

УДК 556

МОРФОДИНАМИКА РУСЛА Р. СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ, ЕГО ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ В XX–НАЧАЛЕ XXI В.

© 2025 г. Р.С. Чалов^{1,2}, Г.Б. Голубцов^{1,2}, А.А. Куракова¹,
В.А. Семаков¹, Е.Д. Панченко^{1,3,*}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Российский университет транспорта, Москва, Россия

³Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.03.2025 г.

После доработки 30.05.2025 г.

Принята к публикации 09.06.2025 г.

В статье показаны основные направления и условия трансформации русла Северной Двины (от слияния с р. Вычегдой), происходящие под влиянием почти вековых техногенных воздействий, русловых деформаций и гидроклиматических изменений, определен вклад каждого из факторов и их взаимосвязь. Исследование основано на анализе данных полевых измерений (расходов воды в разветвлениях, скоростных полей потока, мутности воды и состава руслообразующих наносов), выполненных на спаде половодья в 2024 г., а также карт реки, зафиксировавших состояние русла в различные временные этапы начиная с 1960-х гг., космических снимков и планов перекатов и перекатных участков. Показано, что переформирования русла Северной Двины происходят в широкопойменном, адаптированном русле и на тех участках врезанного, где оно сформировано в моренных или пермско-триасовых отложениях. Основным фактором трансформации является антропогенное воздействие, а именно проведение дноуглубительных и выправительных работ для обеспечения необходимых для водного пути габаритов (в первую очередь, глубины русла). Из-за объемов выполненных работ их влияние значительно превосходит роль изменений водного стока, проявляющихся для Северной Двины в повышении годового стока при снижении водности половодья и повышении ее в межень. В условиях широкопойменного и адаптированного русла на большинстве участков русла выполнение дноуглубительных и выправительных работ привело к усложнению разветвлений. Однако возведение дамб, в том числе перекрывающих рукава, наоборот, привело к упрощению разветвленности русла на некоторых участках как врезанного, так и широкопойменного русла.

Ключевые слова: русловые процессы, дноуглубление, выправительные работы, широкопойменное, адаптированное, врезанное русло, разветвления

DOI: 10.31857/S0869607125030052, EDN: LTGUUZ

Введение

Северная Двина — одна из немногих рек, русловой режим которых изучен достаточно хорошо и многие теоретические положения русловедения были получены на основе их исследований. Это отражено в многочисленных статьях, опубликованных со 2-й половины XX в. до настоящего времени, посвященные анализу

условий и закономерностям проявления русловых процессов, в том числе имеющих прикладную направленность [1, 6, 10, 13, 14, 15, 16 и многие другие], и обобщающей многолетние исследования монографии [18], содержащей детальную характеристику морфологии и переформирований русла и основанную на ней оценку опыта управления русловыми процессами при освоении реки как водного пути. С другой стороны, Северная Двина — река, сохранившаяся в естественном состоянии, т.е. на ней отсутствуют гидроузлы с водохранилищами и не проводится крупное гидротехническое строительство. Однако русло реки уже с конца XIX в. и особенно во второй половине XX в. подвергалось на большей части своей длины массовому техногенному воздействию — на реке проводились выправительные и дноуглубительные работы для обеспечения нормальных условий судоходства. Опираясь на специальные изыскания или результаты научных исследований, эти работы обеспечили не только техническую эффективность выправления русла, но и гидроэкологическую безопасность, поскольку при их выполнении максимально использовалась руслоформирующая деятельность самого речного потока. Таков ведущий принцип выправления русел рек как водных путей, заложенный еще основоположниками современного учения о русловых процессах В.М. Лохтиным [9], Н.С. Лелявским [8] и получивший окончательное обоснование в трудах Н.И. Маккавеева [11, 17]. В результате, несмотря на многочисленность таких воздействий, русла рек и сами реки, в том числе Северная Двина, на которых эти принципы соблюдались, сохранили свой естественный облик.

Однако в исследованиях руслового режима Северной Двины оставались в основном “за скобками” происходящие трансформации русла, обусловленные проведением выправительных мероприятий. Техногенные воздействия рассматриваются лишь в контексте их соответствия русловому режиму реки, но не дается их оценка как фактора возможных изменений морфодинамики русла и, соответственно, последствий выполнения. Более того, антропогенно обусловленные изменения осуществлялись на фоне происходящих естественных деформаций русла, его саморазвития, с одной стороны, и накладывающихся на них со второй половины (а возможно, и раньше?) XX в. изменения водности реки (годового стока и его внутригодового распределения) как следствия потепления климата.

С 1990-х г. на Северной Двине прекратились выправительные работы, а дноуглубление (землечерпание) сильно сократилось и стало сводиться к эксплуатационному на отдельных перекатах для поддержания на них в низкую межень гарантированных глубин (1.6 м от устья Вычегды до п. Двинской Березник ниже устья р. Ваги, 1.7 м — ниже по течению). Это неизбежно должно сказаться в проявлении тенденции к постепенному восстановлению (релаксации) исходного (до техногенных воздействий) состояния русла, если происшедшие под их влиянием изменения не получили необратимый характер.

Трансформации русла (естественные и техногенные) характерны для многих судоходных рек и в разной степени и по-разному на них проявляются [2]. Северная Двина в этом отношении является рекой, на которой и техногенные особенно, и естественные изменения проявились в наиболее полной мере, первые — из-за их массовости по длине реки, вторые — вследствие очень слабой устойчивости русла. Поэтому задача настоящей статьи — на примере русловых процессов на Северной Двине (от слияния с р. Вычегдой) показать основные направления и условия трансформации русла, происходящие в результате почти вековых техногенных воздействий, постоянно происходящим деформациям и гидроклиматическим изменениям, выявить роль каждого из них и соотношения между ними.

Объект и методы исследований

Северная Двина — крупнейшая река на севере Европейской части России, начинающаяся от слияния рек Сухоны и Юга и при слиянии с р. Вычегдой увеличивающая водность более чем в 2 раза (среднегодовой расход воды по г.п. Великий Устюг $Q_{\text{ср}} = 750 \text{ м}^3/\text{с}$, по г.п. Федяково на Вычегде в 70 км от устья $Q_{\text{ср}} = 1030 \text{ м}^3/\text{с}$; в среднем течении (г.п. Абрамково $Q_{\text{ср}} = 1950 \text{ м}^3/\text{с}$, после впадения р. Ваги (г.п. Звоз) — $Q_{\text{ср}} = 2600 \text{ м}^3/\text{с}$, после слияния с р. Пинегой в устьевой области — $Q_{\text{ср}} = 3960 \text{ м}^3/\text{с}$. Между устьями Вычегды и Ваги русло сначала широкопойменное (135 км) до с. Ягрыш, формирующееся в свободных условиях развития русловых деформаций, а затем адаптированное или врезанное в моренные валунные суглинки, но на всем протяжении преимущественно разветвленное, слабо устойчивое. При этом здесь практически повсеместно до 1990 г. производились выправительные и дноуглубительные работы, и сейчас разрабатываются на отдельных перекатах эксплуатационные прорезы.

Ниже устья р. Ваги русло врезанное, большей частью протекающее в скальных грунтах, среди известняков и гипсов, устойчивое, неразветвленное, относительно прямолинейное или образующее врезанные излучины, и лишь в отдельных местных расширениях днища долины — адаптированное, разветвленное и расширенное в 1.5–2 раза по сравнению с участками выше и ниже по течению, слабо устойчивое и только здесь требующее проведения выправительных работ. Ниже п. Брин-Навлок русло сужается до 500–700 м, образуя врезанные пологие, иногда крутые сегментные излучины. Ниже слияния с р. Пинегой и до г. Архангельска (до дельты) — устьевая область реки, характеризующаяся устойчивым, глубоким, хотя и образующим сложное структурно предопределенное раздвоенное русло, находится под влиянием приливов и сгонно-нагонных колебаний уровня.

Первые русловые исследования на Северной Двине были выполнены в 1957–1958 гг. под руководством и при участии Н.И. Маккавеева [13] и впоследствии неоднократно, но с перерывами в десятки лет, повторялись. Последние натурные исследования с измерениями расходов воды в разветвлениях, скоростных полей, мутности воды и состава руслообразующих наносов состоялись в мае 2024 г. Одновременно при всех работах производился анализ карт реки (ранее они назывались лоцманскими), зафиксировавших состояние русла в различные временные этапы, космических снимков и планов перекатов и перекатных участков, регулярно получаемых изыскательскими партиями на водных путях, предоставленных (как и лоцманские карты) в распоряжение авторов Администрацией Двинско-Печорского бассейна внутренних водных путей (для исследований 2024 г. — по съемкам с 2019 г.).

Результаты и обсуждение

Морфодинамические типы русла и их распространение (современное состояние)

По распространению типов русла 600-километровый участок Северной Двины от г. Котласа до г. Архангельска разделяется на семь основных участков, различающихся по геолого-геоморфологическим условиям их формирования, неодинаковые по своей длине (от 29 до 213 км), различающиеся по развитию в их пределах морфодинамических типов русла, широким разнообразием форм русла одного и того же типа, плесовым или перекатным характером, сложностью русловых переформирований (рис. 1, табл. 1).

