1	97.5	3076	38	28

Примечание. * – порядок реки по А. Шайдеггеру; ** – расчеты стока влекомых наносов проводились по методике Н.И. Алексеевского [10].

Руслообразующие наносы на всех реках песчаные (средне- и крупнозернистые пески) со значительной примесью гравия (до 10%). Такой состав наносов (при уклонах до 0.10‰) определяет абсолютное преобладание слабоустойчивого русла (число Лохтина $L < 2-5$, коэффициент стабильности Н.И. Маккавеева $K_c = 6-15$). На Сев. Двине на отдельных участках и на Вычегде в верхней половине нижнего течения реки (Сыктывкар – граница Республики Коми и Архангельской области) русло относительно устойчивое ($L = 5-10$, $K_c = 15-20$), Мезень в нижнем течении имеет только слабоустойчивое русло. Для Печоры благодаря масштабному искажению (водность ее в 1.5, 4.5 и 7 раз превышает водность Сев. Двины, Вычегды и Мезени, соответственно) показатели устойчивости больше, о чем свидетельствует связь между L и K_c (рис. 1): на нижней Печоре (ниже устья р. Усы) она отклоняется вправо относительно линий зависимости для остальных рек, обуславливая увеличение L при одном и том же значении K_c и наоборот. Поэтому слабоустойчивому руслу нижней Печоры отвечают значения $L = 10-17$ при $K_c = 5-10$. Такие же соотношения L и K_c были получены для средней Лены [12].

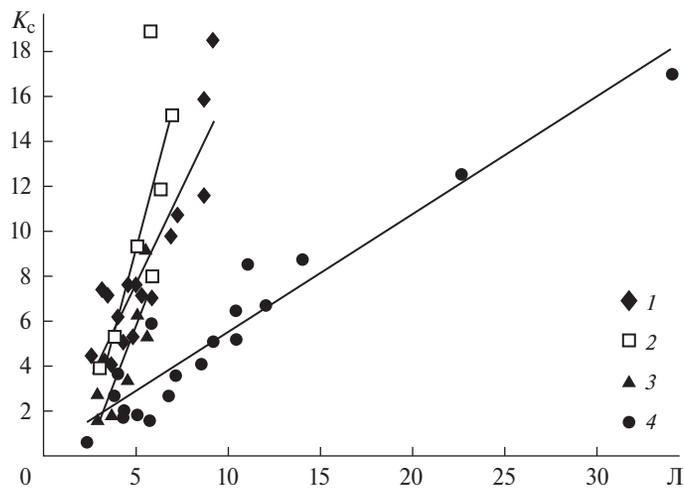


Рис. 1. Связь коэффициентов стабильности русла Н.И. Маккавеева (K_c) и чисел Лохтина (L) для Сев. Двины (1), Вычегды (2), Мезени (3) и Печоры (4)

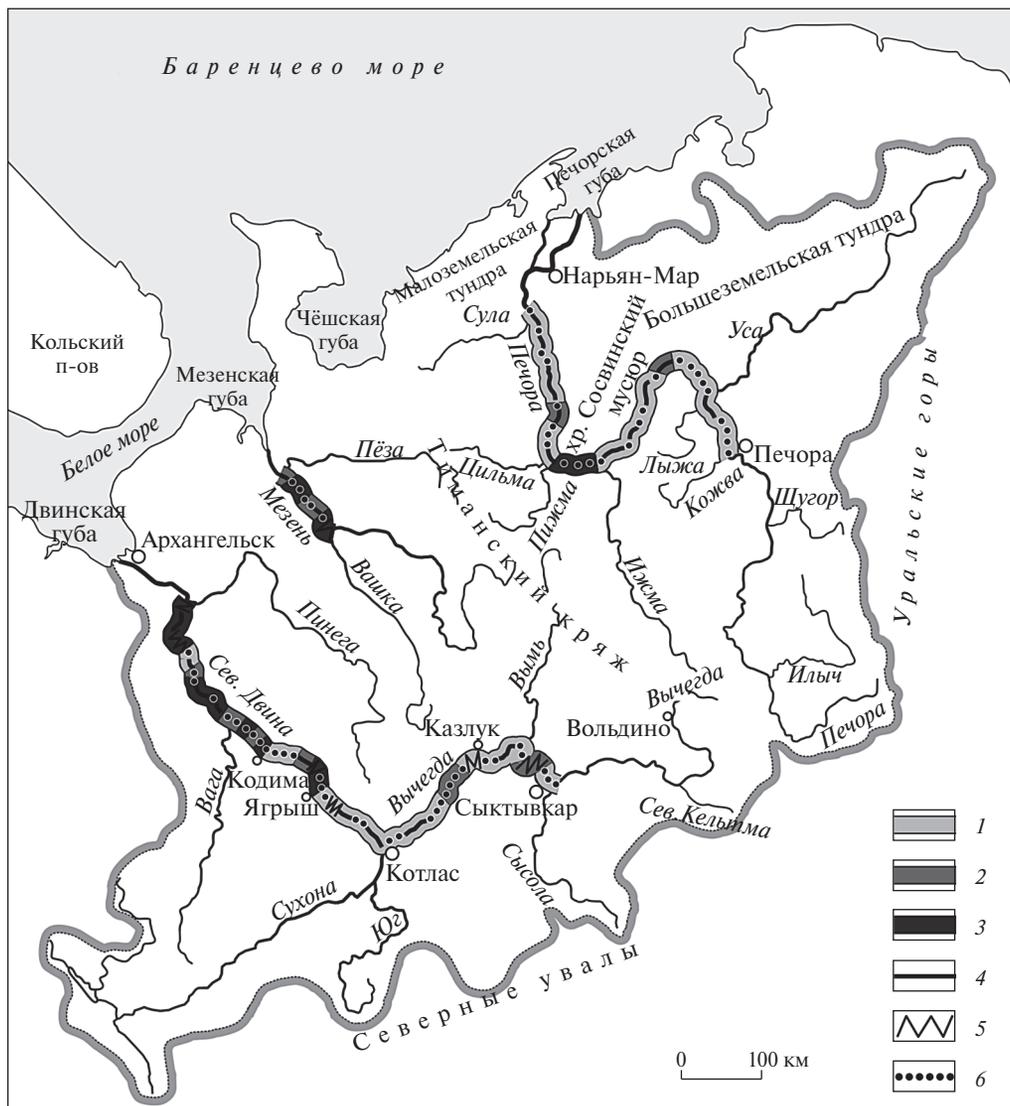


Рис. 2. Схема распространения русел разного морфодинамического типа на больших реках Севера ЕТР: 1 – широкопойменное; 2 – адаптированное; 3 – врезанное; 4 – относительно прямолинейное, неразветвленное; 5 – извилистое; 6 – разветвленное

В геолого-геоморфологическом отношении (рис. 2) только на Печоре, пересекающей сложенную легко размываемыми толщами четвертичных отложений Печорскую низменность, абсолютно преобладают свободные условия развития русловых деформаций и широкопойменное русло. Исключение составляет участок реки между устьями рек Ижмы и Пижмы длиной 70 км, где река пересекает отроги Тиманского кряжа, обуславливающие ограниченность русловых деформаций (русло здесь врезанное). Все нижнее течение Мезени имеет преимущественно врезанное русло (ограниченные условия развития русловых деформаций); лишь местами долина реки расширяется и русло становится адаптированным, сопровождаясь неширокой поймой. На Вычегде, как и на Печоре русло в основном широкопойменное (свободные условия развития русловых деформаций),

**Распространение морфодинамических типов русел на больших реках Севера ЕТР
(числитель – суммарная протяженность, км; знаменатель – доля от протяженности, %)**

Тип русла		Северная Двина	Вычегда	Мезень	Печора
геоморфологический	морфодинамический				
Широкопойменное	разветвленное	101.5/19	101.5/30	–	313/47
	относительно прямолинейное	64.5/12	31/7	–	145/21
	извилистое	12.5/2	94/22	–	45/7
	Всего	178.5/33	249/59	–	503/75
Адаптированное	разветвленное	53.5/10	57/13	8/7	14/2
	относительно прямолинейное	41.5/7	99/24	30/26	41/5
	извилистое	–	15/4	5/5	8/1
	Всего	95/18	171/42	43/37	53/8
Врезанное	разветвленное	101.5/19	–	53.5/47	61/9
	относительно прямолинейное	69.5/12	–	3/3	48/7
	извилистое	102/19	–	14/12	5/1
	Всего	273/51	–	70.5/62	114/17
Длина участка, км		546.5	420	113.5	670

и только посередине нижнего течения, где долина реки сформирована в моренных отложениях, оно адаптированное. Широкопойменное русло Вычегды в низовьях сопрягается с таковым на Сев. Двине: здесь легкоразмываемые аллювиально-дельтовые четвертичные отложения являются источником обильного поступления в реку наносов (свободные условия развития русловых деформаций) и причиной формирования многочисленных перекатов и сложноразветвленного русла. Ниже с. Ягрыша река пересекает моренные гряды и территории, сложенные известняками и гипсами, и котловины между ними, вследствие чего вплоть до устьевой области реки для нее характерно сложное чередование свободных и ограниченных условий развития русловых деформаций, врезанного, иногда имеющего вид каньона в отвесных гипсовых берегах, и широкопойменного русла.