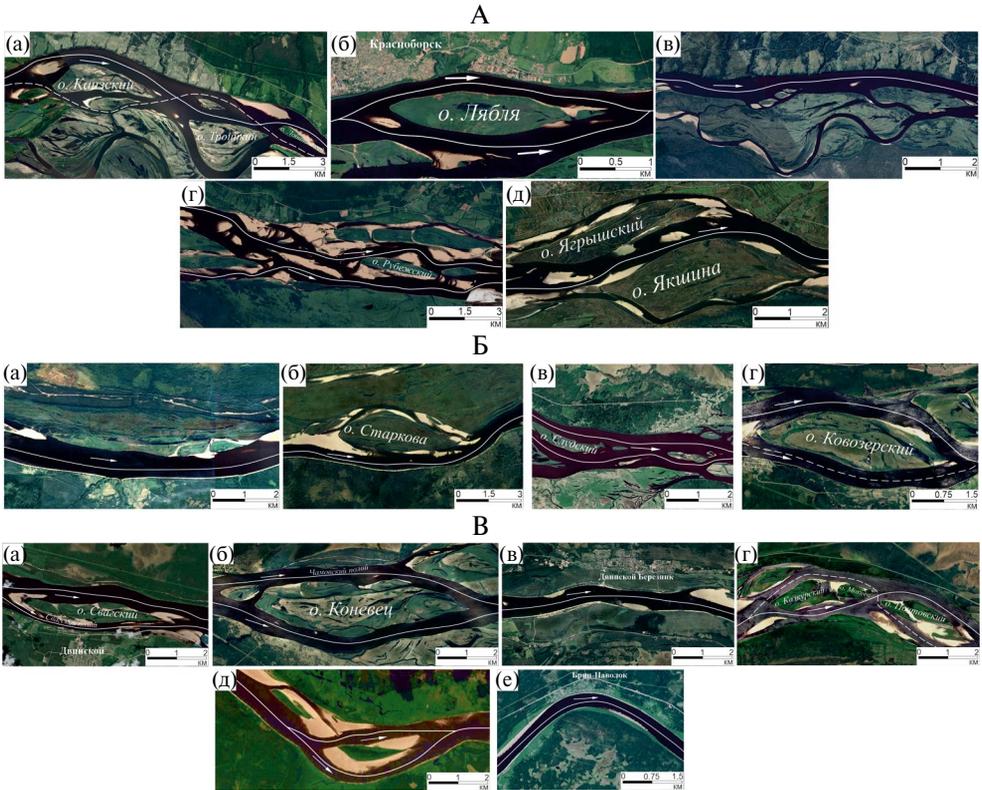


Рис. 1. Основные морфодинамические типы русла Северной Двины. А — широкопойменные: а — сопряженные разветвления (Канзкое-Лобановское), б — одиночное разветвление (Красноборское), в — прямолинейное неразветвленное русло (Пермогорское), г — параллельно-рукавные разветвления (Паячные), д — двусторонние и вынужденная излучина (Ягрышский участок); Б — адаптированные: а — прямолинейное неразветвленное русло (Коповский участок), б — одностороннее разветвление (Старковское), в — параллельно-рукавные разветвления (Слудские), г — одиночное разветвление (Ковозерское); В — врезанные: а — односторонние разветвления (Свагские), б — параллельно-рукавное разветвление (Конецгорское), в — прямолинейное неразветвленное русло (Двинской Березник), г — сопряженные разветвления (Калкурское-Почтовское), д — врезанная излучина с односторонним разветвлением (Шеньга), е — врезанные излучины (Брин-Наволоч).

Fig. 1. Main morphodynamic channel types of the Northern Dvina River. “A” — wide floodplain: a — conjugated branches (Kanzkoe-Lobanovskoe), b — single branch (Krasnoborskoye), c — straight and undivided channel (Permogorskoye), d — parallel-sleeve branches (Payachnye), e — bilateral branches and forced bend (Yagryshchy section), B — adapted: a — straight and undivided channel (Kopovskiy section), b — unilateral branch (Starkovkoe), c — parallel-sleeve branches (Sludskie), d — single branch (Kovozerkoye); C — incised: a — unilateral branches (Svagskie), b — parallel-sleeve branch (Konecgorskoe), c — straight and undivided channel (Dvinskoi Bereznik), d — conjugated branches (Kalkurskoye-Pochtovskoye), e — incised bend with a single branch (Shenga), f — incised bends (Brin-Navolok)

На первом участке длиной 135 км (610–475 км) русло широкопойменное (ширина поймы B_{II} повсеместно намного больше 2–3 ширины русла b_p , постепенно сужаясь к концу участка), на большей части своего протяжения разветвленное при преимущественном его расположении вдоль или вблизи левого коренного берега. Непосредственно ниже слияния с Вычегдой русло объединенной реки подходит к левому коренному берегу, образуя вынужденную излучину с осередковым разветвлением

Таблица 1. Морфологически однородные участки и морфодинамические типы русла
Table 1. Morphologically homogeneous sections and morphodynamic types of the channel

№	Участок		Длина, км	Тип русла
	км от устья	название		
<i>Широкопойменное разветвленное русло</i>				
1	610-606.5	Усть-Вычегодский	3.5	Вынужденная излучина
2	606-596	Усть-Курский	10	Пойменно-русловое разветвление (о-ва Марковский и б/н)
3	596-588	Туровецкий	7.5	Прямолинейное неразветвленное русло
4	588-574.5	Канзско-Лобановский	14	Сопряженные разветвления
5	574.5-567	Телеговский	7	Двусторонние разветвления
6	567-559.5	Усть-Евдский	8	Прямолинейное неразветвленное русло
7	559.5-552	Красноборский	7.5	Одиночное разветвление (о. Лябля)
8	552-534	Пермогорье	18	Прямолинейное неразветвленное русло с единичными правобережными разветвлениями
9	534-524	Шиловский	9.5	Односторонние и одиночное разветвления
10	524-518	Толоконский	6.5	Вписанная излучина
11	518-511	Ботовский	7	Разветленно-извилистое русло (о-ва Мал. Ботовский, Бол. Ботовский) — спрямленная излучина
12	511-501	Ракульский	10	Пологая вписанная излучина
13	501-481.5	Паячный-Рубежский	19.5	Параллельно-рукавное русло (о-ва Паячный, Голодай, Рубежский, Овечий и др.) с односторонними разветвлениями (о. Авнюгский и др.)
14	481.5-475	Ягрышский	6,5	Прибрежные двусторонние разветвления (о-ва Ягрышский, Якшина) и вынужденная излучина основного рукава
<i>Врезанное русло</i>				
15	475-453	Свагско-Верхнетоймский	23	Правобережные односторонние разветвления (о-ва Ильинский, Шоромский, Свагский, Лобановский, Варзенский, Мелетеевский и др.)
16	453-438	—	15	Большая врезанная излучина
<i>Адаптированное русло</i>				
17	438-422	—	16	Прямолинейное неразветвленное русло
18	422-417.5	Ромбовский	4.5	Одиночное разветвление (о. Ромбовский)

Таблица 1. Продолжение

№	Участок		Длина, км	Тип русла
	км от устья	название		
19	417.5–413	Коповский	4.5	Прямолинейное неразветвленное русло
20	413–400	Старковский	13	Одностороннее разветвление (о. Старкова)
21	400–395	Пальниковский	5	Прямолинейное неразветвленное русло
22	395–370	Слудский-Липовецкий-Селецкий	25	Параллельно-рукавное русло (о-ва Слудский, Средний Песок) с односторонними разветвлениями (о-ва Кодимский, Телячий)
23	370–364	Троицкий плес	6	Прямолинейное неразветвленное русло
<i>Врезанное русло</i>				
24	364–349	Тулгасский	15	Параллельно-рукавное русло (о-ва Тулгасский, Лоза, Окулков)
25	349–344	Рочегда	5	Прямолинейное неразветвленное русло
26	344–330	Конешгорский	14	Параллельно-рукавное русло (о-ва Коневец, Прозоровский)
27	330–326	Чамовский	4	Односторонние разветвления
28	326–321	Ростовский	5	Одинокое разветвление (о. Могучий)
29	321–309	Шилингский	12	Пойменно-русловое разветвление (о. Шилингский)
30	309–299	Двинской Березник	10	Прямолинейное неразветвленное русло
31	299–289	Пяндский	10	Врезанная излучина с одиноким разветвлением в привершинной части
32	289–280	Усть-Ваеньгский	9	Прямолинейное неразветвленное русло
33	280–274	Шеньга	6	Врезанная излучина с одинокими разветвлениями в привершинной части (о. Богачев)
34	274–268	Репановский	6	Одинокое разветвление (о. Репановский)
35	268–260	Вятский	8	Параллельно-рукавное разветвление (о-ва Вятский, Зеленый)
36	260–257	—	3	Прямолинейное неразветвленное русло
37	257–245	Калкурский-Почтовый	12	Сопряженные разветвления (о-ва Калкурский-Мокеев, Новый Мокеев-Почтовый)
38	245–240	Ниж. Почтовый	5	Прямолинейное неразветвленное русло
39	240–225	Звозский	15	Врезанные излучины с прибрежными разветвлениями на нижних крыльях и в привершинных частях