В целом на больших реках Севера более половины их длины занимают широкопойменные русла (53%), на врезанные приходится 26%, на адаптированные (для них характерно соотношение $b_p < B_n < 2-3b_p$, где B_n – ширина поймы, b_p – ширина русла [13]) – 21%, причем первые отсутствуют в нижнем течении Мезени, а врезанное – на Вычегде (табл. 3).

Морфодинамические типы русла, их распространение и гидролого-морфологический анализ

Среди морфодинамических типов русла на рассматриваемых реках преобладает разветвленное (табл. 3), которое, с учетом разветвлений второго-третьего порядков (для них ширина острова $B_o < 0.4b_p$, где b_p ширина русла выше узла разветвления [14]), сформировавшихся в относительно прямолинейном русле, занимает около 70% длины. Такие разветвления наиболее характерны для широкопойменного русла, хотя они встречаются и в адаптированном и, особенно, во врезанном русле. На меандрирующий Вычегде, главным образом в низовьях, в шпорах излучин также образуются острова (разветвлено-извилистое русло); на Сев. Двине и Печоре отдельные свободные излучины (2 и 7% длины русла, соответственно) представлены только этой их разновидностью.

Разветвленные русла представлены практически всеми известными морфодинамическими типами (рис. 3). Среди них наиболее распространены параллельно-рукавные

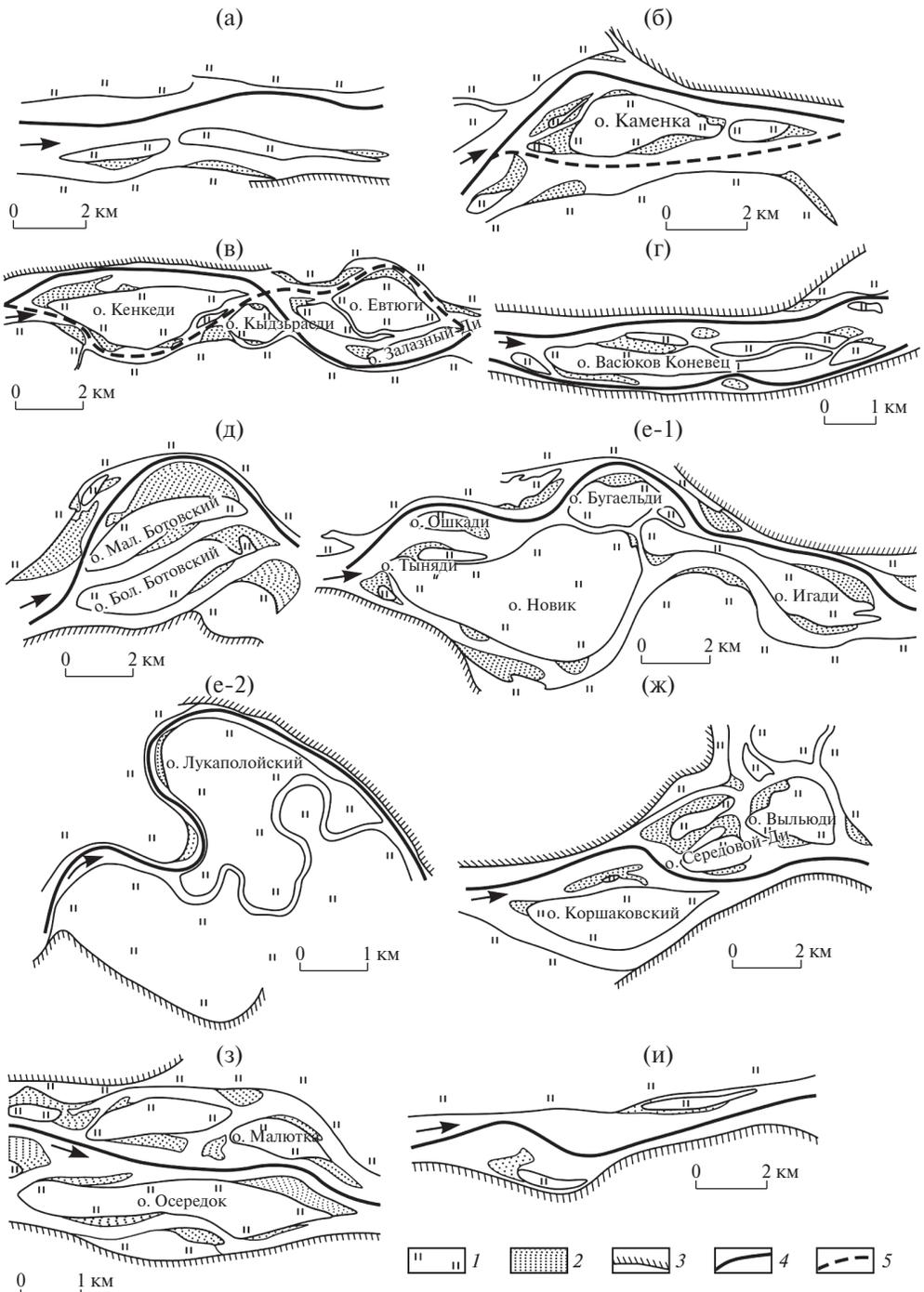


Рис. 3. Основные типы разветвленных русел на реках Севера ЕТР:

(а) – одностороннее (Печора); (б) – одиночное (Печора); (в) – сопряженное (Печора); (г) – параллельно-рукавное (Мезень); (д) – разветвлено-извилистое (Сев. Двина); (е-1) – пойменно-русловое в разветвленном русле (Печора); (е-2) – пойменно-русловое в меандрирующем русле (Вычегда); (ж) – дельтовое (слияние Печоры с Ижмой); (з) – двустороннее (Сев. Двина); (и) – прибрежные (Печора).

1 – пойма; 2 – прирусловые отмели; 3 – коренной берег; 4–5 – положения главного течения реки

(24% общей протяженности всех разветвлений), одиночные (20%), односторонние (16%), пойменно-русловые (15%) и сопряженные (11%). Встречаются также чередующиеся односторонние разветвления, разветвления в узлах слияния рек (Сев. Двины и Вычегды, Сев. Двины и Ваги, Печоры и Лыжи, Печоры и Ижмы), а также двусторонние (рис. 3, з) и прибрежные (рис. 3, и). Две последние разновидности до сих пор не включались в морфодинамическую классификацию речных русел МГУ [15] и как самостоятельный тип русла выделены впервые. Двусторонние разветвления образованы цепочками островов, вытянутых вдоль противоположных берегов реки при относительной прямолинейности русла в целом и сосредоточенности большей части расхода воды в центральном рукаве; второстепенные рукава между островами и береговой поймой или коренным (террасовым) берегом маловодные. Острова, образующие прибрежные разветвления, как правило, встречаются в местных расширениях русла, заполняя вогнутости одного из берегов. Чаще такие разветвления не определяют морфодинамический тип русла, формируясь между звеньями сопряженных разветвлений или встречаясь в виде отдельных образований в русле любого другого типа, лишь усложняя его морфологический облик.