Таблица 1. Окончание

№	Участок		Длина, км	Тип русла
	км от устья	название		
<i>Адаптированное русло</i>				
40	225–214	Ковозерский	11	Одиночное разветвление (о. Ковозерский)
41	214–209	Мартушевский	5	Одностороннее разветвление
42	209–196	Усть-Емецкий	13	Прямолинейное русло с односторонним разветвлением
<i>Врезанное русло</i>				
43	196–154	Хоробрицкий – Брин-Наволоок	33	Врезанные излучины; первая и четвертая — с разветвлениями у вогнутых берегов (о-ва Репный-Вятский-Пашин, Большой)
44	154–137	Ракульский	17	Прямолинейное неразветвленное русло
45	137–131	мыс Кривое	6	Врезанная крутая излучина
46	131–121.5	Копачевский	9	Прямолинейное неразветвленное русло
47	121.5–117	Орлецы	4.5	Врезанная крутая структурная излучина
48	117–112	мыс Пангал	9	Врезанная излучин
49	112–106	плес Товренский	6	Прямолинейное неразветвленное русло
50	106–88	Усть-Пинегский	24	Врезанные излучины с разветвлениями в привершинных частях у выпуклых берегов (о-ва Марилов, Антушевский)
<i>Врезанное структурное раздвоенное русло и разветвления (устьевая область)</i>				
51	88–52	Холмогрский	36	Раздвоенное русло (скульптурно-аккумулятивные междоустья) с разветвленными левыми рукавами и обтекающими излучинами правого рукава
52	52–50	—	2	Прямолинейное неразветвленное русло
53	50–36	Троицкий-Оброшня	14	Параллельно-рукавное русло (о-ва Троицкий, Мал. Троицкий, Оброшня)
54	36–33	—	3	Прямолинейное неразветвленное русло
56	33–17	Новодвинский	16	Пойменно-русловое скульптурно-аккумулятивное разветвление (о-ва Красная Кошка, Коневец и др.)
57	17–0	Архангельский	17	Одиночные разветвления (о-ва Турдеевский, Краснофлотский)

в нижнем крыле вдоль коренного берега. Далее на протяжении всего участка чередуются разветвления различного типа, занимающие 81.5 км его длины (прибрежные одно- и двусторонние, одиночные — 30.5 км, параллельно-рукавные — 19.5 км, сопряженные — 14 км, пойменно-русловое — 10 км разветвления и разветвленно-извилистое русло — 7 км), три участка относительно прямолинейного неразветвленного русла (7.5, 8 и 18 км) вдоль левого коренного берега, с единичными небольшими прибрежными островами возле правого пойменного берега, не определяющими морфологический облик русла. Меандрирующее русло, помимо вынужденной Усть-Вычегодской излучины (с шагом $L = 4.4$ км), представлено двумя полугими вписанными излучинами общей протяженностью около 16.5 км, вогнутый правый берег которых образуют легкоразмываемые, особенно верхней Толоконской излучины, песчаные уступы 40-метровой надпойменной террасы. Между ними находится крутая Ботовская излучина, в которой река огибала два больших острова, создавая разветленно-извилистый участок. В настоящее время он преобразовывается в прямолинейное русло вследствие развития, спрямляющего через островную шпору излучины прямолинейного рукава вдоль правого борта долины. На всем протяжении участка очень широко развита пойменная многорукавность, расчленяющая пойму на отдельные массивы многочисленными протоками (полями), забирающими в совокупности до 20% стока реки.

Весь участок характеризуется сложным режимом деформаций и рассредоточением потока по рукавам и пойменным протокам, многочисленностью следующих друг за другом перекаатов (по существу, это единый перекаатный участок), слабой устойчивости (местами неустойчивостью) русла и постоянными переформированиями разветвлений и перекаатов. Наиболее сложными в этом отношении являются Усть-Курское пойменно-русловое, Канзское-Лобановское сопряженные, Шиловские чередующиеся односторонние (особенно Шиловские перекааты между верхним и нижним их звеньями) и Паячные-Рубежские параллельно-рукавные разветвления.

Следующий 37-километровый участок охватывает врезанное русло, которое характеризуется резким сужением поймы (здесь $B_{п} < b_{р}$) или ее отсутствием. Основными его типами здесь являются прибрежные односторонние разветвления (занимающие по длине 23 км) и большая врезанная излучина с шагом 8.5 км и длиной по руслу 15 км. В судоходном, основном по водности левом рукаве имеются перекааты, связанные с отвлечением стока или впадением межостровных протоков и неровностями левого коренного берега.

Промежуточное положение (по соотношению $B_{п} \sim b_{р}$) между широкопойменным и врезанным занимает адаптированное русло, которое охватывает участок реки длиной 213 км, представленный сначала чередованием относительно прямолинейного неразветвленного русла вдоль правого коренного берега (по левому берегу развита узкая пойма) с одиночным и односторонним разветвлениями (о-ва Ромбовский, Старкова), 25-километровым участком сложных параллельно-рукавных разветвлений (Слудское—Липовецкое—Селецкое), сформировавшиеся за крутым коленообразным поворотом реки, ниже которого русло резко расширяется (в несколько раз). Здесь русло разделяется сначала широкими о-вами Кодимским и Телячьим (шириной до 2300 м), образующими прибрежные разветвления, а затем левый рукав и русло ниже ухвостья о. Телячьего — цепочкой островов разных размеров и осередков на два параллельных рукава. Их развитию способствует, помимо расширения русла и рассредоточения стока, его сужение

в конце, вызывающее подпор потока и аккумуляцию наносов в половодье. Завершается участок походом реки к правому коренному берегу, возле которого расположился короткий (6 км) прямолинейный плес.

Начиная с 364 км и вплоть до устья русло Северной Двины врезанное, и лишь перед впадением р. Емцы оно разделяется 29-километровым адаптированным участком с левобережной Двинско-Емецкой поймой. Но и на остальном протяжении морфодинамический облик врезанного русла очень изменчив, в том числе из-за различий в геологическом строении коренных берегов, колебаний ширины русла, наличия фрагментов узкой поймы ($B_p < b_p$) и т.д. Выше устья р. Ваги преобладают параллельно-рукавные разветвления (Тулгасские, Конецгорские), представленные двумя участками длиной 15 и 12 км соответственно, и пойменно-русловое (Шилинское, 14 км), что составляет около 75% всего участка (41 из 55 км). Они перемежаются с прямолинейным неразветвленным руслом, образующим плесовый 5-километровый участок у с. Рочега, односторонними и одиночным (о. Могучий) разветвлениями.

Ниже устья р. Ваги и до 225 км (начало Усть-Емецкого расширения) чередуются врезанные излучины (три участка длиной 31 км), осложненные одиночными разветвлениями в привершинных частях, прямолинейное неразветвленное русло (четыре участка длиной 3–10 км, общая длина — 27 км), Вятское параллельно-рукавное и сопряженные Калкурское-Почтовые разветвления, с которыми связаны переформирования русла и перекаты.

Усть-Емецкий адаптированный участок русла (29 км) начинается с большого одиночного разветвления (о. Ковозерский длиной 5.7 км) и односторонних разветвлений вдоль левого пойменного берега (5 км). Ниже вплоть до устья р. Емцы (13 км) русло прямолинейное, очень широкое (до 2.25 км), представляющее собой перекаточный участок с шахматным расположением побочной и сложным режимом деформаций (перекаты Хаврогорский, Емецк-Луг, Сиротинские Гряды, Заход в Репный).

Ниже устья р. Емцы (до 154 км) русло образует на более чем 30-километровом участке выше и ниже п. Брин-Наволок серию из шести близких по морфометрическим параметрам врезанных излучин (средний шаг $L = 5.5–6.5$ км), из которых первая и четвертая осложнены островными или осередковыми разветвлениями, формирующимися возле вогнутых берегов, причем большая часть расхода воды проходит в рукавах (или протоках) у выпуклых берегов. На первой излучине у о. Репного в привершинной части и далее в нижнем крыле с осередками при ширине русла около 1600 м находятся сложные Репные перекаты, являющиеся прямым продолжением перекаточного участка выше устья р. Емцы. На нижних двух излучинах (Сийской и Брин-Наволок) русло сужается до 650 м и образует протяженный плесовый участок. Его продолжением является прямолинейное врезанное русло длиной 48 км (154–106 км), прерываемое двумя врезанными излучинами (Орлецы и мыс Пангал), из которых у с. Орлецы русло сужается до 550 м, образуя крутой структурный колленообразный изгиб с переуглублением русла (средняя глубина потока в межень — 27–28 м) в его вершине.

Перед и при слиянии с р. Пинегой вновь река образует две врезанные излучины, верхняя из них связана с островом, создающим шпору, в основании которой (по оси пояса меандрирования) проходит спрямляющий рукав. На нижней излучине, со стороны вогнутого берега которой в вершине располагается устье р. Пинеги, у выпуклого берега сформировалось небольшое прибрежное разветвление.

Ниже устья р. Пинеги русло становится раздвоенным, с протяженными (до 25 км) и широкими (до 10 км) структурными и скульптурно-аккумулятивными межукавьями, с разветвленными левыми рукавами и обтекающими излучинами основного по водности правого судоходного рукава. Островные массивы являются незатопляемыми, имеют сложную изометричную форму и достигают длины от 15 до 25 км. Ближе к дельте чередуются прямолинейное врезанное русло со скульптурно-аккумулятивными (о-ва Красная Кошка, Коневец и др.), затем одиночными разветвлениями (о-ва Турдеевский, Краснофлотский), сопрягающимися с обширной дельтой реки ниже г. Архангельска.

Трансформация русла

Распространение (табл. 1) морфологически однородных участков, обусловленное на Северной Двине геолого-геоморфологическими условиями формирования русла (широкопойменных, адаптированных, врезанных), неизменно во времени, но внутри их морфодинамические типы русла претерпели очень существенные трансформации, связанные: 1) с естественными переформированиями русла, приводящими не только к изменению его параметров и гидравлической структуры потока, но и во многих случаях к смене или усложнению типа русла; 2) с изменениями водности реки при потеплении климата; 3) с техногенными воздействиями в течении XX в. на русло, связанными в основном с мероприятиями по совершенствованию водного пути; 4) с резким сокращением дноуглубительных, прекращением выправительных и ремонтно-восстановительных (для ранее возведенных дамб и полузапруд) работ. При этом во многих случаях одни причины трансформации сказываются на фоне других, одновременно, и только при анализе происшедших изменений и при совокупном учете всех факторов возможно выделение ведущих, определивших направленные деформации русла и изменение его типа.

Наиболее яркое проявление трансформаций русла вследствие естественных деформаций дают сведения о развитии и обмелении рукавов разветвлений, спрямлений русла вдоль коренных берегов и появлении мощного источника поступления наносов. Характерным примером первого является Усть-Курское разветвление (рис. 2), в котором с конца XIX в. происходило последовательное развитие левых рукавов и общее смещение русла к левому коренному берегу: сначала у о. Песчанского в 1930–1940-е гг. как следствие развития излучины правого рукава и превышения им критического соотношения $l/L > 1.6$ (l — длина излучины, L — ее шаг) [12, 20], а в 2000-е гг. — у о. Марковского, который стал вторым основным рукавом, водность которого соизмерима (по измерениям в мае 2924 г.) с правым судоходным рукавом (46 и 54% от общего расхода воды в реке соответственно). Еще в 1960-е гг. это был маловодный полой — межостровная протока среди левобережных островов и отмелей; сейчас он — более короткий и прямой рукав пойменно-руслового разветвления, образованного двумя островами, из которых один (без названия) сформировался в последние 20–30 лет благодаря зарастанию крупного осередка перед оголовком о. Марковского. В судоходном правом рукаве побочни располагаются в шахматном порядке, глубины на перекатах в межень сокращаются до 1.5 м; левый рукав — Новинский полой — на всем протяжении более глубокий, перекаты практически отсутствуют.

Выше п. Красноборска между 572 и 588 км (по современному руслу) во время экстремально высокого половодья в 1930-е гг. произошло спрямление в основном вдоль левого коренного берега большой сложной излучины, вершина которой рас-

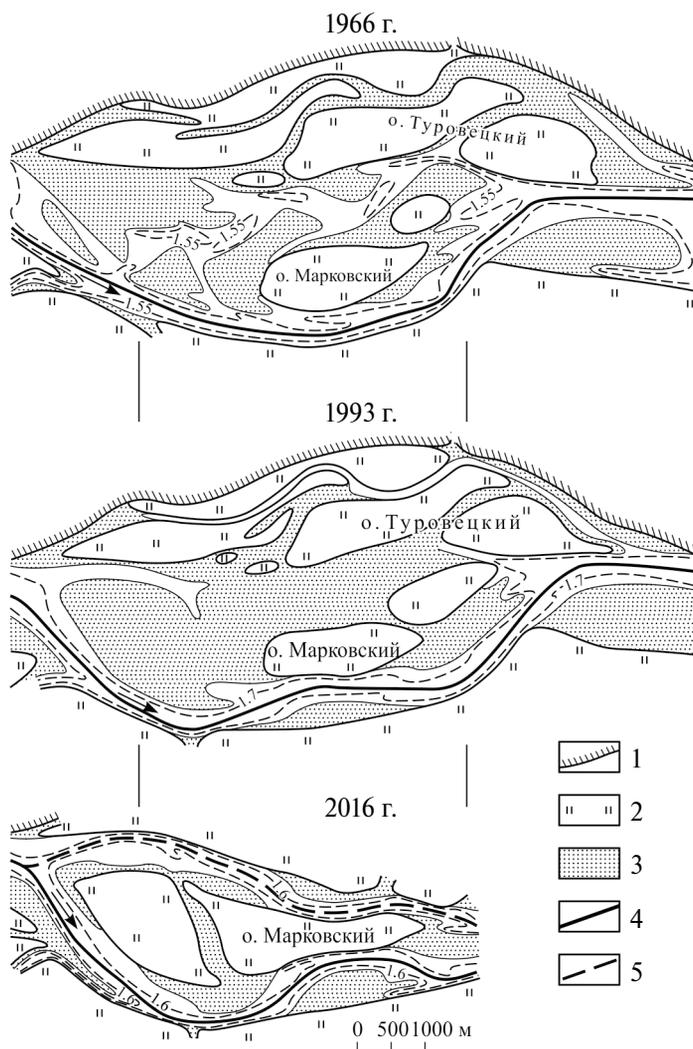


Рис. 2. Многолетние переформирования Усть-Курского разветвления. 1 — коренные берега; 2 — пойма; 3 — прирусловые отмели (побочки, осередки, косы); 4 — динамическая ось основного (по водности) рукава (судовой ход); 5 — второй основной рукав.

Fig. 2. Perennial reformations of Ust-Kurskoe branch. 1 — indigenous coasts; 2 — floodplain, 3 — midstream sandbanks (side bars, central bars, spits); 4 — dynamic axis of the main (in terms of water availability) arm (ship's course); 5 — second base arm.

полагалась у правого борта долины, а крылья по диагонали пересекали широкую пойму (при соотношении $l/L > 1.7$ [7, 18]). Сейчас бывшее русло представляет собой крупную пойменную протоку — полой, водность которого не превышает 15%.

В обоих приведенных примерах происходящие естественные трансформации русла поддерживались (но не определяли ее) разработкой капитальных дноуглубительных прорезей в развивающихся рукавах при переводе в них трассы судовой ходы для обеспечения гарантированных габаритов пути в переходный период. На Красноборском участке закреплению перемещения главного течения реки в спрямляющий

рукав способствовало его расположение в основном вдоль левого коренного берега. В Усть-Курском разветвлении сохранение в настоящее время большей водности правого судоходного рукава поддерживается ежегодным (даже в современных условиях) выполнением дноуглубительных работ на перекатах.

Расположение реки вдоль относительно выровненного в плане высокого коренного берега — условие формирования на широкопойменных участках прямолинейного русла как следствие возникновения специфической гидравлической структуры потока при затоплении в половодье односторонней поймы [20]. Таковы практически все участки Северной Двины с этим типом русла протяженностью от 4.5–5 до 18 км (Пермогорский участок), отличающиеся устойчивостью и неизменностью конфигурации русла в целом. В пределах таких участков рельеф поймы и его палеорусловой анализ свидетельствуют о том, что в прошлом русло здесь было разветвленным, но в ходе его переформирования, подойдя к коренному берегу, его положение стабилизировалось возле него. На их примере Н.И. Маккавеев [17] теоретически обосновал механизм формирования прямолинейного русла, а при проведении мероприятий по улучшению условий судоходства — правило “ведущего берега” как метода выправления русла. Однако наличие небольших неровностей таких берегов приводит к отклонению от него динамической оси потока, образованию ниже них побочной и перекатов; своевременное отторжение побочной (если оно не происходит естественным путем) обеспечивает устойчивое расположение потока и фарватера вдоль коренного берега. На Северной Двине отклонению потока от него нередко способствуют каменистые высыпки в русле как результат подмыва рекой берега, сложенного валунными моренными суглинками. С другой стороны, крупные изгибы коренного берега отклоняют его поток, являются причиной формирования ниже по течению разветвлений (Усть-Курского, Канзского, Красноборского и др.), в которых основным по водности, как правило, является удаленный от него рукав — в перечисленных — правый, в который поток направляется мысом левого коренного берега.