Пойменно-русловые разветвления на Сев. Двине и Печоре, как и разветвления других типов, связаны с эволюцией островов и островных массивов. По водности основные рукава этих разветвлений равноценны практически во все фазы водного режима и в разные по водности годы. На Вычегде, русло которой меандрирует, пойменно-русловые разветвления формируются в результате спрямления серии (до 5–6) излучин русла там, где река по диагонали перемещается от одного борта долины к другому. Вследствие этого во время половодья (при руслоформирующем расходе воды верхнего интервала – при затопленной пойме) пересекаются оси пойменного и руслового потоков. В этих условиях по “старому” руслу, образуящему длинный пологий перевал, в многоводное половодье проходит больший расход воды, и он получает импульс к развитию, тогда как в маловодные годы – “новому” руслу соответствует короткий перевал. В итоге в многолетнем плане оба рукава оказываются примерно равноценными. Дальнейшие переформирования пойменно-русловых разветвлений связаны, таким образом, с периодическими перераспределениями расходов воды по рукавам в многоводные и маловодные половодья (или периоды лет).

Распространение разветвлений на реках неодинаково. Наибольшее число их типов представлено на Сев. Двине и Печоре, наименьшее – на Мезени, где абсолютно преобладают параллельно-рукавные. На Вычегде разветвления не образуют протяженных морфологически однородных участков, будучи представленными либо самими морфологическими простыми формами – одиночными, либо пойменно-русловыми разветвлениями, а в низовьях – разветвлено-извилистым руслом.

Относительно прямолинейное неразветвленное русло встречается на всех реках, располагаясь преимущественно вдоль коренных берегов. Часто в нем встречаются разветвления второго порядка (рис. 4) или прибрежные разветвления.

Излучины русла широко распространены только на Вычегде, где они составляют 26% протяженности нижнего течения реки. Среди них преобладают свободные (22%), преимущественно развитые, характеризующиеся значениями $l/L = 1.35–1.55$ (здесь L – шаг излучины, l – ее длина), что связано с их спрямлением при превышении этого соотношения вследствие прохождения

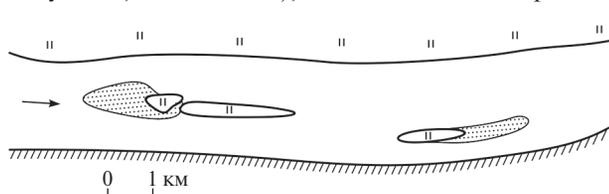


Рис. 4. Относительно прямолинейное русло р. Печоры с разветвлениями второго порядка
Усл. обозначения см. рис. 3

излучины вследствие прохождения Q_{Φ} при затопленной пойме, большой глубины и продолжительности ее затопления и в основном луговым ее характером. На остальных реках свободные излучины (кроме Мезени, где они вообще отсутствуют) образуют по одной серии из двух излучин. Более распространены

вынужденные и адаптированные излучины, а на Сев. Двине 19% от длины реки составляют, как правило, пологие врезанные излучины (все ниже устья Ваги).

На Печоре у с. Усть-Цильма и Вычегде у слияния с р. Вымью, где долина делает крутые коленообразные изгибы, сформировались своеобразные обтекающие излучины [5], выпуклый берег которых коренной, вогнутый – пойменный. На Печоре в пределах такой излучины (рис. 5) шпору излучины образует возвышенность – “хребет” Сосьвинский Мусюр, а левобережная пойма имеет ширину $B_{II} > 2-3b_p$. Радиус кривизны излучины $r = 4$ км при ширине русла $b_p = 1.5$ км. Очевидно, наличие коренного берега в шпоре излучины обуславливает возникновение особых гидравлических условий, аналогичных формированию прямолинейных русел вдоль коренных берегов [14], которые оказывают на структуру и динамику потока большее воздействие, чем перекосы водной поверхности на изгибе большой реки. Кроме того, на формирование излучины оказывают влияние притоки – Пижма и Цильма, выносы наносов из которых “отклоняют” реку к правому коренному

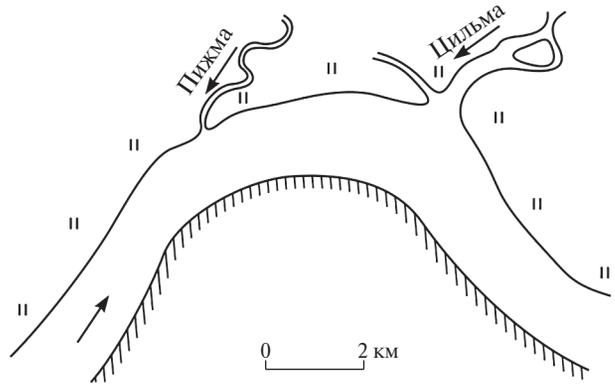


Рис. 5. Обтекающая излучина на р. Печоре
Усл. обозначения см. рис. 3

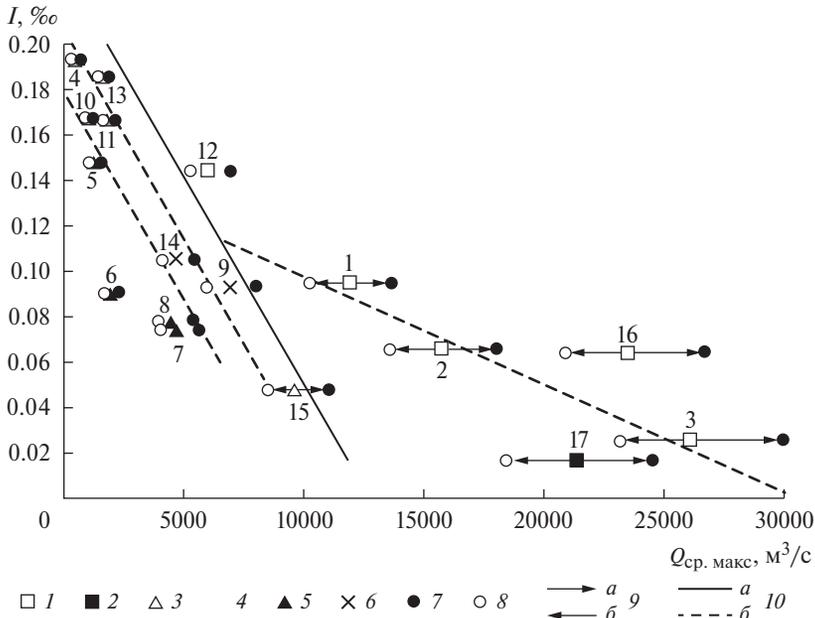


Рис. 6. QI-диаграмма для больших рек Севера ЕТР

Разветвления: 1 – сложные (параллельно-рукавные, пойменно-русловые); 2 – одиночные и односторонние излучины; 3 – врезанные, 4 – сегментные развитые и петлеобразные, 5 – сегментные пологие и провранные; 6 – относительно прямолинейное неразветвленное русло; положение точек: 7 – при увеличении водности, 8 – при уменьшении водности; 9 – направление трансформации типа русла при увеличении (а) или уменьшении (б) водности; 10 – линии, разделяющие основные морфодинамические типы русла (а) и разновидности морфодинамических типов русла (б)

берегу. Очевидно, имеет значение и нарушение “правила Миловича”, согласно которому при $r < 2-3b_p$ динамическая ось потока прижимается к выпуклому берегу излучины [13].

Условия распространения русел разного морфодинамического типа на реках Севера характеризует QI -диаграмма (рис. 6), согласно которой тип русла определяется мощностью потока [14]. Расположение точек, соответствующих различным типам русла, для рек Севера ЕТР в общем отвечает известной закономерности: при меньшей мощности потока формируются меандрирующие русла (минимум значения QI), тогда как наибольшая мощность потока соответствует разветвленным руслам, причем точки более сложных разветвлений располагаются в правой верхней области максимальных мощностей потока. Точки, относящиеся к относительно прямолинейному, неразветвленному руслу, не образуют отдельную область на диаграмме, располагаясь между извилистым и разветвленным руслами. Точки извилистых русел образуют единую область, в верхней части которой (повышенный уклон, меньшая водность) располагаются петлеобразные и крутые сегментные излучины, в нижней части – пологие и развитые сегментные, прорваные излучины (меньше уклоны и большая водность).

Разветвленные русла формируются при расходе воды ($Q_{\text{ср.макс}} > 4000 \text{ м}^3/\text{с}$ и уклоне $I < 0.16\%$). При этом в области их распространения большая мощность потока соответствует пойменно-русовым и параллельно-рукавным разветвлениям, меньшая – односторонним.