Естественная трансформация русла произошла с Ботовским разветвленно-извилистым руслом, где до 2000-х гг. крутую сегментную излучину образовывали два больших острова, разделенные спрямляющими ее межостровными протоками. К этому времени параметры излучины превысили критические размеры ($l/L > 1.7$), что привело к перераспределению стока, в результате чего бывший судоходный рукав, образующий излучину, обмелел (его водность теперь составляет всего 14.4%), тогда как спрямляющий, относительно прямолинейный Ботовский полой, проходящий возле правого коренного берега, превратился в основной по водности и глубокий на всем протяжении рукав (рис. 3). В известной мере этому способствовали дноуглубительные работы по новому направлению основного потока (и судового хода, перенесенного в развивающийся Ботовский полой).

Паячные-Рубежские-Коптельские параллельно-рукавные разветвления возникли в первую половину XX в. перед сужением днища долины и сменой широкопойменного русла врезанным в зоне подпора и аккумуляции наносов в половодье. Но до конца XIX в. непосредственно перед сужением днища долины было одностороннее разветвление, а выше него — прямолинейное широкое русло со сложным перекатным участком, подстилаемое трудноразмываемыми моренными суглинками. Образование параллельно-рукавного разветвления произошло в 1920-е гг. благодаря тому, что выше по течению стал интенсивно (до 5–10 м/год) размываться правый берег Северной Двины — песчаные Толоконные горы. При протяженности фронта

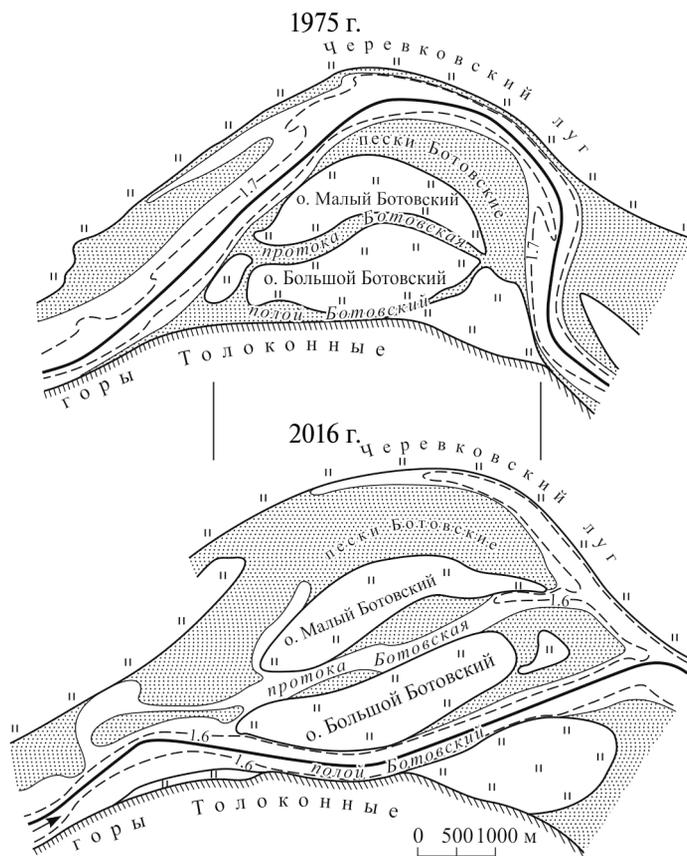


Рис. 3. Спряменение излучины Ботовского разветвленно-извилистого участка русла.

Fig. 3. Bend straightening of Botovskiy branching-meandering section.

размыва 6 км, высоте размываемого берега около 40 м и глубине плесовой лощины возле него до 4–8 м в поток поступало огромное количество наносов, которые аккумуляровались в зоне подпора от сужения долины ниже по течению [18]. В настоящее время участок представляет собой параллельно-рукавное разветвление русла, в котором выделяются два основных рукава между островами посередине реки (нижние из них — о-ва Рубежский и Овечий) и второстепенный левобережный рукав (полой Ягрышский), отделенный от основных рукавов о-вами Авнюгским, Ягрышским и безымянными (рис. 4). Выше по течению (494–501 км) параллельно-рукавное разветвление образовано двумя рукавами: левым — судоходным и правым — полем Тядемским, водность которого перед его слиянием с правым рукавом Паячного-Рубежского участка составляет 22%.

В 1950–1960-е гг. в пределах Паячных-Рубежских разветвлений были выполнены крупные выправительные работы (дноуглубление и сооружение перекрывающих правые рукава дамб), и судовой ход был искусственно закреплен в левом рукаве этих разветвлений, причем углубление произведено отчасти в подстилающие русло моренные отложения. Выбор левого рукава в качестве судоходного был обусловлен

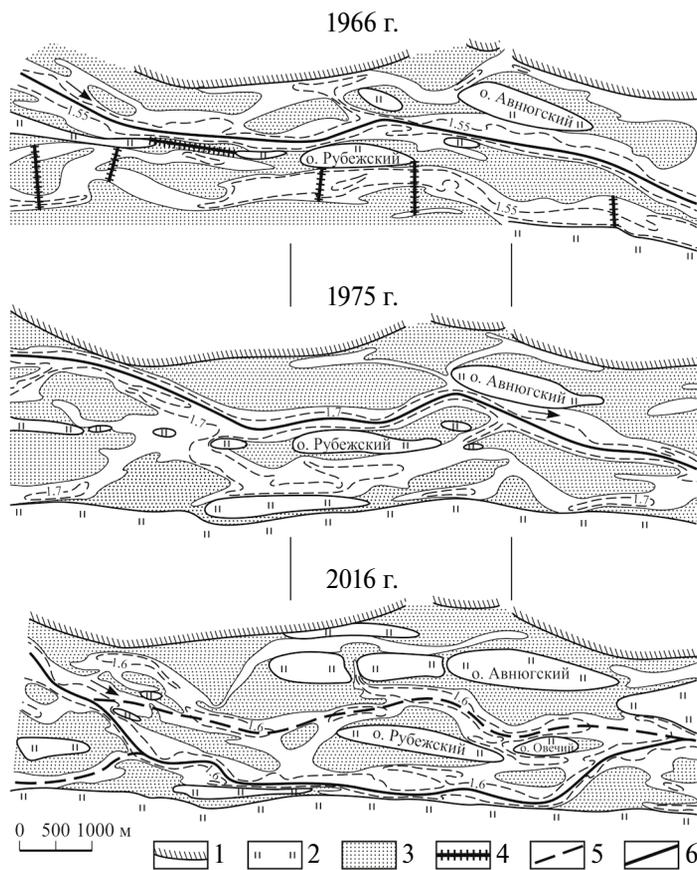


Рис. 4. Переформирования Паячных-Рубежских разветлений. 1 — коренные берега, 2 — пойма, 3 — прирусловые отмели; 4 — выправительные сооружения (дамбы); 5 — динамическая ось основного (по водности) рукава (судовой ход); 6 — второй основной рукав.

Fig. 4. Reformations of Pajachnye-Rubezhskie branches. 1 — indigenous coasts; 2 — floodplain, 3 — midstream sandbanks; 4 — rectification structures (dams); 5 — dynamic axis of the main (in terms of water availability) arm (ship's course); 6 — second base arm.

тем, что продукты размыва Толоконной горы в основном направлялись в правый рукав, вызывая его обмеление. Возведение дамб способствовало обмелению этого рукава и повышению водности левого рукава. Со временем дамбы, перекрывающие правый рукав, разрушались, практически перестали функционировать. Это привело к естественному повышению водности и развитию правого рукава. В это же время выше по течению Толоконная гора оказалась частично перекрытой смещающимися с вышерасположенного участка отмелями, что более чем в два раза сократило длину фронта размыва и, как следствие, существенно уменьшило поступление наносов. В результате произошло на всем протяжении Паячных-Рубежских-Коптельских разветлений развитие правого рукава, который в настоящее время забирает 51% расхода воды в половодье.

Таким образом, Паячные-Рубежские-Коптельские разветвления — пример естественного формирования разветвленного русла сложного типа и последующих его изменений вследствие сначала мощных техногенных воздействий, а затем их пре-

кращения и произошедшего одновременно с этим снижения в ходе деформаций русла значимости местного источника поступления наносов. Возможно, что в определенной мере сказались и гидроклиматические изменения, способствующие превращению осередков в острова и перераспределению стока между рукавами.

Все изменения русла, как естественные, так и техногенные, осуществляются на общем фоне увеличения годового стока реки со 2-й половины XX в. на 8–10% при снижении водности половодий и увеличения ее в межень [4]. При этом в летнюю межень, несмотря на повышение водности, по реке с разветвленным руслом отмечено понижение уровня воды и сокращение вследствие этого затопляемости прирусловых отмелей (побочней и осередков) [18]. Это привело к их массовому зарастанию растительностью и превращению осередков и побочней с развитыми побочневыми протоками в острова, рассредоточению стока по рукавам, изменению параметров русла и обмелению перекаатов в многоводную фазу режима (до снижения глубин ниже гарантированных для водного пути 1.6–1.7 м от проектного уровня) и их сложным изменениям на спаде уровней и в межень. Причиной этого противоречия является массовое выполнение дноуглубительных работ на перекатах и вызванное стеснением потока выправительными сооружениями врезание реки.

Действительно, в 1960–1980-е гг. ежегодные объемы землечерпания составили 13 000–18 000 тыс. м³, достигнув максимума в 1975 г. — 20 854 тыс. м³ на участке от г. Котласа (устье р. Вычегды) до п. Двинской Березник (ниже устья р. Ваги) длиной 302 км. Соответственно, в среднем на 1 км длины реки приходится извлечение в среднем около 50 тыс. м³ (максимум — более 60 тыс. м³). Ниже по течению дноуглубление выполнялось на четырех участках адаптированного русла общей длиной 40 км (Шеньга, Калкурском-Почтовском, Усть-Емецком и Хоробойском) в меньших объемах и не столь регулярно. Грунты, извлекаемые из прорезей, укладываются в виде отвалов вдоль них (подобие грунтовых сооружений), что не нарушало баланс наносов на реке. Вместе с многочисленными выправительными сооружениями (дамбами, полузапрудами, число которых на реке к 1990-м гг. достигло 38 единиц; большинство их сейчас разрушены) они способствовали сужению русла или стрежневой зоны потока и, как следствие, его углублению.

На последних 164 км реки ниже п. Брин-Наволоок, где русло врезано в скальные грунты (известняки и гипсы), суженное относительно других участков реки в 1.5–2 раза, глубокое и лишенное обсыхающих в межень отмелей, и в пределах устьевой области выправительные работы и дноуглубление для судоходства никогда не проводились.

Благодаря такому техногенному воздействию на русло (а оно основывалось на анализе и закономерностях проявления русловых процессов) разработка капитальных дноуглубительных прорезей и массовое возведение выправительных сооружений гарантированные глубины на Северной Двине постоянно возрастали от 60–70 см в 1913–1915 гг. до 90 см в 1928 г., 120 см в 1940 г., 145 см в 1960 г. и с 1970 до 1991 г. — до 170 см от слияния с р. Вычегдой до устья р. Ваги (п. Двинской Березник) и 180 см ниже по течению, до слияния с р. Пинегой. В 1990-е гг. выправительные работы на Северной Двине (как и на всех судоходных реках России) были прекращены, большинство ранее построенных сооружений были разрушены или в процессе реформирования русла оказались за пределами его активной зоны и перестали оказывать воздействие на него. Это привело к появлению тенденции релаксации (восстановления) естественного руслового режима и активизации русловых деформаций. При этом гарантированные глубины в общем при минимуме эксплуатацион-

ного землечерпания на наиболее затруднительных перекатах в целом сохраняются на уровне 160 и 170 см, хотя в низкую межень часто не выдерживаются, особенно при снижении уровней воды ниже проектного (например, в 2024 г. — до –1 м). Однако сам факт сохранности повышенных гарантированных глубин свидетельствует о высокой эффективности выполненных в 1960–1980-е гг. работ по созданию современного водного пути.

Согласно исследованиям В.В. Суркова [18], понижение уровней в межень при снижении расходов воды в половодье привело на Северной Двине к сокращению на 20–40 дней продолжительности затопления отмелей, что способствовало зарастанию побочней и осередков. Появление же растительности на отмелях при их затоплении, в свою очередь, благоприятствует накоплению наилка, насыщенного органикой (пойменная фация аллювия), способствуя активизации их зарастания и превращения в пойму. В результате с 1975 по 2016 г. вследствие зарастания осередков на Северной Двине возникло более 50 островов, увеличилась длина и ширина ранее существовавших, возросла рассредоточенность потока по рукавам и протокам.

Характерным примером повсеместного зарастания осередков и побочней, примыкающих к островам, представляет Слудское-Липовецкое-Селецкое параллельно-рукавное разветвление. Еще в 1950-е гг. этот участок представлял собой прямолинейное русло с одиночным разветвлением в его начале (о. Слудский, бывший в несколько раз меньше современного) и маловодными протоками за прибрежными островами вдоль одного или обоих берегов, с шахматным расположением побочней, образующих протяженный перекаточный участок. Зарастание отмелей-осередков и превращение их в острова привело к трансформации русла в параллельно-рукавное, а нижней части участка — в прибрежные двусторонние разветвления (рис. 5).

Подобные трансформации произошли в 1990-е годы на Канзском-Лобановском участке, где образовалось два новых острова, которые вместе со старым о. Канзским, но сильно разросшимся, составили сопряженные разветвления из трех звеньев. Единую сопряженную систему образовал вновь образовавшийся о. Могучий с расположенным против устья р. Ваги о. Щилинским. Этот процесс еще не завершился (на 2024 г.), и поэтому в табл. 1 оба разветвления представлены не сопряженными, а как смежные одиночное и пойменно-русловое.

Преобладание техногенных воздействий в трансформации русла, приведшее к смене его морфодинамического типа, наиболее наглядно проявилось на Телеговском широкопойменном и на Свагско-Верхнетоймском участке врезанного русла. Первое из них представляло собой в начале 1900-х гг. сопряженную систему рукавов, в которых вследствие выправительных работ судовой ход в верхних звеньях был закреплен возле левого берега, а ниже по течению до середины XX в. сохранялось одиночное разветвление с периодическим (через 5–10 лет) развитием и расположением судового хода то в левом, то в правом рукавах. В 1950-е гг. правый рукав был перекрыт полузапрудами, и основной поток и судовой ход устойчиво расположились в левом рукаве. Таким образом, сопряженные разветвления трансформировались в односторонние (рис. 6), в которых бывшие вторыми основными рукава (полой Свага) превратились в маловодные (доля стока в них суммарно не более 10%), а само преобразование русла приобрело необратимый характер (капитальные дамбы, перекрывающие рукава, сохранились, но они “погребены” под толщей наносов, их заполнивших и образовавших зарастающие отмели).

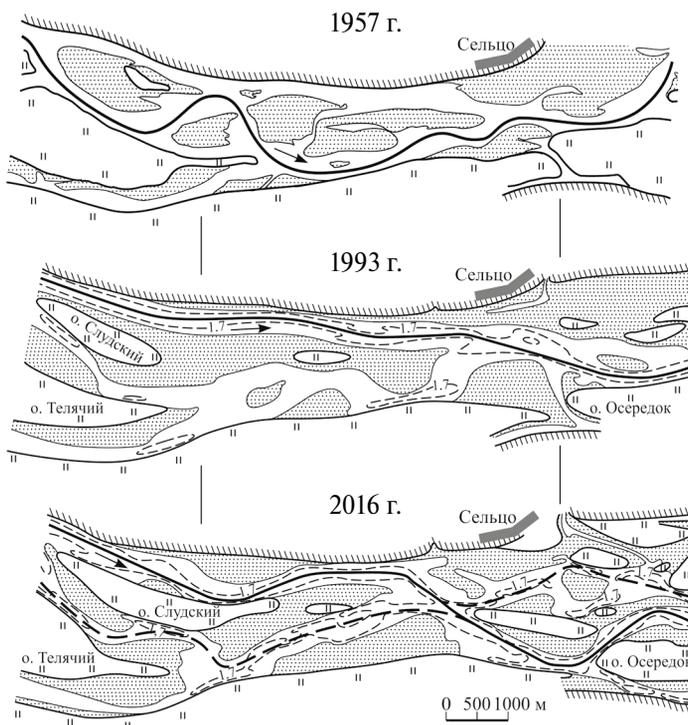


Рис. 5. Трансформация русла на Слудском-Липовецком-Селецком участке (условные обозначения на рис. 4).

Fig. 5. Channel transformation in Sludskoye-Lipovetskiy-Seletskiy section (symbols at fig. 4).

На втором участке с врезанным руслом (береговая пойма отсутствует) трансформация параллельно-рукавных разветвлений в односторонние с расположением основного русла вдоль левого коренного берега обусловлено перекрытием в 1949-е гг. правого рукава (полной Свага) глухими высокими (выше среднего уровня половодья) дамбами в связи с его использованием еще в конце XX в. как плотбище. В нижней части разветвления в связи с его продольным смещением до вершины ниже расположенной врезанной излучины произошло удлинение водного подхода к п. Верхняя Тойма (раньше верхнее крыло излучины было неразветвленным). Поэтому в связи с выносом причалов к судоходному рукаву на вновь образовавшийся остров полной Свага был и здесь в 2000-е гг. перекрыт дамбой, по которой проложена дорога от поселка (райцентр) к причалам, которые обслуживают паромную переправу.