Между параметрами излучин и разветвлений (они определялись в соответствии с [13–18]), с одной стороны, и характеристиками водности реки ($Q_{\text{ср}}$, $Q_{\text{ср.макс}}$) устанавливаются вполне определенные соотношения. Для излучин Вычегды гидролого-морфологические зависимости были разработаны А.С. Завадским [16, 17]. Для разветвленных русел больших северных рек получены зависимости ширины рукавов $b_{\text{рук}_\phi}$ при руслоформирующем расходе воды от его величины $Q_{\text{фрук}}$ в них (k и a – коэффициенты):

$$b_{\text{рук}_\phi} = kQ_{\text{фрук}} + a, \quad (1)$$

относительной ширины островов $\frac{B_o}{b_p}$ от удельного среднemaxимального расхода воды $q_{\text{макс}} = \frac{Q_{\text{ср.макс}}}{b_p}$ (здесь B_o – ширина острова, b_p – ширина русла выше узла разветвления),

$$\frac{B_o}{b_p} = kq_{\text{макс}} + a, \quad (2)$$

а также основных параметров излучин рукавов в разветвлениях ($r_{\text{рук}}$ – радиус кривизны, $L_{\text{рук}}$ – шаг) от $Q_{\text{фрук}}$ в рукавах и их ширины в вершинах излучин рукавов $b_{\text{рук}_\phi}$, которые дифференцируются по типам разветвлений и в зависимости от значимости рукава (основные, второстепенные).

Коэффициент k в уравнении связи (1) уменьшается от пойменно-русовых к сопряженным разветвлениям (табл. 4), т.е. по мере упрощения их морфологии и упорядочения

структуры потока. Иная последовательность изменения коэффициентов – увеличение от прибрежных и параллельно-рукавных к пойменно-русовым характерна для зависимости (2) (табл. 5). Причем для пойменно-русовых разветвлении они неодинаковы на Сев. Двине, Мезени и Печоре (разветвленное русло) и на Вычегде (меандрирующее русло), а также для одиночных разветвлений, которые на Сев. Двине образуют морфологические однородные участки, а на

Таблица 4

**Коэффициенты уравнения (1)
и соответствующие им коэффициенты
корреляции R**

Разветвления	k	a	R
Пойменно-русовые	0.750	158	0.83
Параллельно-рукавные	0.072	275	0.93
Одиночные	0.072	60	0.91
Односторонние	0.063	131	0.86
Сопряженные	0.035	419	0.88

Коэффициенты в уравнении (2) и соответствующие им коэффициенты корреляции R

Разветвления (река)	k	a	R
Пойменно-русловые (Вычегда)	2.65	-17.86	0.92
Пойменно-русловые (Печора, Сев. Двина)	0.09	1.78	0.92
Одиночные (Печора, Сев. Двина)	0.15	0.73	0.88
Одиночные (Вычегда)	0.20	-0.70	0.96
Сопряженные (все реки)	0.32	-0.70	0.94
Односторонние	0.12	-0.46	0.98
Параллельно-рукавные	0.09	-0.27	0.87
Прибрежные	0.95	-0.12	0.82

Таблица 6

Соотношение L_o/B_o на больших реках Севера ЕТР и коэффициента корреляции для разных типов разветвлений

Разветвления	Северная Двина		Вычегда		Мезень		Печора	
	L_o/B_o	R	L_o/B_o	R	L_o/B_o	R	L_o/B_o	R
Пойменно-русловые	3.2	0.6	1.3	—	—	—	1.9	0.9
Одиночные	3.6	0.9	3.6	0.8	—	—	3.8	0.8
Сопряженные	—	—	—	—	—	—	3.9	0.8
Односторонние	4.0	0.5	4.1	0.7	3.4	0.7	4.3	0.5
Параллельно-рукавные	5.7	0.7	—	—	5.8	—	8.1	—

Вычегде представлены отдельными узлами, разделяющими участки с относительно прямолинейным неразветвленным руслом (рис. 2).

Соотношение длины острова к его ширине $\frac{L_o}{B_o}$ также зависит от типа разветвления, увеличиваясь от пойменно-русловых к параллельно-рукавным (табл. 6), т.е. в этом направлении острова приобретают все более вытянутую форму. Однако при общей тенденции изменений коэффициенты различны на всех реках.

Ретроспективный (за исторический период, охваченный съемками) анализ переформирований русел рек

Своеобразие переформирований русел больших рек Севера ЕТР заключается в том, что они осуществляются при естественном водном режиме (отсутствуют регулирующие сток воды и наносов гидроузлы) и условно ненарушенном русловом режиме. Русла рек сохранялись как природные объекты, а трасса судового хода на Сев. Двине и Вычегде лишь “закреплялась” в оптимальном положении [1].

Деформации русел рек носили как периодический характер, так и имели направленные тенденции. Основными факторами переформирований служили многолетние колебания стока, смещение побочной перекатов, перекрывающих заходы в рукава и протоки, вызывая их обмеление, саморазвитие форм русел, в частности изменение степени развитости излучин и их спрямление, и изменение условий формирования (появление дополнительных источников поступления наносов, расположение русла вдоль коренного берега, дноуглубительные и выправительные работы).

Чередование многоводных и маловодных периодов влияет на интенсивность смещения побочной и, следовательно, на скорость перераспределения стока между рукавами.

Для Сев. Двины, Мезени и Печоры (выше устья р. Усы) из-за слабой устойчивости русла характерны высокие скорости смещения побочной, в связи с чем они не успевают закрепиться растительностью, и изменения водности рукавов происходят за период от нескольких лет до 40–50 лет. Это определяет относительно короткую продолжительность периодов развития и обмеления рукавов и служит одной из причин квазистабильного положения островов и пойменных ответвлений в многолетнем плане. На Сев. Двине периодическое перераспределение расходов воды по рукавам разветвлений произошло в 12 (38%) из 32 разветвлений. На Мезени из-за высокой динамичности гряд перемещение основного потока, развитие и обмеление рукавов параллельно-рукавных разветвлений и проток возле осередков (на относительно прямолинейных участках) наблюдается практически постоянно. На Печоре периодическое перераспределение стока воды между смежными рукавами случается реже: за период вторая половина XX – начало XXI в. полные циклы зафиксированы только в двух разветвлениях – пойменно-руслонном (о-в Кызьрасди, выше слияния с р. Усой) и одиночном (о-в Каменка в нижнем течении).

Изменение положения основного потока присуще не только разветвлениям, проявляясь в его переходе из одного рукава в другой, но и участкам относительно прямолинейного русла, где оно обусловлено взаимным расположением побочной перекатов и их смещением. При наличии коренного берега динамическая ось потока обычно закрепляется вдоль него на долгие годы, русло здесь углубляется и стабилизируется [13, 18]. Учет этой закономерности позволил закрепить русло нижней Вычегды разработкой прорезей и возведением дамб, перекрывающих рукава у противоположного пойменного берега. Сам прием такого регулирования русла получил название “правило ведущего берега”. Однако в естественных условиях это правило выполняется не всегда. Так, если в годы повышенной водности реки происходит спрямление динамической оси потока за счет отторжения побочной и развития рукавов, расположенных вдоль ведущего берега, то в маловодные периоды динамическая ось потока искривляется, огибая побочные перекатов, располагающиеся в шахматном порядке, и следуя направляющему воздействию неровностей коренного берега. Это наблюдалось в нижнем течении Вычегды до проведения выправительных работ.

Относительной стабильностью отличаются участки русла, испытывающие направляющее воздействие выступов коренного берега. Их влияние наиболее ярко проявляется на Мезени, где они способствуют сосредоточению большей части расхода воды в системе рукавов параллельно-рукавных разветвлений, проходящих то у одного, то у другого берега. Такие же участки встречаются на Печоре, на которой нарушена последовательность развития рукавов у противоположных берегов в системе сопряженных разветвлений у о-ва Шипди: основной поток сосредоточен в левом рукаве, проходящем вдоль коренного берега, так как у о-ва Лебедь и в районе с. Брыкаланска мысы правого коренного берега определяют стабильное положение основного расхода воды в левых рукавах, на Сев. Двине у д. Кодима и др. Направляющее воздействие выступов коренных берегов в ряде случаев нейтрализуется смещением побочной. Так, на Мезени в нижнем крыле Нисогорской излучины основной поток направляется мысом левого коренного берега в правый рукав, однако образующийся у правого берега побочень периодически отклоняет поток в левые рукава расположенного ниже параллельно-рукавного разветвления.