С зарастанием осередков и формированием за последние 50 лет новых островов связано образование на Шилковском участке левобережных односторонних разветвлений ниже отхода реки от Пермогорского коренного берега и затем ниже по течению одиночного разветвления, в котором правый несудоходный рукав забирает 35% расхода воды. Это обуславливает систематическое обмеление перекатов на перевале основного потока из правого рукава односторонних разветвлений в левый в одиночном из-за снижения водности основного судоходного рукава и развития кос в ухвостьях левобережных островов, искривления стрежня потока, их огибающего, фор-

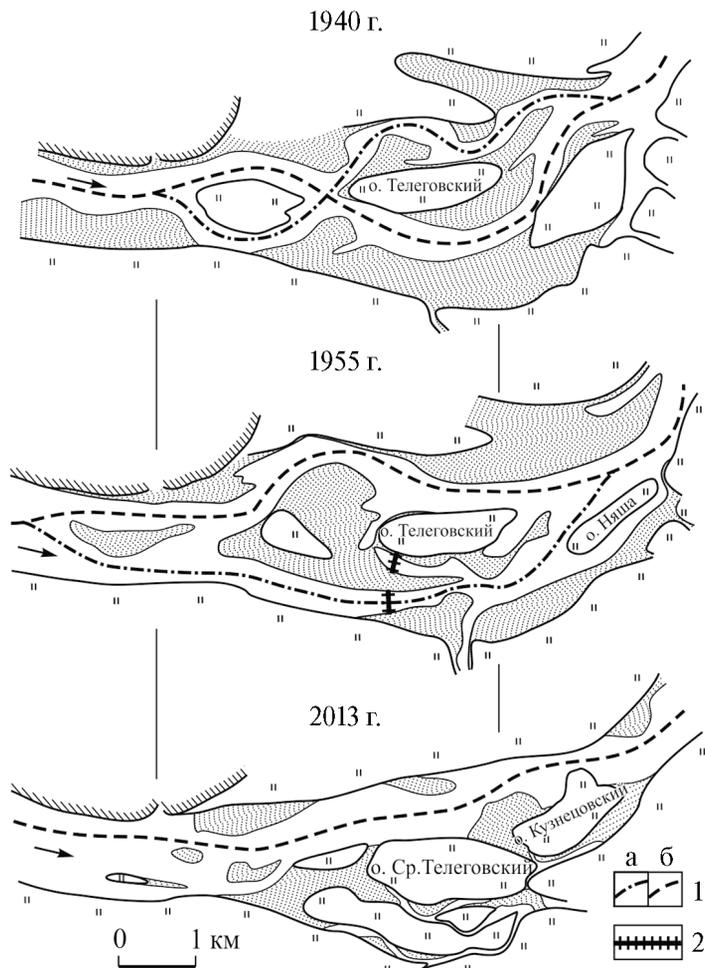


Рис. 6. Трансформация сопряженных разветвлений в одиночное и затем в односторонние как следствие выполнения выправительных работ (Телеговские разветвления). 1 — судовой ход: а — до, б — после их проведения; 2 — дамбы [21].

Fig. 6. Transformation of conjugate branches to single and then to unilateral branches as a consequence of rectification works (Telegovskie branches). 1 — ship's course: a — before; b — after the work is completed; 2 — dams [2].

мирования затонской части вдоль левого берега и периодического отторжения косы, отделяющей ее от основного потока (рис. 7).

Таким образом, в течение XX–XXI столетий на большей части Северной Двины произошли существенные трансформации русла, приведшие к усложнению уже существующих разветвлений, превращению их в параллельно-рукавные и сопряженные, образованию новых, спрямлению больших излучин и сменам морфодинамических типов русла, что явилось следствием проведения на реке различных гидротехнических мероприятий (дноуглубления и строительства выправительных сооружений) на фоне гидроклиматических изменений при одновременных интенсивных русловых переформированиях, свойственных слабоустойчивому руслу. Во всех случаях, когда происходила естественная трансформация русла и для обе-

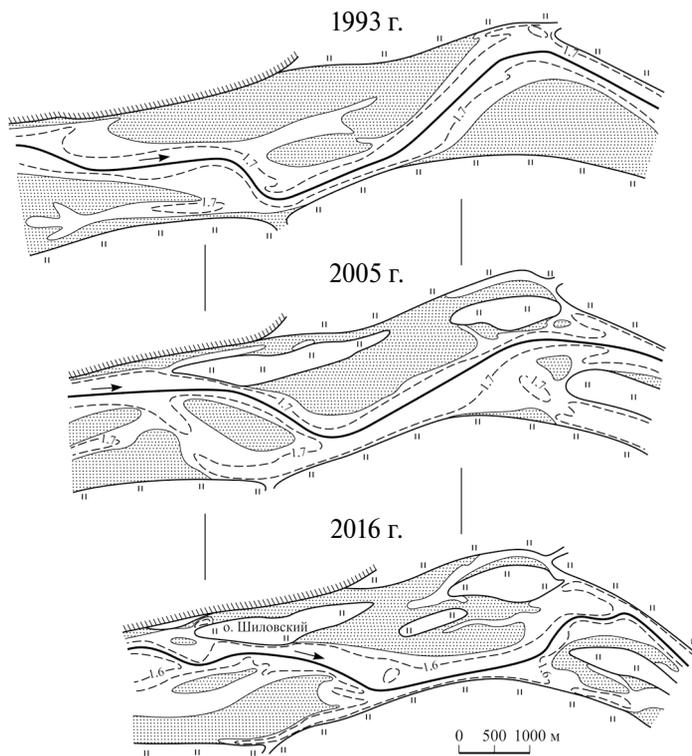


Рис. 7. Образование односторонних и одиночного разветвления на Шиловском участке.

Fig. 7. Formation of unilateral and single branching at Shilovskiy section.

спечения в переходный период нормальных условий судоходства, они поддерживались в той или иной мере разработкой прорезей в развивающемся рукаве. При этом трансформации охватили как широкопойменное русло от слияния с р. Вычегдой (135 км, около $\frac{1}{4}$ протяженности реки), так и большую часть врезанного и адаптированное русло до устья р. Ваги, где оно формируется в основном в моренных валунных суглинках и пермско-триасовых песчаниках и алевролитах. Ниже устья р. Ваги и особенно на нижнем 164-километровом участке, где врезанное русло формируется в известняках и гипсах карбона, его трансформации не проявляются или отмечены только в местных расширениях русла, сопровождающихся появлением узкой поймы ($B_{п} < b_p$), и на адаптированных участках ($B_{п} = 2-3b_p$). На этих же не связанных между собой участках выполнялись дноуглубительные работы, но не столь регулярно и в меньших объемах, чем выше устья р. Ваги. Поэтому массовое зарастание прирусловых отмелей и почти повсеместная трансформация русла произошли на Северной Двине от слияния с р. Вычегдой до устья р. Ваги, где русло, независимо от того, широкопойменное оно или врезанное, и от морфодинамического его типа, слабоустойчивое, и на нем в полной мере проявляются как естественные деформации, так техногенные воздействия. Ниже по течению русло относительно устойчивое, а от п. Брин-Наволоч до дельты — устойчивое. Соответственно, ширина широкопойменного русла $b_p = 1900-2900$ м, (максимальная на Паячном-Рубежском-Коптельском участке), врезанного и адаптированного выше устья

р. Ваги $b_p = 1100\text{--}1800$ м, тогда как в нижнем течении в основном $b_p = 900\text{--}1100$ м и лишь у адаптированного русла на Усть-Емецком участке $b_p = 1700$ м, в местных расширениях $b_p = 1200\text{--}1600$ м. Ниже п. Брин-Наволок и до слияния с р. Пинегой b_p сокращается до $500\text{--}550$ м.

Заключение

Обобщая приведенный анализ трансформаций русла Северной Двины, можно прийти к выводу, что все они происходят в широкопойменном, адаптированном русле и на тех участках врезанного, где оно сформировано в моренных или пермско-триасовых отложениях. Врезанное в скальные породы русло в нижнем течении реки с XIX в. практически не изменилось. Основным фактором трансформации является мощное техногенное воздействие, связанное с проведением дноуглубительных и выправительных работ для обеспечения необходимых для водного пути габаритов (в первую очередь, глубины русла). Эти работы из-за их объема и массовости затушевывают влияние повышения годового стока реки при снижении водности половодья и повышения ее в межень. Вследствие вызванного ими углубления почти на 1 м перекатов, являющихся именно в меженный период естественными регуляторами уровней воды [3, 11, 12, 17], и, соответственно, их понижения произошло снижение затопляемости прирусловых отмелей, их массовое зарастание, превращение осередков в острова и увеличение размеров ранее существующих. В большинстве своем в условиях широкопойменного и адаптированного русла это привело к усложнению существовавших разветвлений, формированию морфологически наиболее сложных и возникновению новых. При этом на некоторых участках как широкопойменного, так и врезанного русла возведение дамб, в том числе перекрывающих рукава, привело к упрощению разветвленности русла и концентрации стока в одном рукаве.

Во всех случаях выполнение выправительных и дноуглубительных работ опиралось на естественные тенденции русловых переформирований, что обеспечивало не только техническую эффективность, но и сохранение реки как природного объекта, т.е. гидроэкологическую безопасность мероприятий.

Полученные результаты должны учитываться при разработке прогнозов русловых деформаций, что особенно важно сейчас, когда поднимается вопрос о восстановлении водных путей и речного флота как важной составляющей транспортной системы России. Реализация этого связана с проектированием мероприятий по управлению русловыми процессами, которые основываются на закономерностях их проявлений и изменчивости при техногенных воздействиях.

Благодарности

Работа выполнена по планам НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши (№ 121051400038-1), научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов имени Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051100166-4) исходные материалы и русловой анализ), Российского университета транспорта (№ 103-00001-25-02 от 20.03.2015 анализ дноуглубительных и выправительных работ), при финансовой поддержке РНФ — проект № 23-17-00065 (разработка классификации, морфология и динамика русел).

Список литературы

1. Вильперт А.С. Выправление рек Северного бассейна // Речной транспорт. 1963. № 9. С. 25–27.
2. Гладков Г.Л., Чалов Р.С., Беркович К.М. Гидроморфология русел судоходных рек. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2016. 434 с.
3. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: Транспорт, 1972. 216 с.
4. Евстигнеев В.М., Кислов А.В., Сидорова М.В. Влияние климатических изменений на годовой сток рек Восточно-Европейской равнины в XXI в. // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. № 2. С. 3–10.
5. Завадский А.С., Чалов Р.С. Условия формирования и морфология свободных излучин на реках Северной Евразии // Геоморфология. 2000. № 1. С. 88–95.
6. Завадский А.С., Иванов В.В., Чалов Р.С. Особенности морфодинамики перекатов и их роль в формировании заторов на Северной Двине // География и природные ресурсы. 2005. № 2. С. 62–67.
7. Каргаполова И.Н. Реакция русел рек на изменения водности и антропогенное воздействие за последние столетия. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ. 2006. 27 с.
8. Лелявский Н.С. О речных течениях и формировании речного русла // Труды 2-го съезда инженеров-гидротехников в 1893 г. СПб., 1893. (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 18–136.)
9. Лохтин В.М. О механизме речного русла. СПб., 1897. (Вопросы гидротехники свободных рек). М.: Речиздат. 1948. С. 23–59.)
10. Львовская Е.А. Ретроспективный анализ, современное состояние и оценка возможных изменений русловых процессов на больших реках севера ЕТР. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. М.: Изд-во МГУ. 2016. 30 с.
11. Маккавеев Н.И. Русловой режим рек и трассирование прорезей. М.: Речиздат, 1949. 201 с.
12. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.
13. Маккавеев Н.И., Останин В.Е., Сахарова Е.И. Геоморфологические исследования для обоснования проектов улучшения судоходных условий рек // Вопросы географии. М.: Географгиз, 1961. № 52. С. 100–104.
14. Михайлова Н.М. Режим деформаций перекатов и его влияние на условия судоходства р. Северной Двины. Автореферат дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ. 2014. 30 с.
15. Михайлова Н.М., Львовская Е.А. Количественная оценка сезонных переформирований перекатов (на примере Северной Двины) // География и природные ресурсы. 2013. № 3.
16. Михайлова Н.М., Чалов Р.С. Классификация участков русла Северной Двины и Вычегды по сложности русловых процессов и управления ими // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 3. С. 25–30.
17. Проектирование судовых ходов на свободных реках // Труды ЦНИИЭВТ. Вып. 36. Под ред. Н.И. Маккавеева. М.: Транспорт, 1964. 262 с.
18. Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины. // Под ред. Р.С. Чалова. М: ООО “Журнал “РТ”, 2012. 492 с.
19. Чалов Р.С. О механизме формирования прирусловых отмелей // Изв. ВГО. 1964. Том 96. № 5. С. 433–434.
20. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.
21. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенные воздействия, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.

Morphodynamics of the Channel of the Northern Dvina River, Its Natural and Technogenic Transformations in the XX–Early XXI Century

R.S. Chalov^{1,2}, G.B. Golubtsov^{1,2}, A.A. Kurakova¹,
V.A. Semakov¹, E.D. Panchenko^{1,3,*}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Russian University of Transport, Moscow, Russia

³Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

*E-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

Received 14.04.2025

Revised 30.05.2025

Accepted 09.06.2025

The article presents the main directions and conditions of the transformation of the Northern Dvina river channel (from the confluence with the Vychegda River), occurring under the influence of almost a century of anthropogenic impacts, fluvial deformations and hydroclimatic changes; the contribution of each of these factors and their interrelations are determined. The study is based on analysis of field measurements (branching water discharges, flow velocity fields, turbidity and sediment composition) taken during the 2024 flood period, river maps showing channel conditions at various times since the 1960s, satellite imagery and riffle and riffle area maps. It has been shown that the reformation of the northern Dvina channel takes place in the wide floodplain and adapted channels, and in those sections of the incised channel where it is formed in moraine or Permo-Triassic sediments. The main factor of transformation is anthropogenic, namely dredging and straightening to ensure the required dimensions (mainly channel depth) of the waterway. Due to the amount of work carried out, their influence is much greater than the role of changes in water flow, which for the Northern Dvina is manifested in an increase in annual flow with a decrease in water availability during floods and an increase during low flow periods. Dredging and straightening has resulted in more complex branching in most sections of the channel in a wide floodplain and adapted channel. However, the construction of dams, including those that overtopped arms, has resulted in simplified channel branching in some sections of both incised and wide floodplain channels.

Keywords: channel processes, dredging, straightening, wide floodplain, adapted, incised channel, branching channels

References

1. Vil'pert A.S. Vypravlenie rek Severnogo bassejna // *Rechnoj transport*. 1963. № 9. S. 25–27.
2. Gladkov G.L., Chalov R.S., Berkovich K.M. *Gidromorfologiya rusel sudohodnyh rek*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016. 434 s.
3. Grishanin K.V. *Teoriya ruslovogo processa*. M.: Transport. 1972. 216 s.
4. Zavadskij A.S., Ivanov V.V., Chalov R.S. Osobennosti morfodinamiki perekatov i ih rol' v formirovanii zatorov na Severnoj Dvine // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2005. № 2. S. 62–67.
5. Evstigneev V.M., Kislov A.V., Sidorova M.V. Vliyanie klimaticheskikh izmenenij na godovoj stok rek Vostochno-Evropejskoj ravniny v XXI v. // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2010. № 2. S. 3–10.
6. Zavadskij A.S., Chalov R.S. Usloviya formirovaniya i morfologiya svobodnyh izluchin na rekah Severnoj Evrazii // *Geomorfologiya*. 2000. № 1. S. 88–95.

7. Kargapolova I.N. Reakciya rusel rek na izmeneniya vodnosti i antropogennoe vozdejstvie za poslednie stoletiya. Avtoref. dis. ... kand. geogr. nauk. M.: Izd-vo MGU. 2006. 27 s.
8. Lelyavskij N.S. O rechnyh techeniyah i formirovanii rechnogo rusla // Trudy 2-go s"ezda inzhenerov-gidrotehnikov v 1893 g. SPb., 1893. (Voprosy gidrotehniki svobodnyh rek. M.: Rechizdat, 1948. S. 18–136.)
9. Lohtin V.M. O mekhanizme rechnogo rusla. SPb., 1897. (Voprosy gidrotehniki svobodnyh rek). M.: Rechizdat. 1948. S. 23–59.)
10. L'vovskaya E.A. Retrospektivnyj analiz, sovremennoe sostoyanie i ocenka vozmozhnyh izmenenij ruslovyh processov na bol'shikh rekah severa ETR. Avtoref. diss. ... kand. geogr. nauk. M.: Izd-vo MGU. 2016. 30 s.
11. Makkaveev N.I. Ruslovoj rezhim rek i trassirovanie prorezej. M.: Rechizdat, 1949. 201 s.
12. Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v ee bassejne. M.: Izd-vo AN SSSR, 1955. 347 s
13. Makkaveev N.I., Ostanin V.E., Saharova E.I. Geomorfologicheskie issledovaniya dlya obosnovaniya proektov uluchsheniya sudohodnyh uslovij rek. // Voprosy geografii. M.: Geografiz, 1961. № 52. S. 100–104.
14. Mihajlova N.M. Rezhim deformacij perekatov i ego vliyanie na usloviya sudohodstva r. Severnoj Dviny. Avtoreferat dis. ... kand. geogr. nauk. M.: MGU. 2014. 30 s.
15. Mihajlova N.M., L'vovskaya E.A. Kolichestvennaya ocenka sezonnyh pereformirovanij perekatov (na primere Severnoj Dviny) // Geografiya i prirodnye resursy. 2013. № 3.
16. Mihajlova N.M., Chalov R.S. Klassifikaciya uchastkov rusla Severnoj Dviny i Vychehdy po slozhnosti ruslovyh processov i upravleniya imi // Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. 2021. № 3. S. 25–30.
17. Proektirovanie sudovyh hodov na svobodnyh rekah // Trudy CNIIEVT. Vyp. 36. Pod red. N.I. Makkaveeva. M.: Transport, 1964. 262 s.
18. Ruslovyje processy i vodnye puti na rekah bassejna Severnoj Dviny. // Pod red. R.S. Chalova. M: ООО "ZHurnal "RT", 2012. 492 s.
19. Chalov R.S. O mekhanizme formirovaniya priruslovyh otmelej // Izv. VGO. 1964. Tom 96. № 5. S. 433–434.
20. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnyh rusel. M.: KRASAND, 2011. 960 s.
21. Chalov R.S. Ruslovedenie: teoriya, geografiya, praktika. T. 3. Antropogennye vozdejstviya, opasnye proyavleniya i upravlenie ruslovyimi processami. M.: KRASAND, 2019. 640 s.