Заращение прирусловых отмелей, образующихся ниже выступов коренных берегов, способствует закреплению положения основного потока на Мезени, хотя в спрямляющие их побочные протоки отвлекается значительная доля расхода воды. Вместе с тем, высокие скорости смещения побочной перекатов на перевалах от одного коренного берега к другому препятствуют их закреплению. Поэтому русловые деформации здесь носят периодический характер.

Развитие излучин как самого русла, так и рукавов разветвлений носит на реках Севера направленный характер, выражаясь в постепенном увеличении их кривизны за счет размыва вогнутых берегов в их вершинах и на крыльях. Как правило, в многоводные

периоды более интенсивно размываются вогнутые берега излучин как самого русла, так и рукавов разветвлений. Так, в многоводный период 1950-х гг. на Сев. Двине и Вычегде активизировался размыв берегов свободных излучин и вписанной излучины (Толоконной горы). В эти годы скорости размыва вогнутых берегов увеличились почти в 2–3 раза. Однако скорости размыва вогнутых берегов в вершине и на крыльях излучин различаются и могут быть разнонаправленными в разные по водности годы. Для нижней в серии свободных излучин Печоры (809–798 км) наибольшие скорости размыва вогнутого берега в ее вершине отмечались в годы с относительно малой водностью, при этом степень развитости излучин I/L увеличивалась; в многоводные периоды наиболее активно размывался вогнутый берег в нижнем крыле излучины, способствуя интенсификации ее продольного смещения.

Маловодные периоды способствуют увеличению кривизны излучин и развитию извилин динамической оси потока на их крыльях. Многоводные периоды способствуют спрямлению излучин (с конца XVIII в. на нижней Вычегде спрямилось пять излучин), в том числе при антропогенном вмешательстве, которое, однако, лишь ускорило этот процесс, не нарушая направленности переформирований. Спрямление излучин является завершающим этапом развития излучины, причем в многоводные годы это отмечается на более ранних стадиях (при меньших значениях I/L).

На продолжительные многоводные периоды приходится наиболее существенные деформации русла. Таково спрямление серии излучин на Сев. Двине между населенными пунктами Федотовская и Красноборск [19] (рис. 7) и переход русла от правого к левому борту долины на 590–555 км. Основные переформирования узлов слияния рек Сысолы и Вычегды, Вычегды и Сев. Двины, пришедшиеся на 1950-е гг. происходили, когда на протяжении нескольких лет наблюдался многолетний максимум средних годовых и максимальных расходов воды.

Обмеление крупных проток и рукавов (Песчанский полый на Сев. Двине, полый Лука, Иртовский, Ленский, Прось на Вычегде) зафиксированы в конце XVIII в.

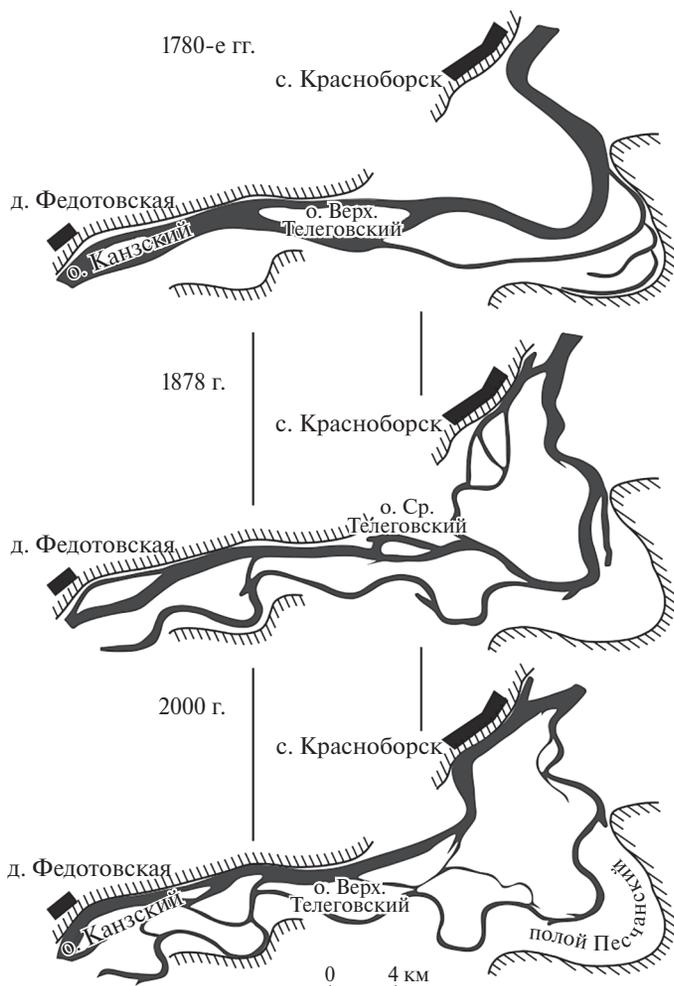


Рис. 7. Спрямление излучин Сев. Двины в районе с. Красноборска (по [19])

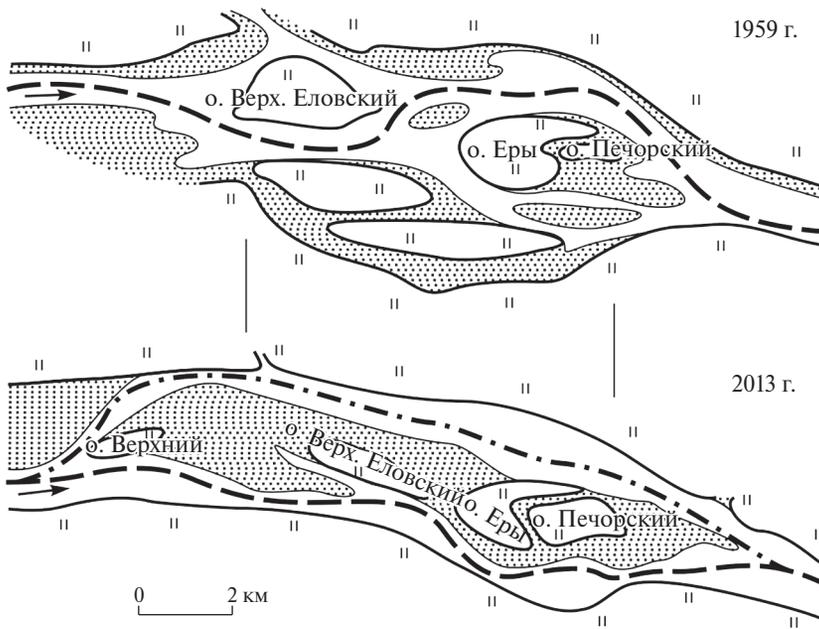


Рис. 8. Трансформация сопряженных разветвлений в параллельно-рукавные на р. Печоре
Усл. обозначения см. рис. 3

и в 1940-е гг., когда сток воды характеризовался длительным многолетним минимумом средних годовых расходов воды и снижением обеспеченности половодий. В последние годы тенденция к сокращению водности активизировавшихся в многоводный период второй половины XX в. рукавов на Вычегде вновь возобновилась, отражая сокращение водности реки в целом.

При высокой устойчивости русла переформирования носят направленный характер вне зависимости от периодических колебаний водности и нередко сопровождаются сменой морфодинамического типа русла или его усложнением при повышении водности. Наиболее яркими примерами послужили трансформации во второй половине XX в. сопряженных разветвлений нижней Печоры (ниже устья р. Цильмы) в параллельно-рукавные без антропогенного вмешательства (рис. 8).

В то же время на фоне пониженной водности в районе с. Телегово на Сев. Двине при слабой устойчивости русла произошло упрощение системы разветвлений. Здесь вследствие развития рукава вдоль коренного берега сопряженные разветвления превратились к середине XX в. в одиночные, а затем в односторонние вследствие разработки капитальных прорезей, отторжения надвигающихся на левый рукав побочной и перекрытия правого рукава дамбами (рис. 9). Это же привело к упрощению морфологии русла нижней Вычегды: одиночные → односторонние разветвления → относительно прямолинейное неразветвленное русло.

Вместе с тем направленное развитие может быть связано и с другими факторами русловых процессов. На Сев. Двине на переформирования русла влияет четковидное строение долины: в расширениях перед сужениями днища происходит наиболее активная аккумуляция наносов. Дополнительным источником наносов является размыв песчаной Толоконной горы, начавшийся в XIX в. и продолжающийся до сих пор. Его влияние прослеживается вплоть до устья Ваги. В результате здесь образовались параллельно-рукавные Паячно-Ягрышское [1, 20], Слудско-Липовецкое (рис. 10) и Конецгорское разветвления, произошло формирование дельтового разветвления в узле слияния с Вагой.

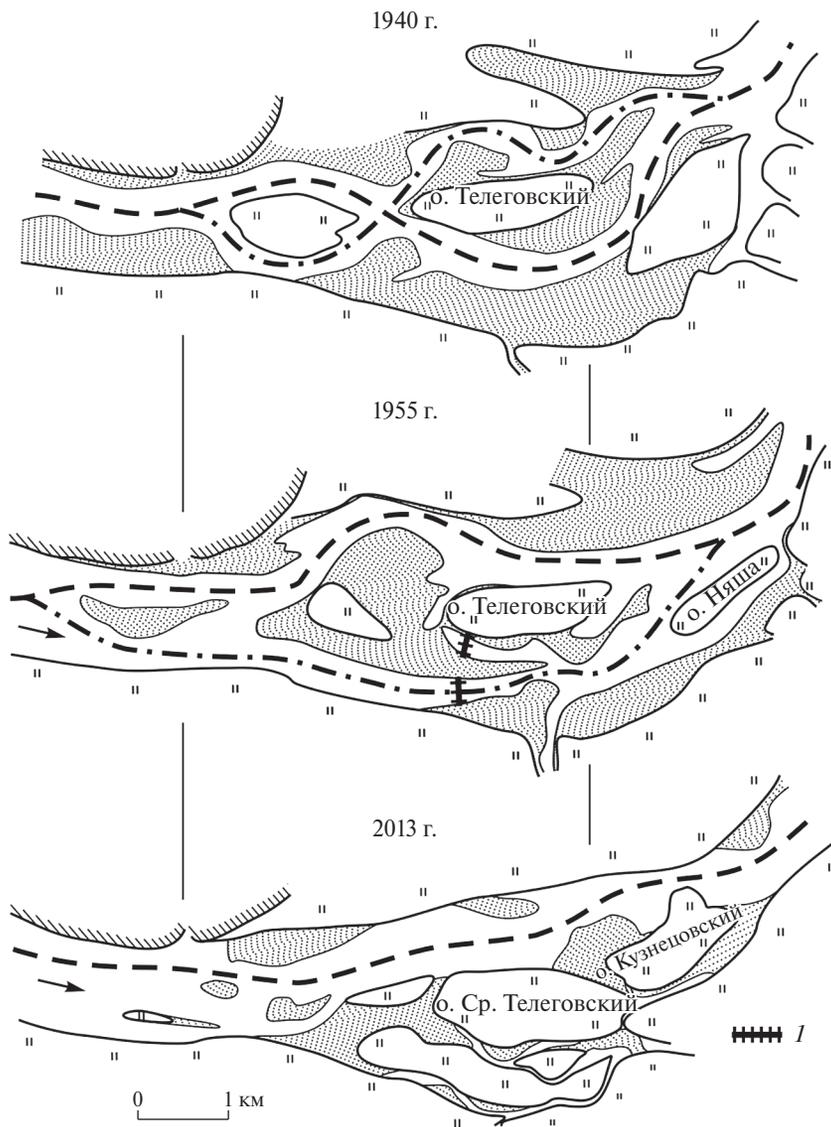


Рис. 9. Трансформация сопряженных разветвлений в одиночное и односторонние на Сев. Двине
 I – дамбы. Остальные усл. обозначения см. рис. 3

Повсеместно на больших реках региона отмечается образование новых островов как в многоводные, так и маловодные годы. Однако причины их формирования в периоды разной водности неодинаковы. В многоводные годы поток половодья, выходя на пойму, активизирует уже существующие или новые пойменные протоки, которые в дальнейшем превращаются в рукава пойменно-руслевых разветвлений или разветвленно-извилистого русла. В маловодные периоды, когда выхода воды на пойму не происходит, острова образуются за счет зарастания осередков, которые остаются незатопленными. Таковы многие острова одиночных и односторонних разветвлений. При достаточно большой продолжительности периода пониженной водности вновь образовавшиеся острова объединяются и примыкают к пойменному массиву. Наоборот, при быстрой

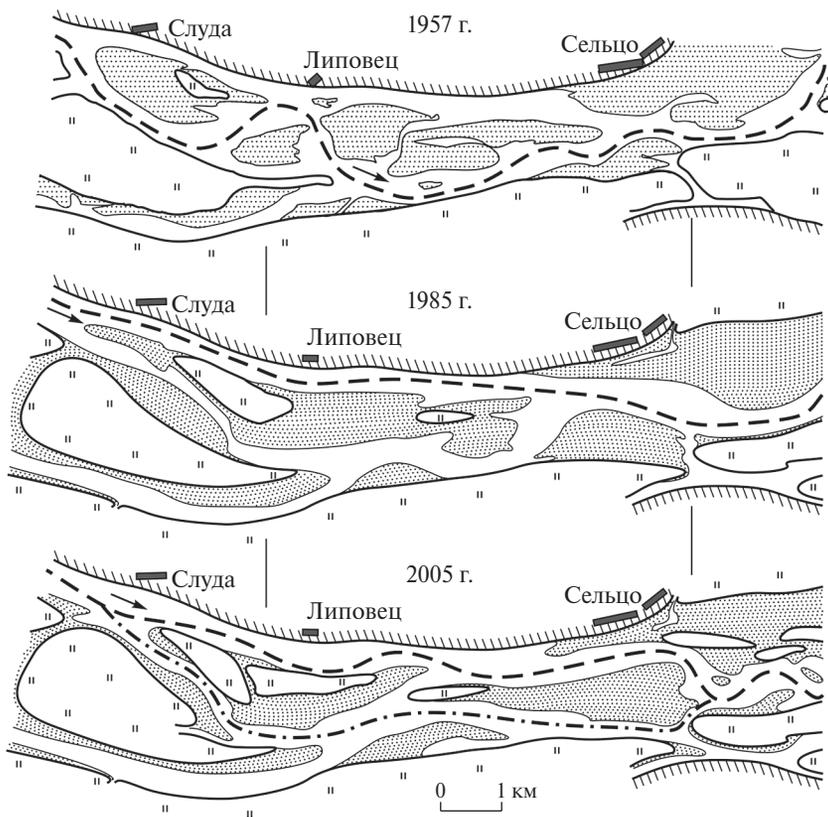


Рис. 10. Формирование параллельно-рукавного русла на Сев. Двине
Усл. обозначения см. рис. 3

смене маловодного периода многоводным, система разветвлений усложняется (таково развитие Слудско-Липовецких параллельно-рукавных разветвлений на Сев. Двине). При этом более чем в 50% случаев образование островов разветвлений происходит за счет отчленения части пойменного массива в многоводные годы. Объединение островов в маловодные годы зафиксировано в начале XXI в. на Сев. Двине, на Вычегде в 1960-е гг. у г. Сыктывкара, в конце 1970-х гг. на Печоре.

Прогнозные оценки переформирований русел¹

Согласно исследованиям М.И. Будыко [20], водность рек Европейского Севера России увеличится в течение ближайшего столетия на 10–15%. Другие оценки [21] показали, что к 2100 г. в бассейне Сев. Двины (по данным разных реализаций модели) водность уменьшится на 14% или возрастет на 2%; в бассейне Мезени – уменьшится на 12% или возрастет на 6%; в бассейне Печоры – аналогичные изменения составят, соответственно, 11 и 8%.

Применение различных методических приемов [22] позволило дать оценку возможных переформирований русла при реализации того или иного сценария.

Повышение стока рек Севера ЕТР [20] в течение XXI в. приведет к увеличению обеспеченности $Q_{\text{ф}}$ верхнего интервала, продолжительности и глубины затопления поймы. На Сев. Двине и Печоре возрастет вероятность активизации пойменных проток (полоев

¹ Методика прогнозных оценок была дана в специальной статье авторов [22].

и шаров, соответственно) и превращения некоторых из них в основные рукава пойменно-русловых разветвлений, на участках разветвлено-извилистого русла перераспределение стока между рукавами, спрямляющими в шпоры излучин, вызовет переход в них основного расхода воды, причем бывшие более извилистые сохранят повышенную водность. На Вычегде уже происшедшее спрямление серии излучин по полям Шарда и Серт (в районе г. Сыктывкара) [23] при сохранении старого русла приведет к формированию на меандрирующей реке новых пойменно-русловых разветвлений. Таким образом, ожидается увеличение разветвленности русла, возникновение новых пойменно-русловых разветвлений и разветвлено-извилистого русла с последующим перераспределением расходов воды по основным рукавам. В одиночных, сопряженных, параллельно-рукавных и пойменно-русловых разветвлениях в многоводные годы основной поток сосредоточится в относительно более прямолинейных или расположенных вдоль коренного берега рукавах. Увеличение скоростей смещения перекатов и их побочной, перекрывающих заходы в рукава, вызовет сокращение длительности периодов перераспределения расходов воды между рукавами разветвлений, особенно, если повышение водности произойдет за счет увеличения расходов воды половодья. На участках относительно прямолинейного неразветвленного русла ожидается спрямление динамической оси потока за счет формирования побочных протоков в тыловых частях побочной. Перестроения излучин Вычегды проявятся в активизации их продольного смещения за счет размыва вогнутых берегов в их нижних крыльях.

Уменьшение стока [21] выразится в сокращении водности до первых процентов от общего расхода реки вплоть до полного обмеления пойменных протоков и одного из рукавов пойменно-русловых разветвлений, сведет к минимуму число случаев спрямления излучин, особенно развитых и крутых сегментных, сократится вероятность образования в меандрирующем русле Вычегды пойменно-русловых разветвлений. Повсеместно будет наблюдаться объединение небольших островов и их присоединение к пойменным массивам, в первую очередь, при обмелении второстепенных рукавов односторонних и чередующихся односторонних разветвлений. Активизируется, особенно в маловодные годы, зарастание осередков и побочной на всех реках, но особенно в русле Мезени. Увеличится продолжительность периодов перераспределения расходов воды по рукавам вследствие снижения скоростей смещения побочной; в одиночных разветвлениях преимущественное развитие получают относительно более извилистые рукава. На излучинах русла и в рукавах пойменно-русловых разветвлений Вычегды следует ожидать распространения фронта размыва вогнутых берегов на всю привершинную их часть, а также образования извилин динамической оси потока или даже вторичных излучин на их крыльях. То же произойдет на участках относительно прямолинейного русла Мезени и нижней Вычегды из-за зарастания побочной.

Возможные пути трансформации русла, проявляющейся в смене морфодинамического типа русла, при понижении или повышении водности реки показаны стрелками на *QI*-диаграмме (см. рис. 6). При повышении водности на реках региона ожидается изменение морфологии русла в сторону ее усложнения, при понижении водности – напротив, произойдет упрощение морфологии русла.

По полученным гидролого-морфологическим зависимостям для разветвленных русел можно оценить изменение ширины рукавов (табл. 7) при повышении или понижении водности, приняв допущение, что изменение водности основных рукавов происходит пропорционально. Значительное изменение ширины произойдет в главных рукавах всех типов разветвлений, причем сокращение водности приведет к большему изменению ширины рукавов, чем ее увеличение. Наибольшее увеличение ширины ожидается в главных рукавах односторонних разветвлений, в некоторых случаях ширина изменится почти в 2 раза при незначительных изменениях этого параметра второстепенных рукавов. Увеличение ширины главных (судоходных) рукавов односторонних, пойменно-русловых и сопряженных разветвлений составит от 17 до 27%, уменьшение – 28–37%, при этом ширина вторых рукавов односторонних и пойменно-русловых разветвлений изменится лишь

Относительное увеличение (уменьшение) $b_{рук,ф}$ (%) в зависимости от изменения водности

Тип разветвления	Увеличение параметров рукавов при увеличении водности		Уменьшение параметров рукавов при сокращении водности	
	главные	второстепенные	главные	второстепенные
Параллельно-рукавные	13–19	7–14	23–28	6–13
Одиночные	17–20	10–14	28–32	10–13
Пойменно-русовые	18–23	0–1	30–37	0–1
Сопряженные	23–27	8–11	33–37	6–8
Односторонние	45–80	3–5	60–86	2–4

Таблица 8

Относительное увеличение (уменьшение) B_o/b_p (%) в зависимости от изменения водности, %

Тип разветвления	Увеличение B_o/b_p при увеличении водности	Уменьшение B_o/b_p при сокращении водности
Пойменно-русовые (в разветвленном русле)	4–7	4–6
Сопряженные	19–27	14–20
Параллельно-рукавные	20–30	18–28
Одиночные (отдельные узлы в относительно прямолинейном русле)	20–48	19–44
Односторонние	20–53	19–50
Одиночные (образующие морфологически однородные участки русла)	23–60	21–56
Пойменно-русовые (в меандрирующем русле)	44–79	41–74

на 6–14%, а изменения ширины таковых в пойменно-русовых разветвлениях вообще не произойдет. Наименьшее изменение ширины рукавов ожидается в параллельно-рукавных разветвлениях. При увеличении их водности произойдет примерно одинаковое увеличение ширины основных рукавов, при уменьшении – ширина судоходных рукавов сократится сильнее.

Увеличение и уменьшение относительной ширины островов разветвлений B_o/b_p (табл. 8) в наименьшей степени произойдет в пойменно-русовых разветвлениях разветвленного русла (первые проценты), т.е. рост острова в ширину будет происходить практически пропорционально увеличению ширины русла в узле разветвления и наоборот. В пойменно-русовых разветвлениях меандрирующего русла B_o/b_p претерпит наиболее значительные изменения (до 79%). Это значит, что ширина островов будет увеличиваться (или уменьшаться) значительно больше, чем ширина русла в разветвлении. Для остальных типов разветвлений изменение B_o/b_p будет находиться в диапазоне от 20 до 60%.

Заключение

Сравнительный анализ русловых процессов на больших реках Севера ЕТР, таким образом, позволил в полном объеме выявить особенности изменений русел в прошлом, охарактеризовать их современное состояние и дать прогнозную оценку возможных трансформаций в будущем в зависимости от сценария изменений водности реки (повышения/понижения). Полученные результаты имеют большое значение при планировании водохозяйственных и особенно воднотранспортных мероприятий, позволяя

учитывать как современное состояние русел, их изменчивость и прогнозные оценки трансформации при проектировании работ по предотвращению опасных и неблагоприятных проявлений русловых процессов, дноуглублению и выправлению русел для обеспечения водных путей, решению других водохозяйственных задач.

Благодарности. Работа выполнена по плану НИР кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова “Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия”, частичной поддержке грантов РНФ (проекты 14-17-00155 – вопросы параметризации русловых процессов и 18-17-00086 – гидролого-морфологический анализ разветвленных русел) и РФФИ (проект 15-05-03752 – оценка влияния дноуглубления на морфодинамику русел).

Acknowledgements. The work is performed according to the plan of scientific research of the Department of land hydrology, Lomonosov Moscow State University, “Hydrological regime of water objects in the context of climate change and anthropogenic impact”, partially supported by a grant of the RSF (projects 14-17-00155 – Issues of parameterization of channel processes and 18-17-00086 – hydro-morphological analysis of braided channels) and the RFBR (project 15-05-03752 – Evaluation of dredging impact on the river channel morphodynamics).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. М.: ООО “Журнал “РТ”, 2012. 492 с.
2. Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Чалов С.Р. Морфология, переформирование русла и перекатов р. Мезени (нижнее течение) // Географический вестник. 2010. № 3 (14). С. 11–23.
3. Львовская Е.А., Рулева С.Н., Чалов Р.С. Гидролого-морфологический анализ разветвленного русла р. Печора // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2015. № 1. С. 78–86.
4. Чалов Р.С., Львовская Е.А., Рулева С.Н., Завадский А.С. Морфодинамика русла р. Печоры (от г. Печоры до устья) на фоне характеристики русла по всей длине // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 19. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2015. С. 211–235.
5. Львовская Е.А. Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках Севера ЕТР. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2016. 30 с.
6. Чалов Р.С., Резников П.Н. Сток наносов и условия формирования русел на реках бассейна Северной Двины // Геоморфология. 2005. № 2. С. 73–85.
7. Власов Б.Н., Чалов Р.С. Районирование Европейской территории СССР по условиям прохождения руслоформирующих расходов на реках // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1991. № 6. С. 32–42.
8. Водные ресурсы России и их использование. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
9. Чалов Р.С., Лю Шугуан, Алексеевский Н.И. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: Изд-во МГУ, 2000. 212 с.
10. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 201 с.
11. Алабян А.М., Алексеевский Н.И., Евсеева Л.С., Жук В.А., Иванов В.В., Сурков В.В., Фролова Н.Л., Чалов Р.С., Чернов А.В. Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе г. Великого Устюга // Эрозия почв и русловые процессы. Вып. 14. М.: Изд-во МГУ, 2003. С. 104–130.
12. Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.
13. Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
14. Чалов Р.С., Алабян А.М., Иванов В.В., Лодина Р.В., Панин А.В. Морфодинамика русел равнинных рек. М.: ГЕОС, 1998. 288 с.
15. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.
16. Завадский А.С. Гидролого-морфологический анализ свободного меандрирования русел равнинных рек: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ, 2006. 26 с.
17. Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: Изд-во МГУ, 371 с.
18. Проектирование судовых ходов на свободных реках // Тр. ЦНИИЭВТ. М.: Транспорт, 1964. Вып. 36. 262 с.

19. *Каргаполова И.Н.* Реакция русел рек на изменение водности и антропогенное воздействие за последнее столетие: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2006. 27 с.
20. *Будыко М.И.* Климат в прошлом и будущем. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 352 с.
21. Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири. М.: МАКС Пресс, 2011. 496 с.
22. *Львовская Е.А., Чалов Р.С.* Методические аспекты прогнозирования русловых процессов при изменении водности рек // *Геоморфология*. 2013. № 3. С. 78–88.
23. *Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н., Белый Б.В., Ботавин Д.В., Гаррисон Л.М., Турыкин Л.А.* Русловые процессы в узле слияния рек Вычегды и Сысолы и их регулирование для решения транспортных и водохозяйственных работ в Сыктывкарском водном узле // *Эрозия почв и русловые процессы*. Вып. 18. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2012. С. 270–287.

REFERENCES

1. *Ruslovye protsessy i vodnye puti na rekakh basseyna Severnoy Dviny* (Channel processes and waterways on the rivers of the Severnaya Dvina basin). Moscow: ООО “Zhurnal “RT” (Publ.). 2012. 492 p.
2. Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Ruleva S.N., and Chalov S.R. Morphology, channel and shallows deformation on the Mezen river (downstream). *Geogr. vestn.* 2010. No. 3 (14). P. 11–23. (in Russ.)
3. L'vovskaya E.A., Ruleva S.N., and Chalov R.S. Hydro-morphological analysis of branched channels on the Pechora river. *Vestm. Mosk. Univ. Ser. 5. Geogr.* 2015. No. 1. P. 78–86. (in Russ.)
4. Chalov R.S., L'vovskaya E.A., Ruleva S.N., and Zavadskiy A.S. Morphodynamics of the channel of the Pechora River (from Pechora city to the river mouth) against the background of channel characteristic along its length, in *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* (Soil erosion and channel processes). Moscow: Geogr. f-t MGU (Publ.), 2015. Iss. 19. P. 211–235.
5. L'vovskaya E.A. *Retrospektivnyy analiz, sovremennoe sostoyanie i otsenka vozmozhnykh izmeneniy ruslovykh protsessov na bol'shikh rekakh Severa ETR* (Channels of the great rivers of the northern part of European Russia: retrospective analysis, current state and evaluation of possible changes): PhD thesis. Moscow: MGU (Publ.), 2016. 30 p.
6. Chalov R.S. and Reznikov P.N. Sediment load and channel forming conditions on the rivers in the Severnaya Dvina basin. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2005. No. 2. P. 73–85. (in Russ.)
7. Vlasov B.N. and Chalov R.S. Zoning of the European part of the USSR according to the passing of riverbed forming discharge in the rivers. *Vestm. Mosk. Univ. Ser. 5. Geogr.* 1991. No. 6. P. 32–42. (in Russ.)
8. *Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* (Water resources of Russia and their usage). S.-Petersburg: GGI (Publ.), 2008. 600 p.
9. Chalov R.S., Lyu Shuguan, and Alekseevskiy N.I. *Stok nanosov i ruslovye protsessy na bol'shikh rekakh Rossii i Kitaya* (Sediment load and channel processes on the great rivers of Russia and China). Moscow: MGU (Publ.), 2000. 212 p.
10. Alekseevskiy N.I. *Formirovaniye i dvizheniye rechnykh nanosov* (Formation and movement of river sediments). Moscow: MGU (Publ.), 1998. 201 p.
11. Alabyan A.M., Alekseevskiy N.I., Evseeva L.S., Zhuk V.A., Ivanov V.V., Surkov V.V., Frolova N.L., Chalov R.S., and Chernov A.V. Genetic analysis of the causes of spring flooding of the Small Severnaya Dvina valley near Velikiy Ustyug, in *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* (Soil erosion and channel processes). Moscow: MGU (Publ.), 2003. Iss. 14. P. 104–130.
12. *Vodnye puti basseyna Leny* (Waterways in the Lena basin). Moscow: MIKIS (Publ.), 1995. 600 p.
13. Chalov R.S. *Geograficheskie issledovaniya ruslovykh protsessov* (Geographical research of channel processes). Moscow: MGU (Publ.), 1979. 232 p.
14. Chalov R.S., Alabyan A.M., Ivanov V.V., Lodina R.V., and Panin A.V. *Morfodinamika rusel ravninnykh rek* (Morphodynamics of lowland river channels). Moscow: GEOS (Publ.), 1998. 288 p.
15. Chalov R.S. *Ruslovedeniye: teoriya, geografiya, praktika. T. 1. Ruslovye protsessy: faktory, mekhanizmy, formy proyavleniya i usloviya formirovaniya rechnykh rusel* (Science of channel processes: theory, geography, praxis. T. 1. Channel processes: factors, mechanisms, forms of manifestation and formation conditions of river channels). Moscow: LKI (Publ.), 2008. 608 p.
16. Zavadskiy A.S. *Gidrologo-morfologicheskiy analiz svobodnogo meandrirovaniya rusel ravninnykh rek* (Hydro-morphological analysis of unobstructed meandering of lowland river channels): PhD thesis. Moscow: MGU (Publ.), 2006. 26 p.
17. Chalov R.S., Zavadskiy A.S., and Panin A.V. *Rechnye izluchiny* (River meanders). Moscow: MGU (Publ.), 2004. 371 p.

18. *Proektirovanie sudovykh khodov na svobodnykh rekakh* (Fairways designing on unobstructed rivers). TsNIIEVT writing. Moscow: Transport (Publ.), 1964. Iss. 36. 262 p.
19. Kargapolova I.N. *Reaktsiya rusel rek na izmenenie vodnosti i antropogennoe vozdeystvie za poslednee stoletie* (River channel reaction in water flow fluctuation and human impact over the last century): PhD thesis. Moscow: MGU (Publ.), 2006. 27 p.
20. Budyko M.I. *Klimat v proshlom i budushchem* (Climate in the past and in the future). Leningrad: Gidrometeoizdat (Publ.), 1980. 352 p.
21. *Ekologo-geograficheskie posledstviya global'nogo potepeniya klimata XXI veka na Vostochno-Evropeyskoy ravnine i v Zapadnoy Sibiri* (Ecological and geographical consequences of global warming in the XXI century on the East European plain and in West Siberia). Moscow: MAKS Press (Publ.), 2011. 496 p.
22. L'vovskaya E.A. and Chalov R.S. Methodical aspects of channel processes prediction by water flow fluctuations. *Geomorfologiya (Geomorphology RAS)*. 2013. No. 3. P. 78–88. (in Russ.)
23. Chalov R.S., Zavadskiy A.S., Ruleva S.N., Belyy B.V., Botavin D.V., Garrison L.M., and Turykin L.A. Channel processes at the confluence of the rivers Vychegda and Sysola and their regulation for solving transport and hydroeconomic issues within the boundaries of the Syktyvkar waterway transport hub, in *Eroziya pochv i ruslovye protsessy* (Soil erosion and channel processes). Moscow: Geogr f-t MGU (Publ.), 2012. Iss. 18. P. 270–287.